

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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., СПбГИ (ТУ)
Буддакова 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., СПбГИ (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 Россий-
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 74

3
2020

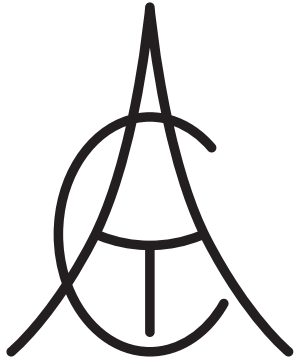
СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- Годжаманов М.Г., Вердиев С.Б.** Оценка информативности
результатов лазерного сканирования при исследовании вер-
тикальности тепловых труб энергетических объектов 99
- Денисов М.С., Котов Г.А.** Влияние давления на сжимае-
мость алюминиевых сплавов 102
- Пузанов А.В., Сукоркина О.О., Ершов Е.А.** Моделирование
работоспособности насосного оборудования в арктических
условиях эксплуатации 108
- Кокорева О.Г.** Влияние волновых процессов на механизм
деформирования образца 112
- Воробьёв Е.И., Дорофеев В.О.** Координация движений
двух манипуляторов, функционирующих совместно 115
- Микаева С.А., Микаева А.С., Ларшина Э.Л.** Система очист-
ки воздуха 118

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Гладышев В.О., Кауц В.Л., Терешин А.А., Ульрих И.В.,
Фам С.Ч.** Перспективные направления развития систем ори-
ентации и навигации летательных аппаратов 123
- Фам С.Ч., Суркова А.Д., Селезнева М.С.** Исследование си-
стемы маршрутной коррекции бортовой навигационной си-
стемы беспилотного летательного аппарата по радиолока-
ционным изображениям местности 129
- Коченгин А.Е., Шихина А.В., Ягодкина Т.В.** Агрегирован-
ная модель прогноза цены на рынке электроэнергии 134



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

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)

It is published since 1947

Volume 74 $\frac{3}{2020}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Godzhamanov M.G., Verdiev S.B. Informativeness assessment
of the laser scanning results at the verticality study of the energy
objects heat pipes 99

Denisov M.S., Kotov G.A. The effect of pressure on the com-
pressibility of aluminum alloys 102

Puzanov A.V., Sykorkina O.O., Ershov E.A. Modeling the ope-
rability of pumping equipment in arctic operating conditions . . . 108

Kokoreva O.G. The influence of wave processes on the sample
deformation mechanism 112

Vorobei E.I., Dorofeev V.O. The movement coordination of two
manipulators, functioning together 115

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Larshina E.L. Air purification
system 118

MODERN TECHNOLOGIES

**Gladyshev V.O., Kauts V.L., Tereshin A.A., Ulrikh I.V.,
Fam S.Ch.** Promising directions for the development of aircraft
orientation and navigation systems 123

Fam S.Ch., Surkova A.D., Selezneva M.S. Study of the route cor-
rection system for the on-board navigation system of an unmanned
aerial vehicle on the grounds of radar images of the terrain 129

Kochengin A.E., Shikhtina A.V., Yagodkina T.V. Aggregated
forecast model for prices on electricity market 134



М.Г. Годжаманов, д-р техн. наук, проф.
(Бакинский государственный университет, Республика Азербайджан),
С.Б. Вердиев
(Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку)
asadzade@rambler.ru

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена оценка информативности результатов лазерного сканирования при исследовании вертикальности тепловых труб энергетических объектов. Показано, что при проведении исследований наклона множества тепловых труб с различными высотами должна быть обеспечена прямопропорциональная связь между высотой трубы и количеством проводимых измерений. При этом выбор оптимального типа связи между указанными показателями не зависит от среднеквадратичного отклонения результатов проводимых измерений с помощью лазерных сканеров.

Ключевые слова: лазерный сканер; информативность; тепловые трубы; оптимизация; среднеквадратичное отклонение.

The estimation of the results informativeness of the laser scanning at the verticality study of the energy objects heat pipes is considered. It is shown that when conducting studies of the many heat pipes slopes with different heights, a directly proportional relationship between the height of the pipe and the number of measurements should be provided. In this case, the choice of the optimal communication type between these specified factors does not depend on the standard deviation of the conducted measurements results using laser scanners.

Keywords: laser scanner; informativeness; heat pipes; optimization; mean-root square deviation.

Как отмечается в работе [1], мониторинг деформации сверхвысоких структур при различных условиях окружающей среды является важнейшим вопросом в комплексе мер по обеспечению их безопасности и работоспособности. Относительно новыми методами для измерения перемещения отдельных точек на этих структурах из-за таких факторов, как температура, ветер, землетрясения и другие, является GPS, тотальные станции, радары, лазер, видеокамера. За исключением GPS, указанные методы и средства часто используются для проведения кратковременного мониторинга, так как для нормальной работоспособности этих устройств необходимо иметь хорошие погодные условия. Для исследования наклона различных труб также может быть использована фотограмметрия [3]. В любом случае, как отмечается в работе [2], для получения достоверных результатов необходимо, чтобы измеренная величина отклонения была значительно больше, чем достижимая точность используемого метода измерения.

Как отмечается в работе [2], совместное использование лазерного сканера и тотальной станции позволяет получить плотное облако точек на поверхности тепловых труб.

Согласно работе [4] лазерное сканирование позволяет получить информацию для составления 3D-модели всей структуры тепловых труб. При этом позиции расположения сканеров должны быть выбраны так, чтобы обеспечить максимальную видимость всей поверхности структуры (рис. 1, а). В случаях когда

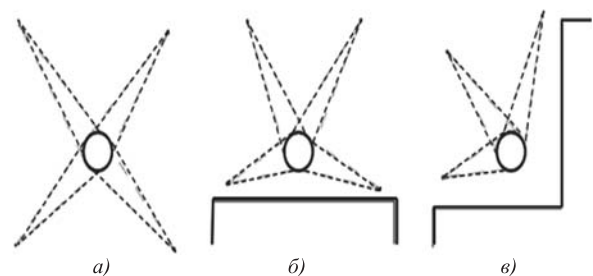


Рис. 1. Выбор позиций сканеров, позволяющих получить:
а и б — целое облако точек; в — неполное облако точек

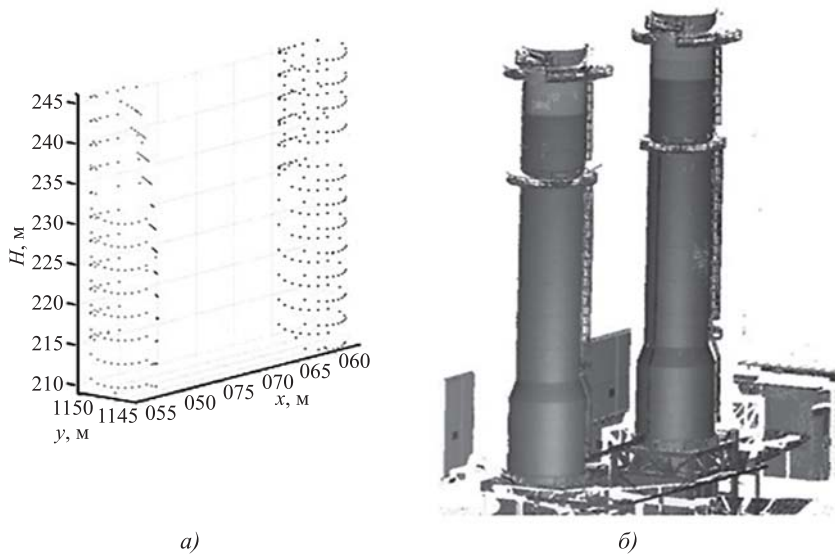


Рис. 2. Графическая презентация формирования облака точек с помощью TS30 R1000 (LeicaGeosystems) (а) и RieglVZ-400 (б)

трубы расположены близко к другим структурам (рис. 1, б), возможны установка сканеров максимально близко к этим структурам или использование в качестве базиса неполного облака точек (рис. 1, в).

Согласно работе [4] для классических методов измерений использование трёх сканеров считается оптимальным вариантом, однако в некоторых случаях имеет смысл использовать четыре сканера. Безрефлекторные измерения, осуществляемые при очень острых углах, практически оказываются бесполезными из-за больших погрешностей измерения.

Как отмечается в работе [5], согласно европейским стандартам максимально допустимое отклонение Δ стальной круговой трубы высотой H_d может быть определено по следующему выражению:

$$\Delta [\text{м}] = \frac{H_d [\text{м}]}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{H_d [\text{м}]}}. \quad (1)$$

В работе [5] приведены результаты измерений, проводимых с помощью тотальной станции LeicaTS 30 и лазерного сканера RieglVZ-400. Облако точек на поверхности объекта геометрически моделировалось по заранее определённой координатной системе. Графическая презентация (рис. 2) облака точек показывает, что с помощью лазерного сканера в течение очень короткого времени можно получить большое количество точек, в то время как с помощью тотальной станции в течение 1,5 ч удаётся осуществить не более 500 измерений. Для сравнения отметим, что

лазерный сканер в течение получаса позволяет измерить несколько миллионов точек.

Как отмечается в работе [5], среднеквадратичное отклонение каждого параметра, измеренного лазерным сканером, на порядок меньше, чем у тотальной станции, что объясняется довольно большим размером выборки у первого. Зависимость точности измерения лазерного сканера от размера выборки графически иллюстрируется на рис. 3.

Задача исследования в настоящей статье формулируется следующим образом. Допускаем наличие множества труб с высотой H_{di} , т. е. имеется множество

$$H = \{H_{di}\}; i = \overline{1, n}.$$

При этом рассматривается упорядоченное множество, где

$$H_{di} = H_{di-1} + \Delta H_d; \Delta H_d = \text{const}.$$

Условно считаем, что $H_{d0} = 0$.

Также допускается наличие упорядоченного множества

$$N = \{N_i\}; i = \overline{1, n}.$$

Условно приняв показатели H_{di} и N_i в качестве непрерывных переменных, введём в рассмотрение функциональную зависимость

$$H_d = H_d(N), \quad (2)$$

на которую налагается ограничение в виде

$$\int_{N_{\min}}^{N_{\max}} H_d(N) dN = C; C = \text{const}. \quad (3)$$

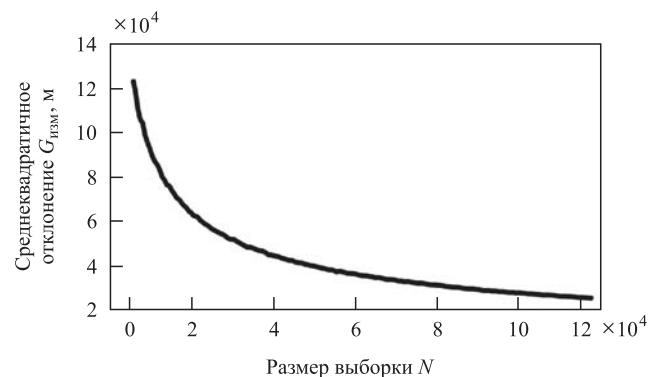


Рис. 3. Графическое представление зависимости среднеквадратичного отклонения измеряемых с помощью лазерных сканеров параметров от размера выборки [5]

Смысл ограничения (3) заключается в сужении класса дважды дифференцируемых функций до подкласса таких же функций, удовлетворяющих условию (3).

Требуется найти ответ на следующие вопросы: при каком виде функции (2) проводимые измерения с помощью лазерного сканера будут наиболее информативными и влияет ли форма кривой функциональной зависимости $\sigma_{\text{изм}} = \varphi(N)$, показанной на рис. 3, на достижимую информативность измерений?

Математическое решение указанных вопросов следующее. Количество чётко регистрируемых градаций m в измерительном сигнале определим как

$$m = \frac{H_d(N)}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{H_d(N)}}. \quad (4)$$

Количество информации, извлекаемой при измерении тепловой трубы высотой H_d , определим по формуле Шеннона

$$M_1 = N \log_2 \left[\frac{H_d(N)}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{H_d(N)}} \right]. \quad (5)$$

Интегрируя формулу (5) по всем N , получим (для упрощения выкладок принимаем, что $N_{\min} = 0$)

$$M_{\text{инт}} = \int_0^{N_{\max}} N \log_2 \left[\frac{H_d(N)}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{H_d(N)}} \right] dN. \quad (6)$$

С учётом выражений (3) и (6) сформируем задачу безусловной вариационной оптимизации. При этом целевой функционал F имеет вид

$$F = \int_0^{N_{\max}} N \log_2 \left[\frac{H_d(N)}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{H_d(N)}} \right] dN + \lambda \int_0^{N_{\max}} H_d(N) dN, \quad (7)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи по методу Эйлера—Лагранжа получено в виде

$$H_d(N) = \frac{N - \lambda_0 \ln 2}{2\lambda_0 \ln 2} + \sqrt{\frac{(N - \lambda_0 \ln 2)^2}{4\lambda_0^2 \ln 2} + \frac{25N}{\lambda_0 \ln 2}}, \quad (8)$$

где λ_0 — множитель Лагранжа, вычисляемый с учётом выражения производной интегранта в формуле (7) по $H_d(N)$ и условия (3).

Полученное решение (8) позволяет получить ответ на оба поставленных вопроса исследования. Как видно из выражения (8), H_d находится в прямой зависимости от N , и оптимальная функция не зависит от $\sigma_{\text{изм}}(N)$.

Обобщая изложенное, можно сделать следующее заключение. При проведении исследований наклона множества тепловых труб с различными высотами должна быть обеспечена прямо пропорциональная связь между величинами H_d (высота трубы) и N (количество измерений). Выбор оптимального типа связи между показателями H_d и N не зависит от среднеквадратичного отклонения результатов измерений, проводимых с помощью лазерных сканеров.

Библиографические ссылки

1. Xia Y., Zhang P., Ni Yi-G., Zhu H-P. Deformation monitoring of a super-tall structure using real-time strain data // Engineering Structures. 2014. Vol. 67. P. 29—38. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.02.009.
2. Barazzetti L., Previtali M., Roncoroni F. The use of terrestrial laser scanning techniques to evaluate industrial masonry chimney verticality // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W11. GEORES 2019-2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 8—10 May, 2019. Milan, Italy. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-173-2019> (дата обращения: 11.02.2019).
3. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close range photogrammetry. Principles, methods and applications, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, 2006. P. 87—88.
4. Lenda G., Uznanski A., Strach M., Lewinska P. Laser scanning in engineering surveying: methods of measurement and modeling of structures // Reports on Geodesy and Geoinformatics. 2016. Vol. 100. P. 109—130. DOI: 10.1515/rgg-2016-0010.
5. Marjetic A., Stebe G. Determining the non-verticality of tall chimneys using the laser scanning approach // TS1 — Monitoring of Civil Engineering Structures I. INGEO 2017 — 7th International Conference on Engineering Surveying Portugal, Lissabon. October 18—20, 2017.

Ссылка для цитирования

Годжаманов М.Г., Вердиев С.Б. Оценка информативности результатов лазерного сканирования при исследовании вертикальности тепловых труб энергетических объектов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 99—101. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-99-101.

М.С. Денисов, Г.А. Котов

(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

denisovmaxim90@mail.ru; kotov1999gosha@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА СЖИМАЕМОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для получения достоверных данных о свойствах жидкого металла и создания систем автоматизированного управления исследован технологический процесс литья с кристаллизацией под давлением.

Разработана математическая модель входных и выходных параметров процесса. Установлено, что сжимаемость расплава может выступать в качестве основного управляемого параметра, влияющего на физико-механические свойства конечных изделий.

Полученные отливки по данной технологии не уступают по своим физико-механическим свойствам произведённым ковкой или штамповкой.

Ключевые слова: сжимаемость; давление; математическая модель; кристаллизующийся металл; физико-механические свойства; система управления.

To obtain reliable data on the properties of liquid metal and create automated control systems, the technological process of molding with crystallization under pressure is studied. A mathematical model of the input and output process parameters is developed. It is established that the compressibility of the melt can represent the main controlled parameter influencing on the physical-mechanical properties of the final products. The obtained castings using this technology are not inferior in their physical and mechanical properties to those produced by forging or stamping.

Keywords: compressibility; pressure; mathematical model; crystallizing metal; physical-mechanical properties; control system.

Введение. Одной из ключевых проблем, возникающих в настоящее время в машиностроительной отрасли, является получение изделий с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В работе показано, что наложение давления на металл до начала кристаллизации способствует формированию заданных свойств отливок, что, в первую очередь, связано с уплотнением металла в местах микропор, микрорыхлот, а также с опрессовкой межзёренных границ [1].

Производство отливок методом литья с кристаллизацией под давлением отличается от других технологий экономичностью расхода металла, возможностью получения изделий с высокой точностью и с заданными физико-механическими свойствами. Кроме того, информатизация и автоматизация подобных технологических процессов позволяют добиться значительного уровня энергоэффективности производства.

В работах [2, 5, 7] показано, что в зависимости от величины и скорости наложения давления на кристаллизующийся металл можно получить разные сочетания физико-механических и структурных свойств алюминиевых сплавов. Исследование данного процесса позволяет подобрать оптимальные режимы

обработки отливок с учётом предъявляемых требований и исходя из условий эксплуатации повысить или улучшить структурные свойства, а также увеличить долговечность и износостойкость.

Решение поставленных задач становится возможным за счёт использования современных систем управления, способных с высокой точностью и производительностью получать информацию и вырабатывать управляющие воздействия на исполнительные механизмы.

В работе давление рассматривается как фактор, который, воздействуя на процесс кристаллизации вместе с такими параметрами, как концентрация легирующих элементов, температура и время, влияет на формирование физико-механических и структурных свойств отливки.

Объектом управления выступает процесс наложения давления на кристаллизующийся металл. Обработка кристаллизующегося металла давлением и управление процессом формирования свойств литых заготовок осуществляются на гидравлическом прессе для литья с кристаллизацией под давлением.

Для исследований используется широко применяемый в промышленности высокопрочный алюминиевый сплав В95.

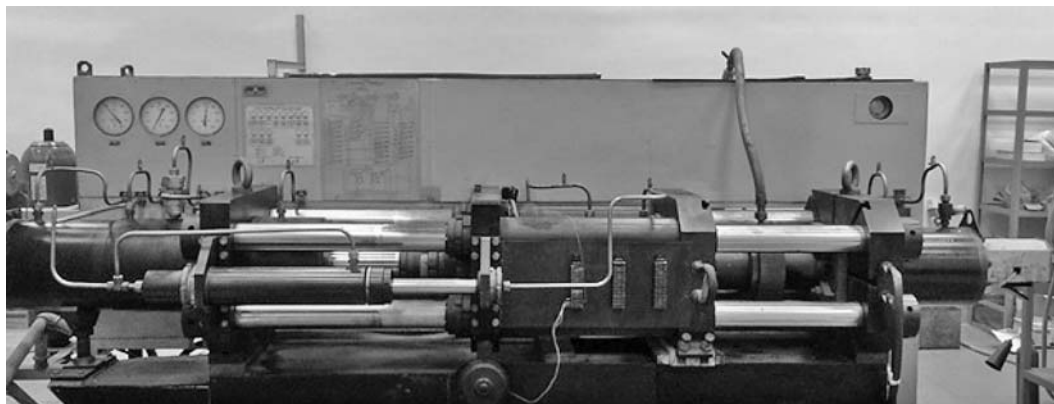


Рис. 1. Общий вид гидравлического пресса

Наложение давления на расплавленный металл до 500 МПа в сочетании с используемой системой управления позволяет изучить закономерности изменения внутреннего состояния расплавленного металла на молекулярном уровне и выявить методы управления данным процессом [3].

Экспериментальная установка. Отработка режимов наложения давления проводилась на горизонтальном гидравлическом прессе оригинальной конструкции ПЛД-300. Пресс представляет собой гидравлическую машину для литья с кристаллизацией под давлением с горизонтальным расположением основных силовых агрегатов (рис. 1).

Управление работой гидросистемы осуществляется в автоматизированном режиме от системы управления.

Пресс спроектирован и изготовлен как гидроагрегат, состоящий из четырёх гидроцилиндров, мультипликатора и клапана высокого давления.

Неподвижная плита пресса усилена подвижным блоком, в который входят две плиты, гильзы и встроенный гидроцилиндр, придающий необходимую жёсткость. Перемещение подвижного блока осуществляется по колоннам.

С помощью телескопических гидроцилиндров осуществляется подвод рабочей жидкости в подвижный блок. Гидросистема пресса разведена гнутыми патрубками из нержавеющей стали.

Технические характеристики пресса и основные параметры процесса приведены в таблице.

Разработана принципиальная электрическая схема (рис. 2), включающая электрогидравлические переключатели (P1...P11), обеспечивающие подачу рабочей жидкости в соответствующий гидроцилиндр или её слив.

Технические характеристики пресса и основные параметры процесса

№ п/п	Параметр	Значение
1	Температура заливки металла, °С	850
2	Начальная температура формы, °С	250
3	Давление на кристаллизующийся металл, МПа	100...500
4	Диаметр отливки, мм	90
5	Высота отливки, мм	70
6	Диаметр прессующих плунжеров, мм	30
7	Ход правого прессующего плунжера, мм	150
8	Ход левого прессующего плунжера, мм	125
9	Ход мультипликатора, мм	250
10	Усилие, прикладываемое к прессующим плунжерам, МН	0,3
11	Усилие запираения формы, МН	3
12	Ход плиты, необходимый для раскрытия формы, мм	250

Имеются фильтрующие элементы (Ф1 и Ф2), которые в случае образования засора сигнализируют об этом. В качестве шихты используется первичное сырьё.

Методика процесса. Выплавка металла проходит в муфельной печи сопротивления мощностью 9 кВт, в графитовом тигле под слоем флюса. По ходу плавки температура в печи контролируется платиновой платиновой термопарой с точностью ± 5 °С.

Процесс наложения давления осуществляется следующим образом: перед началом цикла левый прессующий плунжер установлен

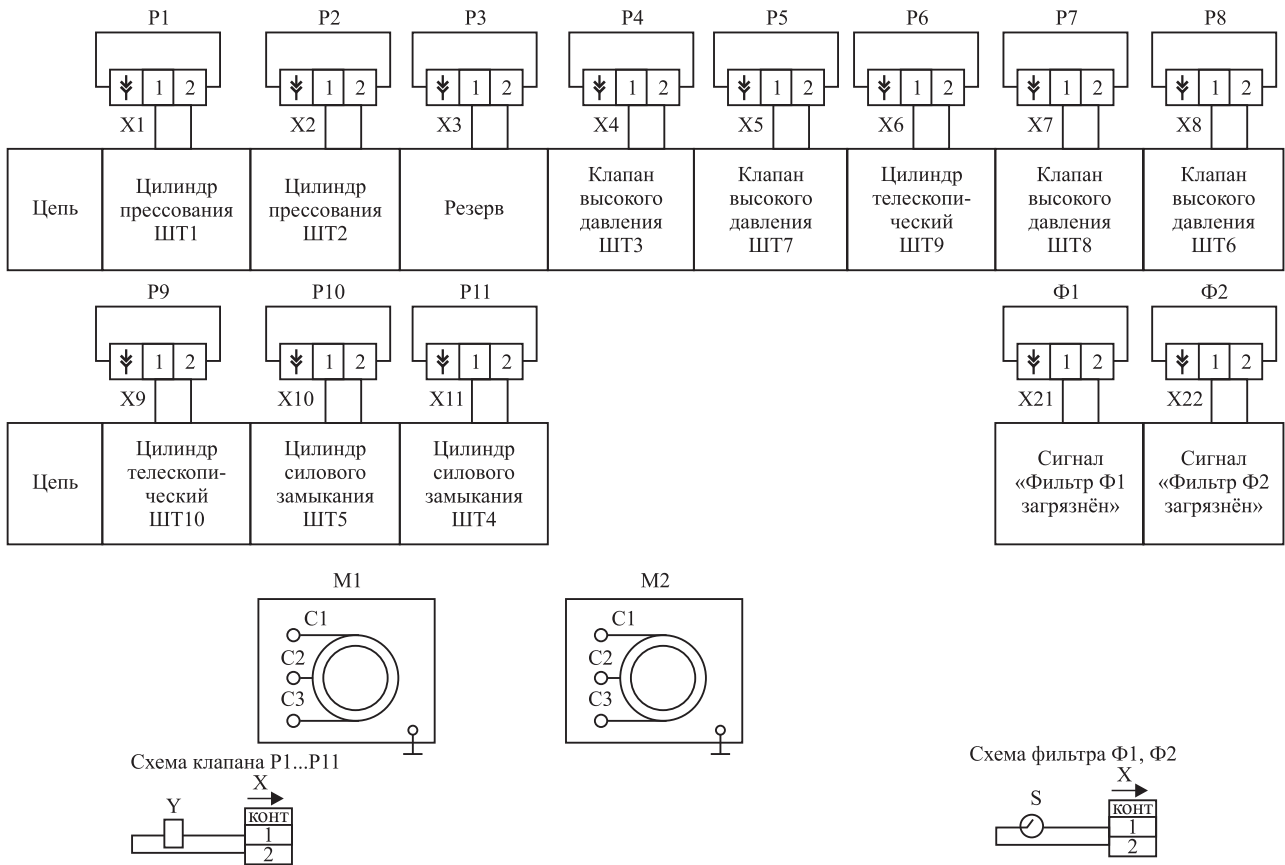


Рис. 2. Схема принципиальная электрическая

слева от вертикального отверстия заливочной чаши. На рабочую поверхность полости формы в раскрытом состоянии после прогрева до температуры $250 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ с помощью пульверизатора наносят слой графитсодержащей краски. Движением плиты левую матрицу приводят в контакт с правой матрицей.

Расплав перегревается до $850 \text{ }^\circ\text{C}$, счищается шлак, после чего наводится новый слой флюса. Рафинирующая термовременная обработка

расплава проводится в течение 15 мин. Перед заливкой металла полость формы вакуумируется. Расплавленный металл заданного химического состава мерной дозой с погрешностью $\pm 2 \%$ через заливочную чашу заливают в форму в течение 3...5 с. При движении левого прессующего плунжера заливочное отверстие перекрывается, а в полость формы запрессовывается объём металла, обеспечивающий подъём уровня металла до верхней точки формы, после чего своё движение начинает правый плунжер. Время движения плунжеров составляет 33...40 с.

Для понимания и представления формирования свойств процесса используется контрольно-измерительная система (КИС). Визуализация основных параметров процесса осуществляется в виде графиков. Обработка графиков позволяет представить развитие во времени процесса обработки кристаллизующегося металла давлением с учётом фактического перемещения прессующих плунжеров в миллиметрах (рис. 3) [4, 8, 10].

Обработка полученной информации позволила сделать следующие выводы. Сначала левый плунжер 1 (рис. 3) быстро, а затем с замедлением продвигается внутрь отливки, после чего остаётся в неизменном положении, так

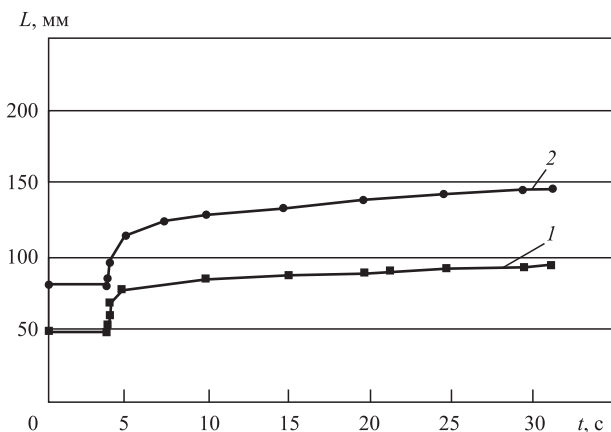


Рис. 3. Запись перемещения прессующих плунжеров 1 и 2 соответственно

как соответствующий поршень гидроцилиндра доходит до упора. Ход левого прессующего плунжера составляет 125 мм.

Правый плунжер 2 сначала быстро, а затем по экспоненте во времени (примерно 32 с) опрессовывает жидкий металл (его ход составляет 150 мм).

В свою очередь суммарное перемещение плунжеров 1 и 2 даёт возможность рассчитать объём запрессованного металла внутрь отливки (V_1). Располагая такой информацией, можно определить относительную сжимаемость:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где V_0 — общий объём металла, залитого в форму; V_1 — объём металла, запрессованного в отливку.

Справочная информация о технологическом процессе, формула (1) и графики 1 и 2 (см. рис. 3) позволяют составить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left(\frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \dots \right) + LV_{кр}\rho; \quad (2)$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{E}{V_0} \frac{dV}{d\tau}, \quad d_p = \varphi E; \quad (3)$$

$$M \frac{d^2 x}{d\tau^2} = F\Delta p - \lambda \frac{dx}{d\tau} - R; \quad (4)$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{E}{V} \left(K_y \Delta y l - F \frac{dz}{d\tau} \right); \quad (5)$$

$$Q = \mu y l \sqrt{2(p_h - p_1)}, \quad (6)$$

где t — температура; τ — время; x, y, z — координаты в объёме кристаллизующегося металла; L — скрытая теплота кристаллизации; ρ — плотность металла; M — масса подвижных частей гидроцилиндра; F — площадь поршня; λ — коэффициент трения в гидроприводе; R — сила, действующая на жидкий металл; p — давление; V — объём жидкого металла; K_y — коэффициент усилия регулятора давления; μ — коэффициент расхода регулятора; E — модуль упругости жидкости; l — перемещение регулирующего органа; p_h — давление на поршень гидроцилиндра; p_1 — противодействие в гидросистеме.

Уравнение (2) при условии описания граничных и начальных условий по экспериментальным данным может быть использовано для определения скорости кристаллизации $V_{кр}$. Уравнение (3) по измеренному относительному изменению объёма жидкого металла под давлением используется для расчёта мо-

дуля упругости жидкого металла φ . Уравнения (4)—(6) дают представление о работе гидросистемы в динамических режимах.

Влияние давления на сжимаемость. До настоящего момента в таких технологических процессах, как литьё под давлением, жидкая штамповка, литьё с кристаллизацией под давлением, возможность сближения атомов на практике не рассматривалась.

Предполагается, что наложение давления до некоторого критического уровня позволит расположить атомы по всему объёму отливки и в итоге даст возможность зафиксировать неподвижное, бесструктурное или аморфизированное состояние металла.

Давление накладывается на уровне 400...500 МПа с компенсацией усадки в пределах 10...12,5 % в течение 5...10 с при опрессовке заготовок из сплава В95 массой 2,8 кг. Потребная мощность гидропривода при этом составляет ~ 10 кВт. Это соответствует установленной мощности применяемого гидропривода, если принимать во внимание усреднённые величины. В переходных же процессах давление в рабочей полости гидроцилиндра изменяется по сложной зависимости.

Графики, характеризующие относительное изменение объёма жидкого металла и давления в зависимости от времени, представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 и 5 видно, что в течение первых 2...3 с относительное изменение объёма составляет ~ 10 %. В дальнейшем, примерно через 20 с и более ε достигает 12,5...13 %. В то же время объёмная усадка сплава в условиях обычной кристаллизации принимается равной 6...6,5 %. Выделим три характерных участка: ОА, АВ и ВС.

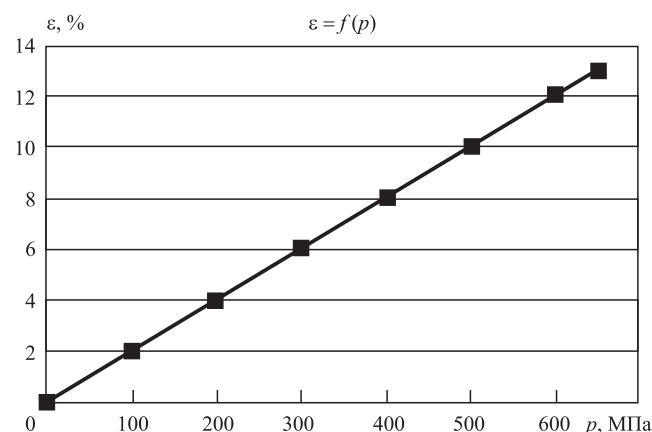


Рис. 4. Зависимость сжимаемости сплава от величины накладываемого давления:

ε — сжатие металла, %; p — давление в гидросистеме, МПа

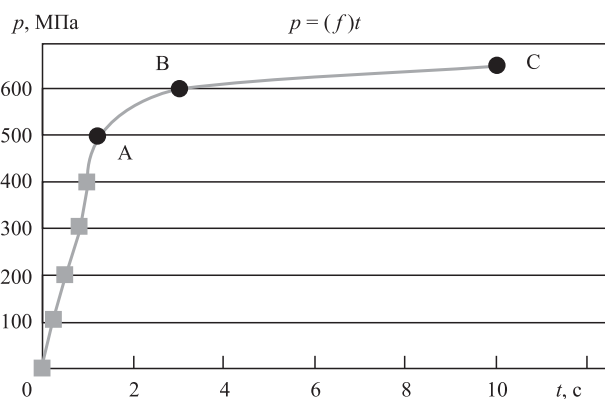


Рис. 5. Зависимость изменения давления во времени

Можно предположить, что на участке OA (см. рис. 5) происходит относительно быстрое сближение атомов, находящихся в жидком бесструктурном состоянии. Относительно лёгкое сближение атомов при $p < 100$ МПа и значительное (на 5...7 %) уменьшение объёма в определённой степени может быть связано со сжатием растворённых в металле газов. Возможно, что амплитуда колебаний атомов при этом настолько велика, что для их сближения больших внешних усилий не требуется. Поэтому применение даже сравнительно небольшого давления может дать значительный эффект повышения плотности металла.

На участке АВ динамика процесса сжимаемости расплава приобретает убывающий характер. Дальнейшее сближение атомов становится невозможным, как невозможно сближение геометрически правильных шаров. Если бы не было отвода теплоты, такое состояние могло бы оставаться неизменным. Оба участка характеризуют поведение жидкого металла под давлением как упругое сжатие пружины, которая после разгрузки восстанавливает форму и размеры.

Вероятно, причина в том, что в процессе последующей выдержки, если не снижать давление, движение плунжеров внутрь полости отливки продолжается так, что сжимаемость на участке ВС может составлять 2...3 %. Это означает, что если по какой-либо причине давление на металл не воздействует, в нём развиваются усадочные процессы, которые приведут к формированию скрытых и рассредоточенных дефектов в расположении атомов. Напротив, преодолевая сопротивление кристаллизующегося металла и запрессовывая дополнительные 2...3 % объёма, можно создать литой материал, плотность которого сопоставима с плотностью деформированного металла.

Коэффициент сжимаемости характеризует изменение объёма металла при наложении давления. Установлено (см. рис. 5), что процесс делится на две фазы: опрессовка жидкого металла и опрессовка кристаллизующегося металла.

В первой фазе давление на жидкий металл невысокое, после точки перегиба оно нарастает до ~ 400 МПа, и только при этом давлении возможна дальнейшая опрессовка. Время движения плунжеров составляет 20...23 с, суммарное пройденное расстояние прессующих плунжеров 100 мм.

Обращает на себя внимание тот факт, что за первые 2...3 с (точка перегиба) коэффициент $\varepsilon = 10$ %, что значительно выше объёмной усадки; за оставшееся время (за точкой перегиба) прирост составляет 2,3...2,4 %. Это объясняется тем, что за первые 2...3 с происходит сравнительно лёгкое сближение атомов на расстояние, соизмеримое с амплитудой колебания атомов относительно исходного положения. Дальнейшее уменьшение объёма металла связано с переходом атомов из жидкого состояния в твёрдое, сопровождаемое выделением скрытой теплоты кристаллизации, когда преодолеваемая сопротивление атомов, можно запрессовать дополнительный объём металла на формирование дополнительных межатомных связей.

В подтверждение данного предположения можно привести косвенные данные различных авторов [1, 6, 11] о том, что в момент перехода из жидкого состояния в твёрдое происходит скачкообразное уменьшение объёма. То есть в окрестности каждого атома, когда он входит в решётку кристалла, остаётся свободное пространство. Наложением давления сопротивление уже закристаллизовавшихся объёмов металла можно преодолеть, создавая тем самым условия для дополнительной «подпитки» жидкости, которая переходит в кристаллическое состояние.

С технологической точки зрения сжатое состояние может быть использовано для предельно возможного уплотнения металла и точного воспроизведения конфигурации и рельефа формы [12, 15].

Уместно отметить, что обработка кристаллизующегося металла давлением во всём объёме до настоящего времени в промышленности не применяется.

Задача управления наложением давления требует построения формализованной модели, которая устанавливает зависимость сжимаемости кристаллизующегося металла от величины накладываемого давления и скоро-

сти его наложения (рис. 4 и 5). Кривую $\varepsilon(\tau)$ на рис. 4 можно представить тремя уравнениями, где выходом системы является сжимаемость, а на входе давление:

$$\begin{cases} \varepsilon = kp(\tau), & 0 \leq \tau \leq t_1; \\ \varepsilon = k_1p(\tau) + b, & t_1 < \tau \leq t_2; \\ \varepsilon = k_2p(\tau), & t_2 < \tau \leq t_3, \end{cases} \quad (7)$$

где k, k_1, k_2 — коэффициенты модели; $p(\tau)$ — давление на участках OA, AB, BC; τ — текущее время; $0 - t_1, t_1 - t_2, t_2 - t_3$ — интервалы времени, характеризующие участки OA, AB, BC.

Можно предположить, что наложение давления до начала кристаллизации приводит к образованию более плотной структуры, в которой влияние таких дефектов, как растворённые газы, вакансии, дислокации и границы зёрен, сведено к минимуму. При этом формирование структуры на уровне межатомных взаимодействий, вероятно, в значительной степени связано с характером изменения давления. В условиях быстрого наложения давления в течение 2...3 с процессы диффузии и перераспределения атомов в соответствии с законами термодинамики пройти не успевают, в то время как на отрезке времени 20...30 с создаются условия для образования равновесных структур [9, 14].

Таким образом, изменяя скорость наложения давления, а также варьируя температурой расплава, его составом и скоростью охлаждения, можно изменять характер фазовых превращений и структурных изменений в широких пределах. Принципиальное значение при использовании давления приобретает тот факт, что управляя величиной и скоростью наложения давления, формирование структуры и свойств конечной продукции можно проводить на самой ранней стадии технологического процесса — в жидком расплаве до начала и в процессе кристаллизации [13].

Заключение. В соответствии с поставленными задачами разработана математическая модель процесса сжимаемости расплавленного металла в условиях наложения давления.

Доказано, что высокое качество готовой продукции при минимальных материальных и энергетических затратах возможно обеспечить за счёт автоматизации управления основными параметрами технологического процесса с использованием современных контрольно-измерительных систем и средств автоматизации, интегрированных в АСУ.

Библиографические ссылки

1. Пью Х.Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. Т. 1 / под ред. Е.Г. Понятовского. М.: Мир, 1973. 296 с.
2. Pastirčák R., Ščury J., Moravec J. The Effects of Pressure During the Crystallization on Properties of the AlSi12 Alloy // Archives of Foundry Engineering. Issue 3/2017. P. 103—106.
3. Коростелёв В.Ф., Хромова Л.П., Денисов М.С. Исследование зависимости свойств сплава В95 от величины давления, накладываемого на кристаллизующийся металл // Металловедение и термическая обработка. 2017. № 2. С. 13—18.
4. Арзамасов Б.Н., Мухина Г.Г. Материаловедение: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.
5. Бланк В.Д., Эстрин Э.И. Фазовые превращения в твёрдых телах при высоком давлении. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 412 с.
6. Коростелёв В.Ф., Хромова Л.П., Рассказчиков А.Н. Управление процессом кристаллизации сплава В95 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 8. С. 18—24.
7. Денисов М.С. Технология изготовления заготовок поршней ДВС с использованием адаптивной системы управления технологическим процессом. Новые материалы: материалы III междисциплинарной науч. форума с междунар. участием. Москва. 21—24 ноября 2017 г. / Сборник материалов. М.: ООО «Буки Веди», 2017. С. 679—684.
8. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // СТА. 2008. № 1. С. 89.
9. Поршнев С.В. MATLAB 7. Основы работы и программирования: учебник. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2006. 320 с.
10. Korostelev V.F., Denisov M.S. Crystallization of aluminium alloys under pressure. MISTAerospace 2018: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 450 (2018) 032012. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032012.
11. Denisov M.S. Modeling of Processes of Solidification of Metals under Conditions Imposing Pressure // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. P. 603—610.
12. Korostelev V.F., Denisov M.S., Bol'shakov A.E., Khieu C.V. Development of the Manufacture of Billets Based on High-Strength Aluminum Alloys // Russian Metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. No. 9. P. 691—695.
13. Denisov M.S. Effect of cooling rate on the crystallization of aluminum alloys under pressure // Materials Physics and Mechanics. 2019. No. 41. P. 88—90.
14. Korostelev V.F., Denisov M.S. Development of casting process for pressings of pistons of car augmented engines // Metal Science and Heat Treatment. 2017. Vol. 58. No. 9—10.
15. Korostelev V.F., Khromova L.P., Denisov M.S. Analysis of dependence of the properties of alloy V95 on the pressure applied to crystallizing metal // Metal Science and Heat Treatment. 2017. Vol. 59. No. 1—2.

Ссылка для цитирования

Денисов М.С., Котов Г.А. Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 102—107. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-102-107.

УДК 65.011.56; 62-82

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-108-111

А.В. Пузанов, канд. техн. наук, **О.О. Суворкина**, **Е.А. Ершов**
 (Специальное конструкторское бюро приборостроения и автоматики, г. Ковров)
 avp@oao-skbpa.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрен пример моделирования работоспособности шестерённого насоса в арктических условиях эксплуатации. Проведён анализ причин отказов штатной конструкции. Приведены результаты моделирования конструктивных элементов гидромашины в условиях воздействия низких температур. Проведена верификация работоспособности по результатам натурных климатических испытаний.

Ключевые слова: насос шестерённый; насосная установка; испытания насосов.

An example of modeling the gear pump operability under arctic operating conditions is considered. The failures causes analysis of the normal design is carried out. The results of modeling the structural elements of a hydraulic machine under conditions of low temperatures influence are considered. Verification of performance according to the results of full-scale climatic tests is carried out.

Keywords: gear pump; pumping unit; pump tests.

Геополитические интересы Российской Федерации определяют необходимость создания и обеспечения функционирования стационарных опорных баз в Арктике. Арктическая мобильная техника повышенной проходимости, как правило, оснащена гидравлическим приводом основного движения, а также гидравлическими системами вспомогательного и дополнительного оборудования (поворота, торможения, лебёдки, крана и т. п.).

Температурный режим работы гидросистемы в арктических условиях осложняется тем, что изменение температуры носит нестационарный характер и имеет большую разницу по абсолютной величине для узлов, расположенных с внешней стороны мобильной техники и внутри (около двигателей).

Прогрев рабочей жидкости гидросистемы реализуется электронагревательными элементами (ТЭН) и/или гидромашинами — включением на холостом ходу или с незначительной нагрузкой.

Гидромашины шестерённого типа среди устройств трансформации гидравлической энергии занимают лидирующие позиции вследствие простоты, высокой надёжности и ремонтнопригодности их конструкции. Естественно, что данный тип гидромашин имеет и ряд известных проблем: резкое снижение надёжности работы при эксплуатации на морозе, заклинивание при высоких температурах и др. [1, 2].

Как правило, именно этот тип насосов используется в мобильной технике для прогрева

рабочей жидкости и элементов гидросистемы до рабочих температур. По этой причине анализ устойчивости к воздействию перепада температур на работоспособность гидромашин шестерённого типа при их проектировании становится актуальной научно-технической задачей.

Конструктивно шестерённый насос состоит из корпуса 1, в котором вращаются две шестерни с осевыми и радиальными люфтами (рис. 1). Величина люфтов должна быть минимальной (для достижения эффекта маслонепроницаемости).

Сторона всасывания, обозначенная на рис. 1 светлым треугольником, соединена с ре-

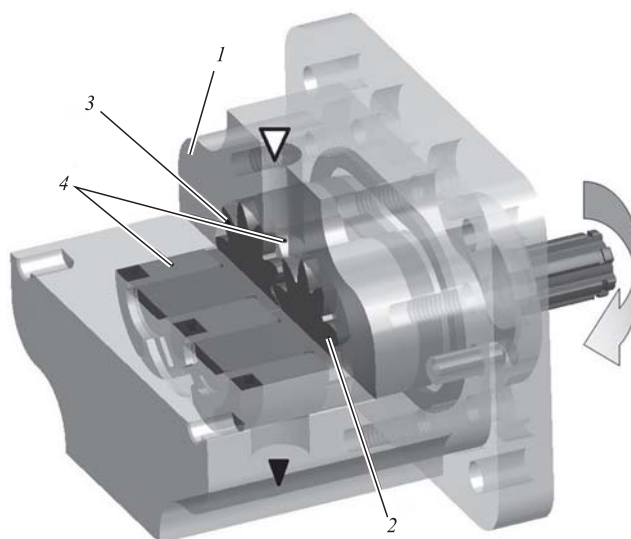


Рис. 1. Шестерённый насос внешнего зацепления

зервуаром, а сторона нагнетания (тёмный треугольник) — с гидросистемой.

Шестерня 2, соединённая с валом приводного двигателя, движется в направлении стрелки и захватывает шестерню 3, которая вращает её в противоположном направлении. При вращении шестерни расходятся, высвобождая впадины между зубьями.

Возникающее разряжение, действующее на поверхность жидкости в резервуаре, приводит к тому, что жидкость из резервуара поступает в насос.

Жидкость заполняет впадины между зубьями, поступая по мере движения в образованные шестернями и корпусом замкнутые камеры, после чего подаётся на сторону нагнетания.

На стороне нагнетания зубья снова вступают в зацепление, выталкивая жидкость из промежутков и препятствуя возврату жидкости из полости нагнетания в полость разрежения.

Для обеспечения наилучших трибомеханических характеристик сопряжённых пар трения в шестерённых гидромашинах используются детали из различных материалов (сталь, бронза или латунь, а также алюминий или чугун для корпусов). Поэтому при большой абсолютной величине изменения температур изменяются габаритные размеры деталей пропорционально коэффициентам линейного расширения используемых материалов, что приводит к увеличению деформаций и напряжений.

Поскольку надёжность изделия определяется по слабому звену, то искомая работоспособность гидромашин в целом будет определяться конструктивным узлом подшипника скольжения, а тот, в свою очередь, зазорами и контактными напряжениями ведущей и ведомой шестерни с подшипниковым узлом и корпусом насоса.

Наиболее популярным и простым решением использования насосного оборудования в условиях широкого диапазона изменения рабочих температур является увеличение зазоров сопряжённых деталей. Однако подобный способ приводит к нарушению маслонепроницаемости и резко снижает объёмный КПД.

Полученные в процессе исследования штатной конструкции результаты деформированного состояния конструкции шестерённой гидромашин, подверженной воздействию низких температур (рис. 2), выявили факт закусывания шестерён, а также ведомого и ведущего валов — в подшипниковых опорах [3]. Внешне это проявлялось в повышении потребляемой мощности приводного двигателя. Де-

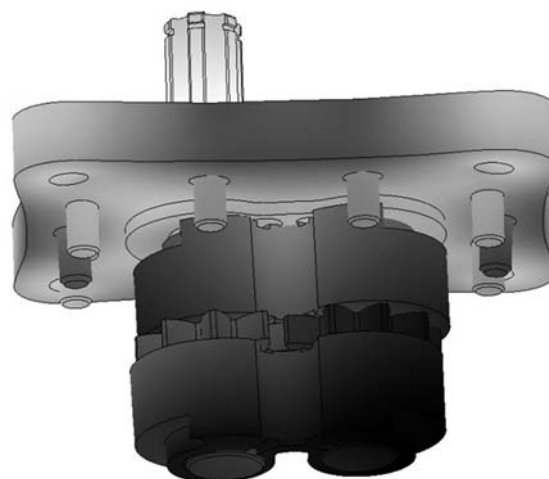


Рис. 2. Деформация насосного агрегата при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

фектация выявила контактное выкрашивание зубьев шестерён, трещинообразование и излом шеек валов, заминание шлицев.

Для конструктивной стабилизации деформации подшипниковых цапф шестерён и подшипников при воздействии перепада давления и температуры в них выполняются проточки, подводящие противодействие для компенсации искажений сопряжённых поверхностей. Форма и размеры этих пазов будет определять комфортность условий работы насоса и гидросистемы, их надёжность.

Для определения поля распределения давления рабочей жидкости во внутренних полостях и температурных полей в конструкции гидромашин, а также вызванное ими напряжённо-деформированное состояние конструктивных элементов были проведены расчёты в программном комплексе Autodesk Simulation Multiphysics.

В процессе анализа около 30 конструктивных и технологических вариантов доработки штатной конструкции подшипника (рис. 3, а), итоговый результат (рис. 3, б) был реализован за счёт:

введения проточки в плоскости, проходящей через отверстия под валы;

введения фаски со стороны шестерён для увеличения зоны высокого давления, а соответственно, и увеличения силы противоотжима;

введения 4 отверстий в зоне зацепления шестерён для уменьшения влияния зоны запертого объёма.

В процессе модельных исследований проведена оценка степени влияния каждого параметра на жёсткость и прочность всей конструкции шестерённой гидромашин. Картины распре-

деления давления по поверхностям базового и модернизированного вариантов конструкции подшипника представлены на рис. 4.

Критерий оптимального соотношения увеличения зазоров и снижения усилий прижима принят из рекомендаций по величине коэффициента прижима [1].

Прижимающая сила определяется из соотношения

$$F_{\text{пр}} = f_{\text{пр}} P = 9,37 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2) \cdot 20 (\text{МПа}) = 18\,740 (\text{Н}),$$

где $f_{\text{пр}}$ — площадь прижима; P — давление рабочей жидкости.

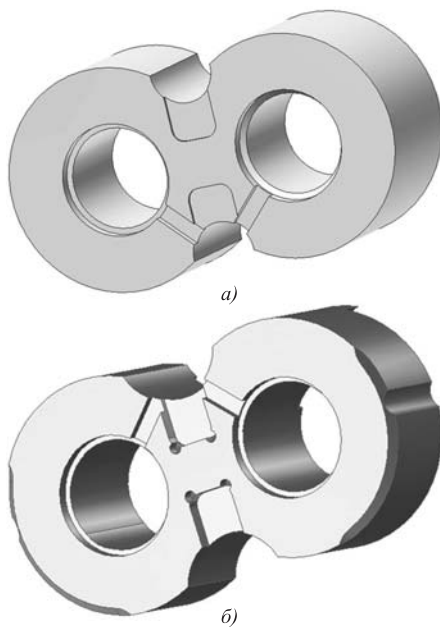


Рис. 3. Трёхмерные модели подшипников: *а* — первоначального; *б* — с доработками

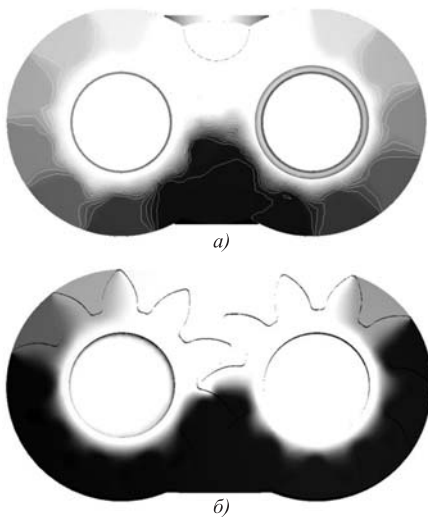


Рис. 4. Результаты расчётов подшипника: *а* — первоначального; *б* — с доработками

Суммарная отжимающая сила определяется из результатов CDF-анализа, используя функцию Wallcalculator (рис. 5).

Summary	

Total area,	10776.4, mm^2
TOTAL FX,	-546.373, Newton
TOTAL FY,	15231.1, Newton
TOTAL FZ,	575.774, Newton

Рис. 5. Результат расчёта операции Wallcalculator

Коэффициент прижима (соотношение отжимающей силы к прижимающей) в нашем случае составит

$$k_{\text{пр}} \frac{\sum F_{\text{отж}}}{F_{\text{пр}}} = \frac{575,77}{18\,740} \cdot 100 \% = 3,07 \%.$$

Таким образом, коэффициент прижима соответствует нижней границе значений для гидростатических подшипников (от 3 до 6 %) [1].

По сравнению со штатной конструкцией подшипникового узла коэффициент прижима снижен более чем в 10 раз. Температурная деформация сопряжённых поверхностей снижена на 38 %.

Благодаря проведённой модернизации удалось снизить торцевую деформацию (рис. 6) и контактные усилия (рис. 7).

Для проверки качества полученных результатов были проведены натурные испытания насосного оборудования при температуре окружающей среды, характерной для Арктики.

Испытания проведены на стенде, схема которого приведена на рис. 8.

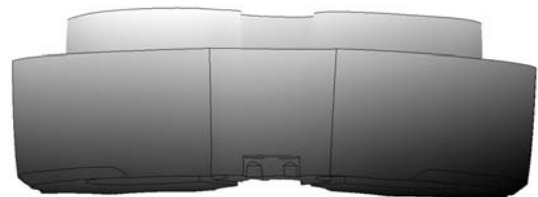


Рис. 6. Торцевая деформация подшипника

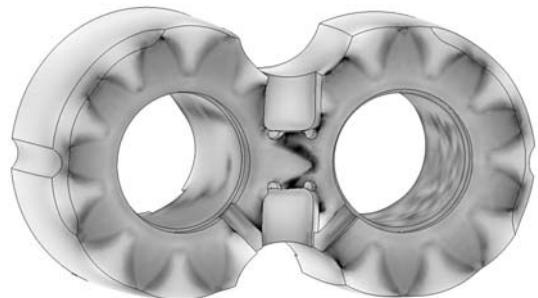


Рис. 7. Контактные усилия со стороны шестерён на подшипник

Параметры климатических испытаний насоса

Режим	Давление нагнетания рабочей жидкости, МПа (кгс/см ²)	Температура окружающей среды, °С	Расход рабочей жидкости, л/мин	Время контроля, мин	Потребляемая мощность, Вт
1	$1 \pm 0,3$ (10 ± 3)	-60	Не менее 2,0	$2,0 \pm 0,1$	Не контролируется
2	12_{-1} (120_{-10})	-60	Не менее 1,4	$0,5 \pm 0,05$	Не более 1200

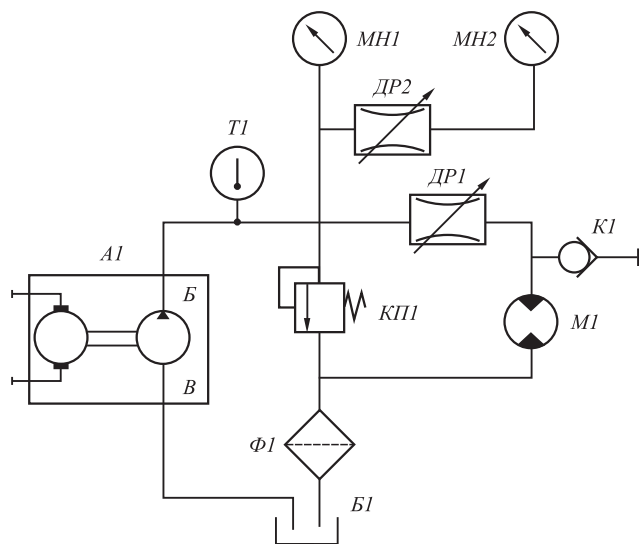


Рис. 8. Гидравлическая схема стенда для контроля параметров шестерённого насоса:

А1 — установка питающая; *В1* — гидробак, $V \geq 6$ л; *МН1* — манометр МТИ-1246-16 МПа (класс точности 1); *МН2* — манометр МТИ-1246-1,6 МПа (класс точности 1,5); *КП1* — клапан предохранительный, $Q = 10$ л/мин, $P = 16$ МПа (160 кгс/см²); *К1* — клапан для отбора проб ОСТ 3-3270, $P = 0,3$ МПа (3 кгс/см²); *М1* — гидромотор, $q \geq 9$ см³, $P = 16$ МПа (160 кгс/см²); *ДР1*, *ДР2* — гидродроссели регулируемые, $Q = 10$ л/мин; *Ф1* — фильтр с тонкостью фильтрации от 12 до 16 мкм, $Q \geq 10$ л/мин; *Т1* — термометр любого типа, диапазон температур от -60 до 100 °С, цена деления 2 °С; *В* — напорная магистраль; *Б* — всасывающая магистраль

В качестве рабочей жидкости использовано масло гидравлическое МГЕ-10А.

Порядок проведения испытаний: режим и контролируемые параметры отражены в таблице.

Насосное оборудование считают выдержавшим испытание, если в процессе и после испытаний их параметры соответствуют требованиям таблицы и оценочный балл стойкости покрытий по ГОСТ 9.407 не более А33, а по ГОСТ 9.311 не менее 8 [4].

По завершении проведения испытаний были получены удовлетворительные результаты, свидетельствующие о корректности сделанных предположений, использованных методик расчёта и качестве результатов моделирования и проектирования в целом.

Закключение. При изменении температуры деталей изменяются их габаритные размеры пропорционально коэффициентам линейного расширения используемых материалов и диапазону температур. Конструктивная доработка призвана повысить надёжность шестерённого насоса за счёт минимизации деформации от воздействия рабочего давления и перепада температур посредством баланса сил прижима-отжима и сил от температурного расширения материалов.

В результате модельных исследований около 30 конструктивных исполнений подшипникового узла шестерённого насоса предложен вариант с минимальным дисбалансом сил прижима-отжима при больших изменениях температуры окружающей среды.

Качественная оценка результатов моделирования была выполнена по данным климатических испытаний насосного оборудования, проведённых в гидролаборатории ОАО «СКБ ПА».

Полученные модели и алгоритмы были использованы при разработке других элементов гидравлического оборудования, применяемого в мобильной технике арктического исполнения.

Библиографические ссылки

1. Башта Т.М., Руднев С.М., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы: учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд. перер. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
2. Юдин Е.М. Шестерённые насосы. Основные параметры и их расчёт. М.: Машиностроение, 1964. 237 с.
3. Пузанов А.В. Использование Autodesk Simulation Multiphysics для исследования полей температур, напряжений и деформаций в конструкции шестерённого насоса // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 2. С. 31—36.
4. Технические условия «Установка питающая». Ковров: ОАО «СКБ ПА», 2016. 66 с.

Ссылка для цитирования

Пузанов А.В., Сукоркина О.О., Ершов Е.А. Моделирование работоспособности насосного оборудования в арктических условиях эксплуатации // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 108—111. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-108-111.

УДК 621.8

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-112-114

О.Г. Кокорева, канд. техн. наук, доц.

(Московская государственная академия водного транспорта, филиал Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, Московский авиационный институт — национальный исследовательский университет)

kokoreva_olga_2.11@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
НА МЕХАНИЗМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦА**

Рассмотрен процесс распространения пластических волн в образце на основе деформационной теории пластичности. Представлены результаты исследования распространения ударных волн напряжений в образце. Исследованы механические свойства образцов при динамическом нагружении на основе теории распространения волн деформаций и напряжений. Изучена кинематика процесса динамического деформирования образца.

Ключевые слова: теория пластичности; механические свойства; скорость распространения деформации; напряжения; фронты поперечной и продольной волн; импульсивное нагружение.

The process of plastic waves propagation in a sample based on the deformation theory of plasticity is considered. The research results of the stress shock waves propagation in a sample are considered. The mechanical properties of the samples under dynamic loading are studied on the basis of the propagation theory of deformation and stress waves. The process kinematics of the sample dynamic deformation is studied.

Keywords: plasticity theory; mechanical properties; strain propagation speed; stress; fronts of transverse and longitudinal waves; impulsive loading.

Исследование распространения пластических волн на основе различных теорий пластичности представляет определённый интерес. Следует отметить, что уравнения теории пластичности деформационного типа остаются достаточно точными и тогда, когда нагружение отличается от пропорционального. Рассмотрим процесс распространения пластических волн в образце на основе деформационной теории пластичности.

Известно, что многие материалы в условиях динамического воздействия ведут себя иначе, чем при статическом нагружении. Наиболее точные результаты при определении механических свойств материалов, испытывающих динамические нагрузки [1], получают на основе теории распространения волн деформаций и напряжений. Ниже представлены результаты исследования распространения ударных волн напряжения в деформированном образце, а также анализ динамических зависимостей между напряжениями и деформациями, учитывающих влияние скорости распространения деформации.

Известно, что при поперечном ударе по гибкой нити распространяются продольные и поперечные волны. Последовательность их распространения может быть различной в зависимости от механических свойств материала нити. Продольная волна в нити может опере-

жать поперечную, идти совместно с ней либо отставать. В образце возможны лишь два варианта последовательности распространения волн: фронты продольной и поперечной волн совпадают; передний фронт продольной волны опережает передний фронт поперечной волны [2].

Заметим, что все фронты волн определяются следующим образом:

$$(2\sigma_\theta - \sigma_r) \left[\sigma_r \left(\frac{\partial \omega}{\partial r_0} \right)^2 - \rho (\dot{\epsilon}_r + 1)^2 \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 \right] = 0, \quad (1)$$

где σ_θ — продольные напряжения; σ_r — радиальные напряжения; ω — угловая скорость ударной волны; r_0 — радиус-вектор ударной волны; ρ — радиус кривизны ударной волны; $\dot{\epsilon}_r$ — компонент вектора скорости; t — время.

Задний фронт поперечной волны не может двигаться позади заднего фронта продольной волны. Предположим, что задний фронт продольной волны отстаёт от заднего фронта поперечной волны. Тогда необходимо принять $\beta = 0$ в выражении для фронта продольной волны

$$\alpha \frac{\partial z}{\partial r_0} - \beta \frac{\partial r}{\partial r_0} = 0, \quad (2)$$

где α — угол наклона продольной волны; β — угол наклона поперечной волны; z, r — координаты.

Поскольку на заднем фронте продольной волны $\alpha \neq 0$ и $\frac{\partial z}{\partial r_0} \neq 0$, условие (2) при таком предположении не выполняется. Отсюда следует, что задние фронты пластических волн, распространяющихся в образце, должны совпадать. На совпадающих задних фронтах волн имеет место соотношение $\dot{\epsilon}_\theta = 0$ и, как следствие, $2\sigma_\theta - \sigma_r = 0$. Непосредственно за задним фронтом

$$\dot{\epsilon}_\theta = \dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_h = 0, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}_\theta$, $\dot{\epsilon}_r$, $\dot{\epsilon}_h$ — компоненты вектора скорости ударной волны.

Механизм деформирования образца. Деформированный образец представляет собой жёсткую оболочку вращения. Если динамическая диаграмма жёсткого пластического материала образца всюду обращена выпуклостью к оси напряжений, то процесс деформирования образца до начала взаимодействия пластических волн в центре образца можно представить следующим образом [3].

В начальный момент времени $t = 0$ к образцу прикладывается давление P . В месте заземления образца возникает скачок скорости нагружения ($\gamma \neq 0$, где γ — угол вектора скорости ударной волны), который распространяется относительно частиц образца с бесконечно большой скоростью. При времени $t > 0$ в месте заземления (а следовательно, по всему образцу) установится напряженное состояние, соответствующее началу текучести. При этом возникнут распространяющиеся к центру разрывы скоростей деформаций и кривизны образца с характеристическими скоростями. На заземлённом контуре образца и на фронте продольной пластической волны выполняется условие

$$2\sigma_\theta - \sigma_r = 0; \dot{\epsilon}_\theta = 0. \quad (4)$$

За время действия импульса t^* скорость деформации центральной части образца возрастает от нуля до некоторого значения V . В момент времени t^* снятия импульса оставшаяся плоской центральная часть образца продолжает движение вдоль оси OZ с постоянной скоростью V . В течение времени $t \leq t^*$ в месте заземления образца находятся задние (стационарные) фронты продольных и поперечных волн. Кинематика процесса деформирования мембраны при $t \leq t^*$ показана на рис. 1. При $t \geq t^*$ задние фронты пластических волн отходят от

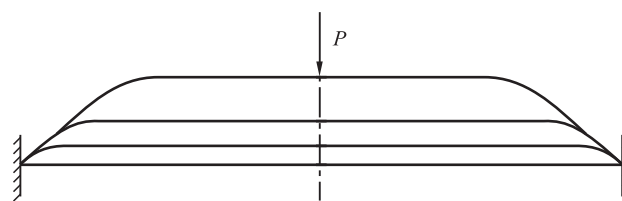


Рис. 1. Схема начальной стадии деформирования образца ($t \leq t^*$)

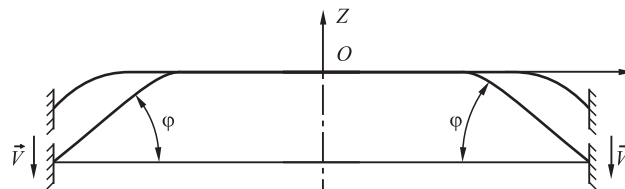


Рис. 2. Деформирование образца в обращённом движении

места заземления и начинают перемещаться к центру образца. За задними фронтами волн скорости деформации равны нулю, а образец представляет собой оболочку вращения, близкую к конической. Для объяснения последнего факта рассмотрим процесс деформирования образца в обращённом движении. Считаем, что с момента времени $t = t^*$ заземление образца движется с постоянной скоростью V в отрицательном направлении оси OZ (рис. 2), а центральная часть образца находится в покое. Со скоростью V будут двигаться и все точки образца, находящиеся позади задних фронтов волн. Задние фронты волн распространяются со скоростью C . Запишем для задних фронтов кинематическое соотношение:

$$\operatorname{tg} \varphi = V/C. \quad (5)$$

В случае когда $C = \text{const}$, оболочка будет конической. Из выражения (5) следует, что для данного материала угол φ определяется значением скорости перемещения V , приобретаемой образцом в период действия импульса. Зная механические свойства материала при импульсном нагружении и используя выражение (5), можно подсчитать скорость V (кинетическую энергию), которую необходимо сообщить образцу при импульсной обработке, чтобы получить оболочку вращения с заданным углом наклона φ образующей [4]. Разумеется, такой расчёт будет носить приближённый характер, так как во время деформирования может иметь место взаимодействие пластических волн, несколько изменяющее угол φ .

Характер нагружения образца. Круглая пластинка образца представляет собой плоскую деформируемую часть, нагруженную по

контуру в своей плоскости растягивающими радиальными напряжениями σ_r (рис. 3). Уравнения, описывающие деформацию такой пластинки, вытекают как частный случай из системы уравнений [1]

$$\frac{\partial^2 r}{\partial r_0^2} \frac{\partial r}{\partial r_0} + \frac{\partial^2 r}{\partial r_0^2} \frac{\partial z}{\partial r_0} - (\dot{\varepsilon}_r + 1) \frac{\partial \dot{\varepsilon}_r}{\partial r_0} = 0. \quad (6)$$

Рассмотрим условия нагружения материальной частицы, находящейся на плоской части образца, при прохождении через неё переднего фронта продольной пластической волны. Выполняется условие (4).

При переходе некоторой фиксированной частицы пластинки через фронт продольной вол-

ны условие (4) должно нарушиться. На рис. 4 точка *A* характеризует напряженное состояние частицы, находящейся на переднем фронте продольной волны. При этом вектор скорости течения материала, направленный по нормали к поверхности текучести, имеет компоненты $\dot{\varepsilon}_r = \dot{\varepsilon}_h, \dot{\varepsilon}_\theta = 0$. Точка *B* характеризует напряженное состояние частицы, находящейся позади переднего фронта продольной волны. В этом случае вектор скорости течения материала, по-прежнему направленный по нормали к поверхности текучести, будет иметь компоненты

$$\dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_h, \dot{\varepsilon}_\theta \neq 0. \quad (7)$$

Процесс динамического деформирования образца может протекать и в условиях пропорционального нагружения. Для этого требуется, чтобы передние фронты продольной и поперечной пластических волн совпадали, а все частицы образца смещались лишь в вертикальном направлении (по оси *OZ*). При этом для всех частиц образца, находящихся на волне, будут выполняться соотношения (4). Точки, изображающие напряженное состояние различных частиц образца, будут располагаться в этом случае на луче $\sigma_r = 2\sigma_\theta$ (см. рис. 4).

Таким образом:

теоретически исследован процесс распространения продольных и поперечных пластических волн в круглом, жёстко зашпелённом образце;

изучена кинематика процесса динамического деформирования образца;

представляется целесообразным исследовать влияние механических свойств материала на последовательность распространения в нём пластических волн.

Библиографические ссылки

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
2. Надеева Р.И. Об определении динамической зависимости между напряжениями и деформациями // Вестник МГУ. 1953. № 10.
3. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М.: Машиностроение, 1964.
4. Томас Т. Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М.: Мир, 1964.

Ссылка для цитирования

Кокорева О.Г. Влияние волновых процессов на механизм деформирования образца // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 112—114. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-112-114.

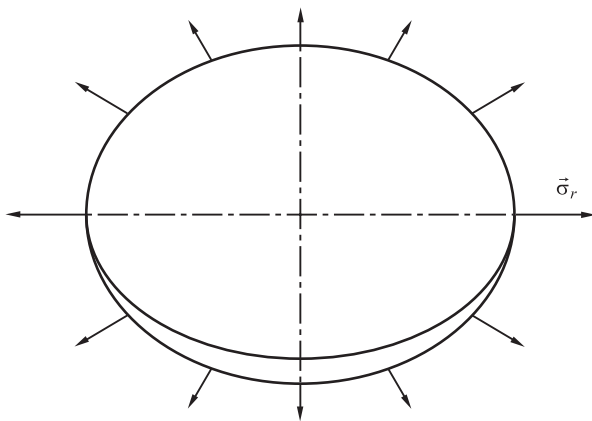


Рис. 3. Схема нагружения центральной части образца

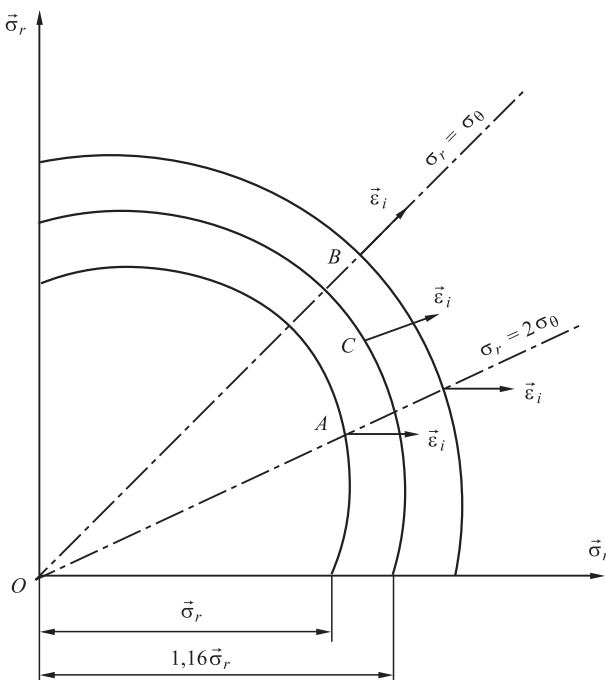


Рис. 4. Графическое представление напряжённого состояния частиц образца, находящихся на фронте (точка *A*) и за фронтом (точки *C*, *B*) продольной волны

УДК 681.582.8

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-115-117

Е.И. Воробьёв, д-р техн. наук, проф., **В.О. Дорофеев**
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва)

evgeniv36@mail.ru; skyfox.2016@mail.ru

КООРДИНАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ ДВУХ МАНИПУЛЯТОРОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ СОВМЕСТНО

Рассмотрена задача реализации относительных движений выходных звеньев двух манипуляторов, имеющих единую систему управления. Такая задача возникает при управлении двурукими роботами и автоматизации производства. Относительное движение выходных звеньев задаётся матрицей четвёртого порядка, отражающей взаимную ориентацию систем координат, связанных выходными звеньями, и относительные координаты начал этих систем координат. Манипуляторы имеют по три степени свободы, однако в относительном движении рабочих звеньев могут реализовать до шести степеней свободы. Получены решения обратных задач относительного движения и найдены выражения для обобщённых координат манипуляторов, принимаемых за управляющие переменные.

Ключевые слова: координация движений; манипулятор; двурукий робот; выходное звено; матрица относительного положения; обратная задача.

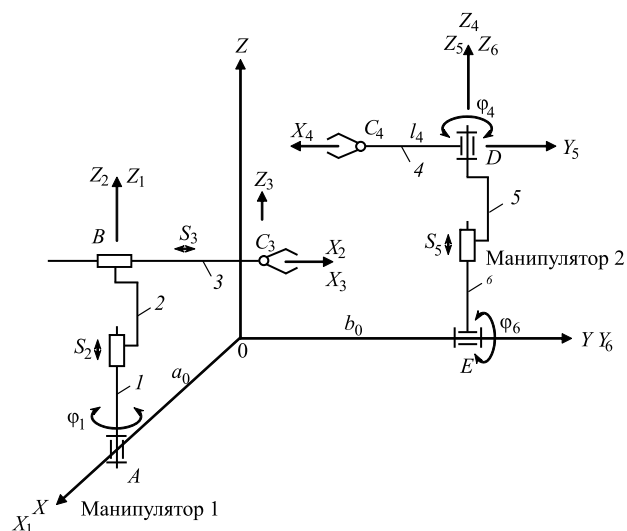
The problem of realizing the relative movements of the two manipulators output links having a single control system is considered. This problem arises at controlling two-armed robots and production automation. The relative motion of the output links is provided by a fourth-order matrix, which reflects the mutual orientation of the coordinate systems connected by the output links, and the relative coordinates of these coordinate systems origin. Manipulators have three degrees of freedom, but at the relative movement the working links can realize up to six degrees of freedom. The inverse problems solutions of relative motion are obtained and expressions for the manipulators generalized coordinates taken as control variables are found.

Keywords: coordination of movements; manipulator; two-handed robot; output link; relative position matrix; inverse problem.

Сложение двух и трёх движений широко используется в технологических системах. Однако развитие современных систем автоматизации и появление двуруких роботов требует развития теории механизмов относительного движения с числом степеней свободы от трёх до двенадцати. В работе [1] впервые дана классификация механизмов относительного манипулирования. В работе [2] рассмотрены вопросы анализа и синтеза устройств относительного манипулирования, построенных на основе механизмов параллельной структуры. В работах [3, 4] показаны особенности построения движений двуруких роботов и решена задача реализации заданного относительного движения двух твёрдых тел двуруким роботом.

Рассмотрим систему относительного манипулирования, состоящую из двух манипуляторов, со структурой ВПП—ВПВ, приведённую на рисунке, где «В» означает вращательная пара, а «П» — поступательная. Один манипулятор содержит две поступательные пары и одну вращательную, второй — одну поступательную и две вращательные. Обобщёнными координатами системы являются относитель-

ные перемещения соседних звеньев манипуляторов: $\varphi_1, S_2, S_3, \varphi_4, S_5, \varphi_6$. Задача координации движений манипуляторов заключается в реализации заданного относительного движения их выходных звеньев 3 и 4. Относительное положение звена 4 относительно звена 3 будем



Система относительного манипулирования, состоящая из двух манипуляторов

определять матрицей перехода \mathbf{M}_{34} от системы координат звена 4 $C_4X_4Y_4Z_4$ к системе координат $C_3X_3Y_3Z_3$. Эта матрица имеет вид

$$\mathbf{M}_{34} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & a \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & b \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Первые три столбца и строки представляют собой матрицу ориентации, четвёртый столбец — координаты начала системы; α_{ij} — направляющие косинусы системы $C_4X_4Y_4Z_4$ относительно системы $C_3X_3Y_3Z_3$; a , b , c — координаты точки C_4 начала системы $C_4X_4Y_4Z_4$ в системе координат $C_3X_3Y_3Z_3$.

В качестве управляющих функций в данном случае принимаем обобщённые координаты системы, которые подлежат определению при заданной матрице \mathbf{M}_{34} .

Для решения задачи со звеньями манипуляторов свяжем системы координат следующим образом.

Для первого манипулятора со звеном 1 свяжем систему координат $AX_1Y_1Z_1$, направив ось AX_1 по оси OX , а ось Z_1 по оси звена 1. Со звеном 2 свяжем систему координат $BX_2Y_2Z_2$, направив ось BZ_2 так же, как ось AZ_1 , а ось BX_2 параллельно направлению движения в паре B , со звеном 3 свяжем систему координат $C_3X_3Y_3Z_3$, направив ось CZ_3 параллельно оси Z_2 , а ось C_3X_3 параллельно направлению движения в паре B .

Для второго манипулятора со звеном 6 свяжем систему координат $EX_6Y_6Z_6$, направив ось EY_6 по оси OY , а EZ_6 по оси звена 6. Со звеном 5 свяжем систему координат $DX_5Y_5Z_5$, направив ось DZ_5 по оси EZ_6 , а ось DY_5 параллельно оси EY_6 . Со звеном 4 свяжем систему координат $C_4X_4Y_4Z_4$, направив ось DZ_4 параллельно оси EZ_5 , а ось C_4X_4 по оси звена 4.

Запишем матрицу положения системы $C_4X_4Y_4Z_4$ в системе координат $OXYZ$ через систему координат второго манипулятора. Ориентация системы $C_4X_4Y_4Z_4$ в системе $OXYZ$ определяется матрицей третьего порядка

$$\mathbf{L}_{04}^{(2)} = \mathbf{L}_{06}\mathbf{L}_{65}\mathbf{L}_{54}, \quad (2)$$

где \mathbf{L}_{i-1} — матрица поворота системы координат номер $i-1$ относительно системы номер i .

Запишем матрицу положения системы $C_4X_4Y_4Z_4$ в неподвижной системе координат $DXYZ$ через системы координат первого манипулятора. Ориентация системы $C_4X_4Y_4Z_4$ в системе $OXYZ$ определяется матрицей третьего порядка

$$\mathbf{L}_{04}^{(1)} = \mathbf{L}_{01}\mathbf{L}_{12}\mathbf{L}_{23}\mathbf{L}_{34} = \mathbf{L}_{03}\mathbf{L}_{34}, \quad (3)$$

где \mathbf{L}_{i-1} — матрица перехода от системы i к системе $i-1$; \mathbf{L}_{34} — матрица ориентации системы $C_4X_4Y_4Z_4$ относительно системы $OXYZ$,

$$\mathbf{L}_{03}^{(1)} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Перемножив матрицы ориентации, получим

$$\mathbf{L}_{04}^{(1)} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} \cos \varphi_1 - \alpha_{21} \sin \varphi_1 & \alpha_{12} \cos \varphi_1 - \alpha_{22} \sin \varphi_1 & \alpha_{13} \cos \varphi_1 - \alpha_{23} \sin \varphi_1 \\ \alpha_{12} \cos \varphi_1 - \alpha_{22} \sin \varphi_1 & \alpha_{12} \sin \varphi_1 + \alpha_{22} \cos \varphi_1 & \alpha_{13} \sin \varphi_1 + \alpha_{23} \cos \varphi_1 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Координаты точки C_4 в системе $OXYZ$ определяются матрицей

$$\mathbf{X}_{C4}^{(1)} = \begin{pmatrix} a_0 + S_3 \cos \varphi_1 \\ S_3 \sin \varphi_1 \\ S_2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Составим матрицу ориентации системы $C_4X_4Y_4Z_4$ относительно системы $OXYZ$ через системы координат второго манипулятора. Имеем

$$\mathbf{L}_{04} = \mathbf{L}_{06}\mathbf{L}_{65}\mathbf{L}_{54}, \quad (7)$$

где \mathbf{L}_{i-1} — матрица перехода третьего порядка от системы номер $i-1$ к системе номер i .

Подставляя выражения для матриц в выражение (7), получим

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{04}^{(2)} &= \\ &= \begin{pmatrix} \cos \varphi_6 & 0 & -\sin \varphi_6 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_6 & 0 & \cos \varphi_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 & 0 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \varphi_6 \cos \varphi_4 & -\cos \varphi_6 \sin \varphi_4 & -\sin \varphi_6 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 & 0 \\ \sin \varphi_6 \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_6 \sin \varphi_4 & \cos \varphi_6 \end{pmatrix}. \quad (8) \end{aligned}$$

Координаты точки C_4 в системе $OXYZ$, найденные через системы координат второго манипулятора:

$$\mathbf{X}_{C4}^{(2)} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_6 & 0 & -\sin \varphi_6 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_6 & 0 & \cos \varphi_6 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} l_4 \cos \varphi_4 \\ l_4 \sin \varphi_4 + b_0 \\ S_5 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} l_4 \cos \varphi_4 \cos \varphi_6 - S_5 \sin \varphi_6 \\ l_4 \sin \varphi_4 \\ l_4 \cos \varphi_4 \sin \varphi_6 + S_5 \cos \varphi_6 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Приравнивая соответствующие элементы матриц (5) и (8), (6) и (9), получим уравнения для определения обобщённых координат манипуляторов, откуда

$$\varphi_6 = \arccos \alpha_{33};$$

$$\varphi_4 = \arctg \left(\frac{\alpha_{32}}{\alpha_{31}} \right);$$

$$\alpha_{13} \sin \varphi_1 + \alpha_{23} \cos \varphi_1 = 0.$$

Используя эти выражения, получим

$$\varphi_1 = \arctg \left(-\frac{\alpha_{23}}{\alpha_{13}} \right);$$

$$S_3 = \frac{l_4 \sin \varphi_4 + b_0}{\sin \varphi_1}.$$

Имеем

$$a_0 + S_3 \cos \varphi_1 = l_4 \cos \varphi_4 \cos \varphi_6 - S_5 \sin \varphi_6,$$

откуда

$$S_5 = \frac{l_4 \cos \varphi_4 \cos \varphi_6 - a_0 - S_3 \cos \varphi_1}{\sin \varphi_6};$$

$$S_2 = l_4 \cos \varphi_4 \sin \varphi_6 + S_5 \cos \varphi_6.$$

Реализуя обобщённые координаты манипуляторов в соответствии с полученными выражениями, получим относительные движения их выходных звеньев согласно заданной матрице \mathbf{M}_{04} .

Выводы. С помощью двух манипуляторов, каждый из которых имеет три степени свободы, можно осуществить заданное относительное движение их выходных звеньев как твёрдых тел с шестью степенями свободы. Для осуществления данного относительного движения выходных звеньев число вращательных пар у обоих манипуляторов должно быть не менее трёх. Полученные в статье выражения для управляемых обобщённых координат манипуляторов позволяют обеспечить координацию движения их выходных звеньев по трём угловым и трём линейным координатам.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 19-08-00775.

Библиографические ссылки

1. Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Терехова Ф.Н., Ву Нгок Биг. Об особенностях устройств относительного манипулирования // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2007. № 2. С. 77—85.
2. Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Шалюхин К.А., Данилин П.О. К анализу и классификации устройств относительного манипулирования // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2009. № 4. С. 81—85.
3. Воробьёв Е.И. Осуществление заданного относительного движения двух твёрдых тел двуруким роботом // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 2019. № 2. С. 122—128.
4. Воробьёв Е.И., Хатунцев Д.И. Двурукие роботы. Особенности построения алгоритмов управления движением // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 3. С. 19—23.

Ссылка для цитирования

Воробьёв Е.И., Дорофеев В.О. Координация движений двух манипуляторов, функционирующих совместно // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 115—117. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-115-117.

Уважаемые читатели!

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

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 697.9

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-118-122

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева**, канд. экон. наук, доц., **Э.Л. Ларшина**
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit

СИСТЕМА ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Представлена система очистки воздуха на основе использования специализированной каталитической засыпки, предназначенная для снижения высоких концентраций сероводорода и летучих органических соединений. Система представляет собой 20- или 40-футовый утеплённый морской контейнер, в котором расположены два блока каталитической засыпки: один — рабочий, другой — резервный. Каждый блок содержит одну ступень очистки со специализированной железистой засыпкой.

Ключевые слова: система; блок; концентрация; очистка; воздух; технические характеристики.

An air purification system based on the use of specialized catalytic filling, designed to reduce high concentrations of hydrogen sulfide and volatile organic compounds is represented. The system is a 20 or 40 foot heated sea container in which two catalytic charge units are located: one is a working and the other is a reserve. Each block contains one cleaning step with a specialized ferrous charge.

Key words: system; block; concentration; cleaning; air; technical specifications.

Качество воздуха, которым мы дышим, влияет на наше здоровье и на все живые микроорганизмы. В настоящее время невозможно представить нашу жизнь без систем, установок и приборов по очистке воздуха. Система предварительной очистки воздуха (СПОВ) предназначена для снижения высоких концентраций сероводорода и летучих органических соединений на основе использования специализированной каталитической засыпки ВК-28.

СПОВ представляет собой 20- или 40-футовый утеплённый морской контейнер, в котором расположены два блока каталитической засыпки: один — рабочий, другой — резервный. Каждый блок содержит одну ступень очистки со специализированной железистой засыпкой. Установка не имеет собственного вентилятора и подключается к действующей системе вентиляции либо устанавливается перед входом в установку ВЕНТЛИТ [1—5].

К работе с СПОВ допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомленные с системой СПОВ и правилами её эксплуатации. На работу системы СПОВ распространяются все требования по технике безопасности при эксплуатации электрооборудования, питание которого осуществляется напряжением 380 В частотой 50/60 Гц [6]. Корпусы канального нагревателя, канального вентилятора и шкафа управления должны быть надёжно заземлены.

Технические характеристики СПОВ

Присоединительные размеры, мм:	
вход	250
выход	250
Условное давление блока каталитической засыпки	Разрежение
Транспортные габариты, длина × ширина × высота, мм	6099 × 2438 × 2591
Общие габариты, длина × ширина × высота, мм	6099 × 3323 × 2591
Число резервных блоков очистки	1 (100%-ное резервирование)
Масса брутто, кг, не более	6000
Материал блока каталитической засыпки	Коррозионно-стойкая сталь
Степень пыле- и влагозащищённости (ПВЗ)	IP 54/IP65 (IP65 — степень ПВЗ частей и элементов системы, контактирующих с очищаемым воздухом)
Варианты исполнения камеры (по потоку воздуха)	Пульт слева Пульт справа (зеркальное)
Максимальный расход воздуха, м ³ /ч	500
Масса каталитической засыпки рабочего или резервного блоков, кг	750
Тип каталитической засыпки	ВК-28
Масса сорбционно-каталитической засыпки, кг	200
Тип сорбционно-каталитической засыпки	JACOBI AddSorb VA12
Номинальные потери напора на установке, Па	600
Число датчиков сероводорода (загазованности помещения)	1
Число дифманометров	2 (по одному на рабочий и резервный блоки)

*Система поддержания температуры
в холодный период эксплуатации*

Тип приточного вентилятора	«Титан» ВК-200
Размещение вентилятора.	Корпус установки
Максимальная мощность вентилятора, кВт	0,140
Тип канального нагревателя.	ЭНК-200/2.0
Максимальная мощность канального нагревателя, кВт	2

*Система переключения подачи грязного воздуха
между рабочим и резервным блоками очистки воздуха*

Тип шиберной задвижки.	ОЗ-250
Число шиберных задвижек	12

Вентилятор выброса воздуха из системы очистки

Число вентиляторов	1
Размещение	Внутри установки
Максимальная мощность, кВт	0,55
Тип вентилятора	ВКПН 50-25-2D-2,5 ВК1
Исполнение корпуса	Взрывозащищённое коррозионно-стойкое

Система контроля загазованности зоны обслуживания

Тип датчика.	«Сенсон-СВ-Н2S»
Аварийная сигнализация	Звуковой оповещатель «Маяк-24-3М»

Пульт управления (внешний)

Габаритные размеры, длина × ширина × высота, мм	760 × 600 × 200
Масса, кг, не более	17
Материал корпуса	Коррозионно-стойкая сталь
Степень пыле- и влагозащищённости.	IP 54
Панель оператора	Кнопочная

Электропотребление

Напряжение питания, В	380 ± 38
---------------------------------	----------

Частота питающего напряжения, Гц.	50
Максимальная потребляемая мощность, кВт, не более	4,2

Внутреннее освещение

Тип светильника	LC-NK01-10W
Потребляемая мощность, Вт	10
Напряжение питания, В	220
Степень пыле- и влагозащищённости.	IP 54
Корпус.	Металлический (антивандалный)

Срок службы, ч	50 000
--------------------------	--------

Звуковой оповещатель

Тип звукового оповещателя.	«Маяк-24-3М» (ООО «Электроника и автоматика»)
Напряжение питания постоянного тока, В.	24
Номинальный ток потребления, мА	20
Уровень звукового давления, дБ, не менее	105
Степень пыле- и влагозащищённости.	IP 56
Диапазон рабочих температур, °С	-50...+55
Относительная влажность воздуха при +25 °С, %, не более	95

Условия эксплуатации

Климатическое исполнение	У1 (уличное исполнение)
Температура обрабатываемого воздуха, °С	+5...+40
Относительная влажность обрабатываемого воздуха при 25 °С, %, не более	100
Температура окружающего воздуха, °С	-45...+40
Относительная влажность при 25 °С, %, не более.	98

СПОВ представлена на рис. 1. Она состоит из контейнера 1, шкафа управления 2, трубо-

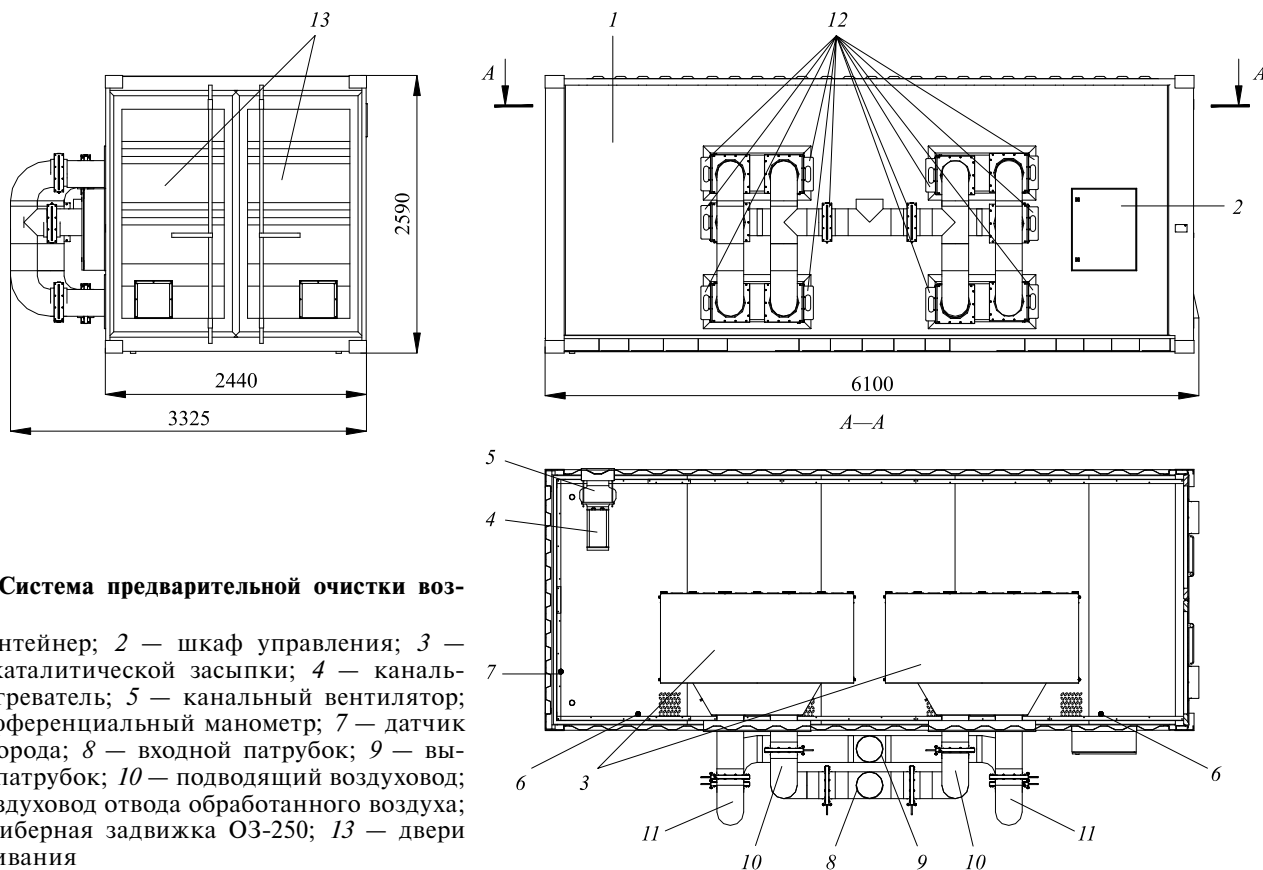


Рис. 1. Система предварительной очистки воздуха:

1 — контейнер; 2 — шкаф управления; 3 — блоки каталитической засыпки; 4 — канальный нагреватель; 5 — канальный вентилятор; 6 — дифференциальный манометр; 7 — датчик сероводорода; 8 — входной патрубок; 9 — выходной патрубок; 10 — подводящий воздуховод; 11 — воздуховод отвода обработанного воздуха; 12 — шиберная задвижка ОЗ-250; 13 — двери обслуживания

проводов подвода загрязнённого 10 и отвода очищенного 11 воздуха.

Шкаф управления, установленный с внешней стороны контейнера, предназначен для управления электрическим оборудованием системы и контроля технологических параметров его работы.

Подача очищаемого воздуха осуществляется по воздуховоду, который подсоединяется к входному патрубку 8. Воздух поступает в контейнер 1 по подводящему воздуховоду 10, проходит через блок 3, в котором размещена сорбционно-каталитическая засыпка. Она сорбирует взвешенные вещества и различные химические загрязнения, находящиеся в воздухе; на поверхности засыпки происходят реакции их окисления. Пройдя через блок каталитической засыпки, предварительно очищенный воздух через отводящий воздуховод 11 и выходной патрубков 9 поступает в воздуховод, по которому направляется в промышленный комплекс очистки воздуха ВЕНТЛИТ.

В контейнере 1 установлены два блока каталитической засыпки, один из которых является резервным. С помощью шиберных задвижек 12, установленных в подводящем 10 и отводящем 11 воздуховодах, осуществляется переключение подачи обрабатываемого воздуха между рабочим и резервным блоками каталитической засыпки.

Для определения степени загрязнения каталитической засыпки в контейнере 1 установлены два дифференциальных манометра 6.

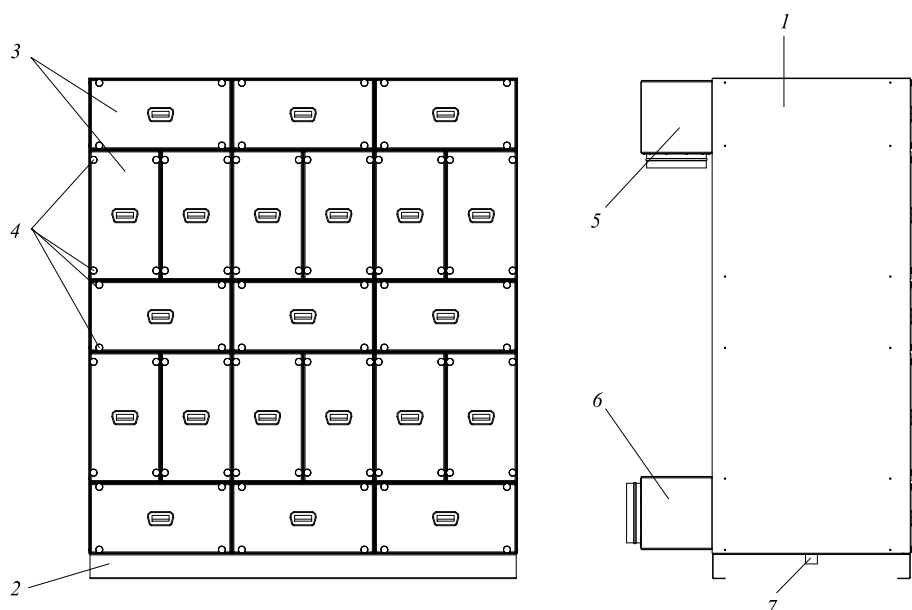


Рис. 2. Блок каталитической засыпки:

1 — каркас; 2 — швеллер; 3 — люки; 4 — ручки; 5 — входной диффузор; 6 — выходной конфузор; 7 — дренажный патрубок

Контроль загазованности зоны обслуживания внутри контейнера 1 осуществляется с помощью датчика сероводорода 7. В случае повышения концентрации сероводорода в контейнере выше допустимой на двери шкафа управления загорается световой индикатор 6 «АВАРИЯ H_2S » и включается сирена звукового оповещателя 26 (см. рис. 4), установленного в нижней части шкафа управления.

Для поддержания оптимальной температуры внутри контейнера в холодный период эксплуатации СПОВ контейнер оборудован системой климатического контроля, состоящей из термостата, канального вентилятора 5 и канального нагревателя 4. Термостат, установленный внутри контейнера, предназначен для регулирования работы канального вентилятора, осуществляющего принудительный забор воздуха из окружающей среды и подачу его в контейнер. Воздух, подаваемый с помощью канального вентилятора, проходит через канальный нагреватель 4 и нагревается до требуемой температуры.

Для обслуживания СПОВ предусмотрены двери обслуживания 13. Они должны быть закрыты во время работы системы. Для удобства обслуживания СПОВ внутри контейнера 1 установлены светодиодные светильники.

Блок каталитической засыпки показан на рис. 2 и представляет собой каркасную конструкцию 1, которая устанавливается на двух швеллерах 2. Каркас 1 разбит на секции для размещения каталитической засыпки. Секции закрываются специальными люками 3, через которые осуществляется загрузка и выгрузка каталитической засыпки. Люки закреплены с помощью прижимных ручек 4. Подводящие воздуховоды СПОВ подключаются к входному диффузору 5 блока каталитической засыпки, а отводящие воздуховоды — к выходному конфузору 6. Для отвода конденсата, образующегося во время очистки воздуха, в нижней части блока каталитической засыпки установлен дренажный патрубок 7. Дренажный патрубок должен быть подключен к дренажной системе или канализации.

Шиберная задвижка представлена на рис. 3. Она состоит

Шиберная задвижка представлена на рис. 3. Она состоит

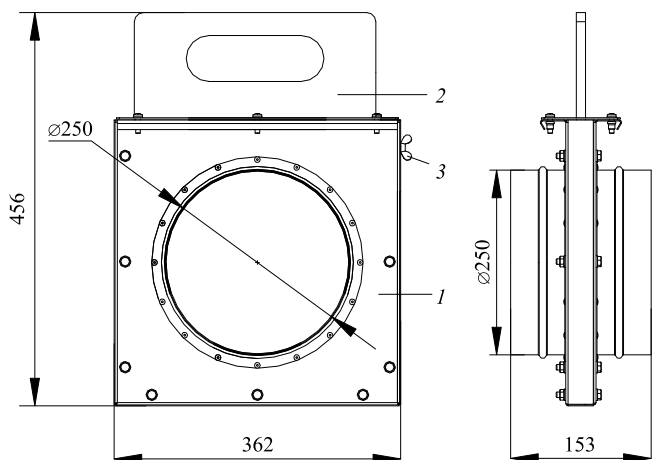


Рис. 3. Шиберная задвижка:
1 — корпус; 2 — заслонка; 3 — винт

из корпуса 1, который устанавливается в воздуховоде СПОВ, и выдвижной заслонки 2. Перекрытие и/или регулирование потока воздуха осуществляется с помощью выдвижной заслонки 2, которая фиксируется в нужном положении винтом 3.

Шкаф управления представлен на рис. 4, он состоит из корпуса 1, на боковой панели которого установлен главный выключатель 11, предназначенный для включения или выключения оборудования СПОВ.

Внутри шкафа установлена монтажная панель 14, на которой размещены элементы управления и контроля работы оборудования СПОВ силовой коммутации.

Контроль температуры внутри шкафа управления осуществляется с помощью тер-

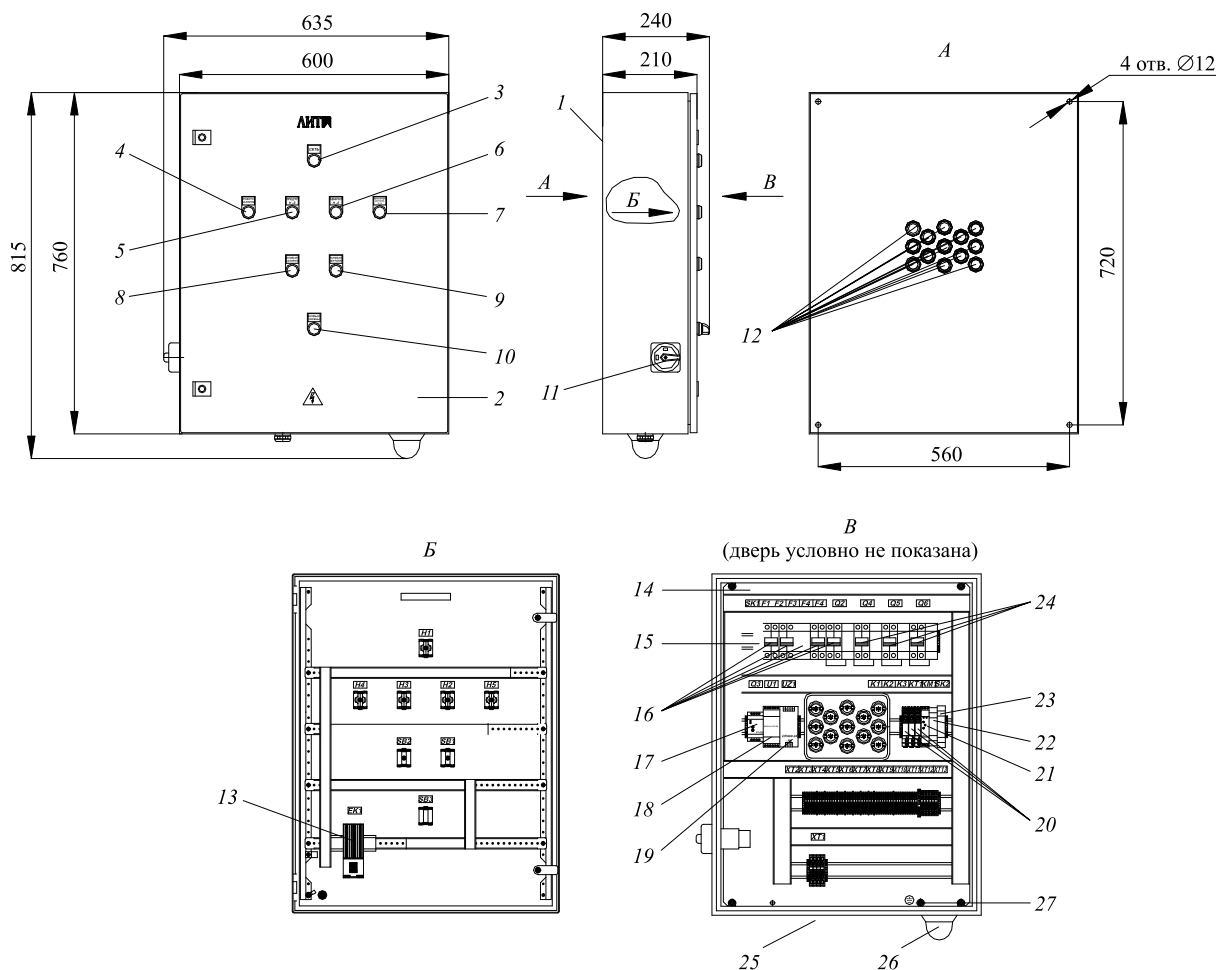


Рис. 4. Шкаф управления:

1 — корпус; 2 — дверь; 3 — световой индикатор «СЕТЬ» (зелёный); 4 — световой индикатор «РАБОТА КАЛОРИФ» (зелёный); 5 — световой индикатор «ПРЕДУП H_2S » (жёлтый); 6 — световой индикатор «АВАРИЯ H_2S » (красный); 7 — световой индикатор «НЕИСПРАВН ДАТЧИКА H_2S » (красный); 8 — кнопка «ВКЛ/ВЫКЛ КАЛОРИФ»; 9 — кнопка «ВКЛ/ВЫКЛ ВЕНТИЛЯТ»; 10 — переключатель «ВКЛ/ВЫКЛ СИРЕНА»; 11 — главный выключатель; 12 — кабельные вводы; 13 — нагреватель; 14 — монтажная панель; 15 — термостат; 16 — автоматический выключатель; 17 — регулятор температуры; 18 — барьер искробезопасности; 19 — источник питания; 20 — модуль релейного интерфейса; 21 — реле времени (циклическое); 22 — контактор; 23 — термостат канального нагревателя; 24 — дифференциальный выключатель; 25 — гермоввод; 26 — звуковой оповещатель; 27 — шпилька заземления

мостата 15. Нагреватель 13 предназначен для предотвращения появления конденсата на элементах электрического оборудования в шкафу управления. При температуре внутри шкафа управления ниже +12 °С происходит включение нагревателя. Нагреватель выключается при температуре внутри шкафа выше +17 °С.

На двери шкафа управления расположены следующие элементы управления и сигнализации: сигнальная лампа «СЕТЬ» (зелёная) 3 — сигнализирует о подаче сетевого питания на шкаф управления; сигнальная лампа «РАБОТА КАЛОРИФ» (зелёная) 4 — сигнализирует о подаче питания на каналный нагреватель; сигнальная лампа «ПРЕДУП H_2S » (жёлтая) 5 — сигнализирует о повышении показаний датчика сероводорода выше 30 мг/м³ (базовая настройка); сигнальная лампа «АВАРИЯ H_2S » (красная) 6 — сигнализирует о повышении показаний датчика сероводорода выше 75 мг/м³ (базовая настройка); сигнальная лампа НЕИСПРАВН ДАТЧИКА H_2S » (красная) 7 — сигнализирует о неисправности датчика сероводорода; кнопка «ВКЛ/ВЫКЛ КАЛОРИФ» включения/выключения каналного нагревателя 8; кнопка «ВКЛ/ВЫКЛ ВЕНТИЛЯТ» включения/выключения каналного вентилятора 9; переключатель «ВКЛ/ВЫКЛ СИРЕНЬ» для включения/выключения звукового оповещателя 10.

В нижней части шкафа управления установлен гермоввод 25 для подвода кабеля питания. Отвод кабелей из шкафа управления осуществляется через кабельные вводы 12, установленные на задней панели шкафа управления.

Звуковой оповещатель 26 предназначен для звуковой сигнализации в случае превышения установленных показаний датчика сероводорода или в случае его неисправности. Для заземления шкафа управления предусмотрены шпильки заземления 27.

Система должна быть собрана и смонтирована в соответствии с проектом и/или проектным решением. Перед вводом системы в эксплуатацию необходимо засыпать каталитическую засыпку в секции блока каталитической засыпки. Толщина слоя засыпки в одной секции должна составлять 540 мм. Для ввода системы в работу необходимо закрыть двери обслуживания, установить шиберные задвижки 12 (см. рис. 1) в необходимое (рабочее) положение, включить главный выключатель шкафа управления, включить

каналный нагреватель и каналный вентилятор, нажав на кнопки «ВКЛ/ВЫКЛ КАЛОРИФ» 8 и «ВКЛ/ВЫКЛ ВЕНТИЛЯТ» 9 (см. рис. 4). Далее следует включить звуковой оповещатель, установив ручку переключателя 10 в положение «ВКЛ СИРЕНЬ» (см. рис. 4).

Для вывода системы из работы надо выключить каналный нагреватель и каналный вентилятор, нажав на кнопки «ВКЛ/ВЫКЛ КАЛОРИФ» 8 и «ВКЛ/ВЫКЛ ВЕНТИЛЯТ» 9 (см. рис. 4), затем перекрыть с помощью шиберных задвижек 12 подводящие 10 и отводящие 11 воздухопроводы (см. рис. 1). После этого выключить главный выключатель 11 шкафа управления (см. рис. 4).

В заключение можно отметить, что перспективы развития систем очистки воздуха связаны с применением современных технологий энергосбережения, использованием усовершенствованных их механических частей, а также внедрением комбинированных технологий ультрафиолетового облучения и химического окисления. Также интересны вопросы о создании новых технологий, связанных с ультрафиолетовыми лампами, так как данное направление сейчас активно развивается, исследованию уже существующих технологий в нестандартных условиях.

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 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. С. 150.
4. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. С. 135.
5. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. С. 186.
6. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. С. 228.

Ссылка для цитирования

Микаева С.А., Микаева А.С., Ларшина Э.Л. Система очистки воздуха // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 118—122. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-118-122.



В.О. Гладышев, д-р физ.-мат. наук, **В.Л. Кауц**, канд. физ.-мат. наук,
А.А. Терешин, И.В. Ульрих, Фам Суан Чыонг
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
Vgladyshev@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Представлен анализ физических принципов, которые могут успешно использоваться для разработки систем ориентации и навигации нового поколения, а также погрешностей, ограничивающих перспективы совершенствования этих систем. Рассмотрены контроль и управление движением в околоземном пространстве по гравитационному потенциалу, по геомагнитному полю, на основе атомного интерферометра, по глобальной пульсарной навигационной сетке и с использованием других способов. Рассмотрены новые методы, базирующиеся на результатах исследования в области наблюдательной астрофизической, лазерной и атомной интерферометрии, оптики движущихся сред.

Ключевые слова: системы ориентации и навигации; космический летательный аппарат; навигационное поле.

The analysis of physical principles, which can be successfully uses for development a new generation of orientation and navigation systems, as well as errors limiting the prospects for improving these systems, is presented. Monitoring and control of motion in near-Earth space by the gravitational potential, by the geomagnetic field, on the base of the atomic interferometer, by the global pulsar navigation grid and using other methods are considered. New methods based on the results of research in the field of observational astrophysical, laser and atomic interferometry, and the optics of moving media are considered.

Keywords: orientation and navigation systems; spacecraft; navigation field.

Введение. Развитие космической техники обуславливает необходимость разработки современных систем навигации и ориентации на новых физических принципах, обеспечивающих отсутствие дрейфа основных параметров и обладающих высокой степенью защиты от внешних воздействий. В статье сделан анализ существующих и разрабатываемых методов навигации и ориентации летательных аппаратов (ЛА), который позволяет выделить перспективные направления развития этих систем.

Заметим, что наличие системы ориентации у космического летательного аппарата (КЛА) в первую очередь обусловлено решением следующих задач: ориентирование солнечных батарей на Солнце, проведение навигационных измерений и различных исследований, передача информации с помощью остронаправленной антенны, ориентация КЛА перед включением тормозного или разгонного двигателя в целях изменения траектории полёта.

Задачи, выполняемые ЛА, могут требовать как постоянной ориентации, так и кратковременной. Системы ориентации могут обеспечивать одноосную или полную (трёхосную)

ориентацию. Системы ориентации, не требующие затрат энергии, называют пассивными, к ним относятся гравитационные, инерционные, аэродинамические и др. К активным системам относятся реактивные двигатели ориентации, гироскопы, маховики, соленоиды и др. Они требуют затрат энергии, запасаемой на борту КЛА.

При переходе КЛА с одной орбиты на другую, когда работает основная двигательная установка, необходимо сохранять неизменным направление осей аппарата. Для этого используется система стабилизации. Системы ориентации и стабилизации ввиду близости выполняемых ими задач нередко частично объединяют, например используя одни и те же датчики. В этом случае говорят о единой системе ориентации и стабилизации КЛА.

В качестве датчиков текущего положения КЛА обычно применяются электронно-оптические датчики, использующие в качестве ориентиров различные небесные светила: Солнце, Землю, Луну, звёзды. При этом используется видимый или инфракрасный спектр. Второе удобнее, например, для Земли, так как в ин-

фрактальной области спектра дневная и ночная стороны ориентира отличаются слабо. Кроме оптических датчиков могут применяться ионные датчики, датчики магнитного поля Земли, гироскопические датчики и др.

Соответственно, информационно-измерительные комплексы, обеспечивающие решение задач ориентации, стабилизации и навигации, могут быть реализованы на разных физических принципах и с разными потенциальной точностью и помехозащищённостью.

Перспективные системы ориентации и навигации КЛА. В настоящее время разрабатывается множество новых методов ориентации и определения положения КЛА на орбите. Некоторые из разработок имеют системный характер. В работе [1] предложен контроль произвольного числа находящихся на орбите КЛА, основанный на принципах последовательных сетевых структур. Ведущий КЛА контролирует свои абсолютное положение и высоту в соответствии со связанной с ним инерциальной системой отсчёта, а прочие аппараты контролируют свои относительное положение и высоту относительно ближайшего к ним КЛА, подключённого к единой с ними сети. Основным недостатком предложенного метода является то, что системы, определяющие абсолютную или относительную высоту, работают в пределах прямой видимости между КЛА. Решение проблемы управления ориентацией положения КЛА возможно при применении маневровых двигателей, которые могут создавать два вращательных момента. Для изменения ориентации спутника в пространстве могут быть использованы законы управления без обратной связи, а также с обратной связью [2].

Контроль ориентации сети, в состав которой входят КЛА, возможен при помощи обмена лазерными сигналами между микронавигационными спутниками и глобальными навигационными системами [3]. В работе [4] предложена трёхимпульсная система контроля ориентации синхронизированных спутников, связанных с одной или более наземными станциями, которая направляет данные по корректировке ориентации КЛА непосредственно на борт.

В околоземном пространстве возможно эффективное управление КЛА по гравитационному потенциалу, причём точность метода со временем будет увеличиваться [5]. Для построения средств контроля ориентации КЛА используется пассивное гравитационно-градиентное устройство контроля высоты.

Определение ориентации КЛА возможно методом триангуляции [6]. Он периодически фотографируется на фоне звёздного неба при

помощи нескольких камер. С учётом абсолютных спутниковых топоцентрических направлений, полученных с использованием выполненных фотографий, а также с учётом координат астрономических наблюдательных станций событие, связанное со спутником, может быть описано в географической координатной системе с началом вблизи центра масс Земли.

В спутнике TIROSII, который относится к низкоорбитальным (высота орбиты 740 км), использована система, определяющая его ориентацию при помощи вращательного магнитного момента [7]. Контроль вращающихся осей спутника осуществляется на основе изменения тока в катушке, обёрнутой вокруг периферии спутника. Создаваемый дипольный магнитный момент за счёт взаимодействия с земным магнитным полем приводит к прецессии поворотных осей. Ток периодически изменяет своё направление в зависимости от измеренных углов ориентации спутника, полученных от бортовых сенсоров определения горизонта и солнечных сенсоров. Также в работе [7] рассмотрен метод контроля ориентации при помощи работающего на холодном газе реактивного двигателя, который включается в конце каждого поворота спутника вокруг своей оси.

В работе [8] представлен метод контроля ориентации низкоорбитального КЛА, который может генерировать электростатические заряды на своей обшивке в земном магнитном поле, при помощи геомагнитной силы Лоренца. Известен способ контроля ориентации микроспутника при помощи ограниченного на входе, инвертированного микросилового привода [9].

В работе [10] представлен метод проведения глобальной оценки ориентации КЛА при помощи изменчивых эллипсоидов. В этом методе входные параметры ориентации, угловая скорость и измеряемый шум находятся внутри заданных эллиптических связей. Можно задать изменчивый эллипсоид, который будет связывать ориентацию и угловую скорость твёрдого тела. Размер такого эллипсоида будет определять точность проводимых оценок.

Контроль ориентации может осуществляться при помощи свободной скорости стабилизационной схемы, построенной на инерционных измерениях векторов [11].

Перечисленные методы являются основой для создания новых средств ориентации и навигации. В настоящее время наибольшее применение получили системы ориентации и навигации на основе различных гироскопических датчиков. Среди них — гироскопы

с электрическим подвесом ротора, лазерные и волоконно-оптические гироскопы [12—20].

В работе [21] рассмотрен акселерометр для КЛА, использующий атомные волны, в нём применяется атомный источник, который заключён в магнитно-оптические ловушки. Чувствительность акселерометра составляет $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$.

К числу классических методов ориентации, которые продолжают совершенствоваться, относится метод, основанный на использовании звёздных координат.

Большая часть датчиков звёздной ориентации с матричным приёмником излучения функционирует следующим образом. Оптическая система строит изображение участка звёздного неба в своей фокальной плоскости, в которой располагается приёмник излучения. Матричный приёмник излучения превращает оптическое изображение в растровое электронное изображение, которое считывается блоком электроники датчика [22]. При вращении звёздного датчика происходит смазывание изображения, что приводит к возрастанию шумов, за счёт которого увеличиваются погрешности определения координат фотоцентров звёзд и ориентации.

Для звёздных датчиков существует ряд ограничений, которые определяют технические параметры системы ориентации:

дифракционный размер изображения звезды должен быть меньше оптимального p : $2,44\lambda F/(Dd) < p$, где λ — эффективная длина волны для приёмника излучения звёздного датчика; p — измеряется в пикселях; F — фокусное расстояние объектива звёздных датчиков; D — диаметр объектива; d — линейный размер пикселя. Имеются существенные технические проблемы при изготовлении линзовой или зеркальной — малого;

теоретически невозможно построить оптическую систему со светосилой более 1:0,5 (т. е. всегда $F > D/2$);

абберации оптической системы ограничивают размер поля зрения объектива звёздного датчика.

На практике часто необходимо знать относительные координаты и ориентацию КЛА. Обработка видеоизображений позволяет реализовать алгоритм определения относительного положения и ориентации спутников в групповом полёте.

В работе [23] представлен алгоритм определения относительного расстояния между двумя спутниками и ориентации спутников с использованием видеоизображения репер-

ных точек. Рассматриваемый метод определения относительного положения КЛА имеет ограничения. Например, если на снимке не удалось найти хотя бы четыре не лежащие в одной плоскости реперные точки, то поправки в модели сделать невозможно, так как в этом случае положение тела определяется неоднозначно. Также алгоритм неработоспособен, если в поле зрения камеры попадает Солнце или оба аппарата находятся в тени и на теле второго спутника невозможно найти реперные точки, а также если второй аппарат вращается со слишком большой угловой скоростью, а камера снимает с низкой частотой.

Использование в качестве навигационного поля магнитного поля Земли также позволяет решить задачи автономной навигации и ориентации микрокосмического аппарата (МКА) [24]. Для определения ориентации по магнитометрическим измерениям используется единственный чувствительный элемент — трёхосный магнитометр.

Метод позволяет построить трёхосную ориентацию МКА в любой точке орбиты (в тени при нерабочем солнечном датчике, без наземного комплекса и без внешних сигналов GPS/ГЛОНАСС). Задача навигации и определения ориентации МКА по показаниям трёхосного магнитометра без привлечения иных измерений решается с помощью алгоритма рекуррентного оценивания — фильтра Калмана и его модификаций [25—28].

Перспективные принципы построения систем навигации и ориентации. В последнее время вызывает интерес возможность использования пульсаров при построении систем навигации и ориентации. Построение глобальной пульсарной навигационной системы можно проводить, используя как радиодиапазон, так и рентгеновский диапазон, что предполагает применение принципиально разной аппаратуры.

Использование в качестве реперных источников радиопульсаров предполагает размещение на борту радиотелескопа, позволяющего детектировать радиоизлучение пульсаров, причём как минимум трёх пульсаров, не лежащих на одном большом круге небесной сферы. Однако поверхности равной фазы от трёх пульсаров образуют пространственную решётку, и это позволяет только определить положение КЛА внутри такой пространственной ячейки, но не различить соседние ячейки. Избежать данной проблемы, а также существенно увеличить точность указанного метода можно, проводя наблюдения большего числа пульсаров (~10). К сожалению, современный уровень

развития внеатмосферной радиоастрономии не позволяет этого сделать.

Альтернативной возможностью является построение рентгеновской пульсарной системы ориентации и навигации, использующей в качестве реперов рентгеновские пульсары — нейтронные звёзды, входящие в состав тесных двойных систем. Однако и в этом случае при современном уровне развития рентгеновской астрономии существуют принципиальные проблемы, не позволяющие построить такую успешно функционирующую систему [29].

Кинематические параметры движения КЛА могут быть определены, если в качестве навигационного поля используется реликтовое излучение. В основе этого способа лежит свойство дипольной анизотропии реликтового излучения. Это свойство интерпретируется как следствие эффекта Доплера, возникающего при движении Солнечной системы относительно реликтового фона со скоростью примерно 370 км/с в сторону созвездия Льва [30]. Способ позволяет однозначно определить угловое положение, скорость, ускорение аппарата в пространстве на основе измерений спектральной плотности мощности по нескольким направлениям [31].

Спектр реликтового излучения схож со спектром излучения абсолютно чёрного тела, поэтому погрешность измерения спектра зависит только от достигнутой точности измерения температуры теплового излучения, которая находится на уровне $\Delta T \sim 10^{-6}$ К. Дипольная анизотропия излучения вносит свой вклад во флуктуацию фона $\Delta T \sim 10^{-3}$ К, что соответствует погрешности в определении ориентации $\Delta\varphi \sim 1'$. Точность может быть увеличена использованием большего числа датчиков спектральной плотности мощности реликтового излучения.

Карта реликтового излучения может являться эталоном для калибровки измерителя, построенного на другом физическом принципе. В работах [32, 33] предложена новая технология автономной системы контроля ориентации, в основе которой лежит измерение анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения.

Метод измерений основан на исследовании неинвариантных свойств решений уравнений электродинамики в движущихся средах [34, 35]. Результат расчёта времени распространения электромагнитного излучения от источника к приёмнику при наличии движущейся среды становится зависящим от ориентации измерительного канала в пространстве. Такая зависимость имеет вид пространствен-

ной анизотропии, аналогичной дипольной анизотропии реликтового излучения. Существование указанного явления может позволить создать системы ориентации и позиционирования в пространстве на основе локального измерения направления анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения вдоль трассы следования ЛА.

В качестве такого устройства контроля ориентации было предложено рассмотреть интерферометр с движущейся средой. В состав рассматриваемого интерферометра предложено ввести вращающийся оптический диск. Теоретическое описание интерферометра состоит в последовательном применении координатного решения дисперсионного уравнения на каждой границе раздела сред и соответствующих граничных условий.

Проведены расчёты точности разрабатываемой системы ориентации и навигации на основе интерферометра с движущимся оптическим элементом. Погрешность измерения угла составляет $\sim 0,1$, скорости движения — ~ 1 мм/с. Приведённые оценки точности могут быть улучшены при большем времени накопления данных и использовании датчиков с более низким порогом чувствительности. Ещё более высоких результатов по точности можно достичь при использовании оптически более плотных веществ, в частности фотонных кристаллов, так как чувствительность интерферометра пропорциональна коэффициенту увлечения Френеля. Приведённые в этой работе оценки достигнутой в экспериментах точности интерферометра, например по угловой скорости порядка 0,003 об/с, зависят от этого коэффициента. Использование в качестве среды распространения излучения фотонного кристалла может увеличить полученную оценку в 10^6 раз. Это указывает на большой резерв точности метода. При этом разрабатываемый метод свободен от дрейфа, так как крупномасштабная карта реликтового фона Вселенной имеет высокую степень стабильности во времени.

Предложенный способ требует учёта дисперсии оптической среды, что может давать вклад в увеличение чувствительности на 1—2 порядка. Для этого необходим поиск оптических сред, обладающих большими коэффициентами дисперсии в выбранном спектральном диапазоне. Заметим также, что ориентация на основе измерения анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения в движущихся средах защищена от воздействия внешних экранирующих и шумовых факторов, так как привязка к кар-

те реликтового излучения осуществляется только на этапе калибровки перед совершением полёта.

Заключение. Анализ показывает наличие достаточно широкого спектра физических принципов, которые могут успешно использоваться для построения систем ориентации и навигации. Вместе с тем все они обладают недостатками, что обуславливает необходимость при выборе одного из них исходить из поставленной задачи.

Так, гироскоп с электрическим подвесом ограничен по точности паразитными магнитными полями, механическим дисбалансом, наличием остаточного газа в зазоре между ротором и электродами.

Большое число современных работ посвящено контролю ориентации ЛА при помощи геомагнитных и гравитационных датчиков. Эти работы, безусловно, будут продолжены в направлении повышения точности и надёжности.

Разработаны и применяются системы, которые определяют ориентацию и положение спутника при помощи распознавания фото- и видеоизображений. Системы достаточно компактны, но и у них есть свои недостатки, связанные в первую очередь с освещённостью аппарата, а также с существенным влиянием зашумлённости видеоизображения и фотографий.

По-прежнему достаточно широко распространены гироскопические датчики, особенно квантовые оптические гироскопы, которые могут быть выполнены в виде единого твёрдого тела сравнительно небольших размеров. Недостатком является неустранимый дрейф нуля, вызванный изменением температур, магнитными полями и т. д.

Также значительный потенциал имеют волоконно-оптические гироскопы, чувствительность которых может быть проконтролирована при помощи увеличения/уменьшения длины световолокна. Основными ограничениями чувствительности являются фотонный дробовой шум и эффект Фарадея.

В целом к существенным недостаткам действующих систем ориентации и навигации относятся:

накопление со временем систематических ошибок (дрейф параметров), что приводит к существенному снижению тактико-технических характеристик приборов при больших временах полёта;

необходимость первоначальной привязки по времени и месту включения прибора, что приводит к невозможности перезагрузки с сохранением памяти, например, при внешнем шумовом воздействии.

Основная причина указанных недостатков — погрешности внешнего навигационного поля, по которому можно построить привязку. Так, например, источником ошибок при использовании звёздных датчиков является собственное движение звёзд. Одно из решений проблемы — использование ярких, максимально удалённых астрофизических объектов, для которых видимое перемещение по небу ничтожно. В качестве возможных кандидатов рассматриваются квазары — активные галактические ядра, находящиеся на космологических расстояниях. В настоящее время на основе наблюдений за квазарами создана карта астрономических ориентиров для Земли — Международный набор небесных координат (International Celestial Reference Frame, ICRF) [36, 37]. К сожалению, для наблюдений квазаров требуются современные наземные радиотелескопы с диаметрами антенн десятки метров, а также сети и решётки радиотелескопов для прецизионного определения положения квазара на небесной сфере. Данные карты могут использоваться при построении глобальных навигационных систем (типа ГЛОНАСС), оказывать поддержку навигации космическим кораблям в межпланетных миссиях. Однако в настоящее время квазарная навигация не может быть рассмотрена в качестве автономной для космического корабля в силу огромных размеров радиотелескопов, входящих в систему наблюдения.

Необходимо также отметить, что обеспечение высокоточной спутниковой навигации приводит к необходимости учёта фундаментальных составляющих параметров вращения Земли [38], а также обуславливает повышенные требования к разработке оптического сегмента ГЛОНАСС [39]. Использование реликтового излучения в качестве навигационного поля может позволить решить некоторые из перечисленных проблем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-02-00488 а и № 16-08-00618 а.

Библиографические ссылки

1. Tse-Huai Wu, Taeyoung Lee. Spacecraft Position and Attitude Formation Control using Line-of-Sight Observations. Arxiv:1403.5339v1[math.OC], 2014.
2. Walsh G.C., Montgomery R., Sastry S.S. Orientation Control of a Satellite. Institute For Systems Research, 1995. P. 1—18.
3. Bei Kang, Jong-Ha Lee, Chang-Hee Won. Micro-Navigation Satellite Network Design and Analysis // Proceedings of ION GNSS 2008. Savannah, Georgia, Sept. 16—19, 2008. P. 10.

4. **Silverstein S.D., Ashe J.M., Kautz G.M., Wheeler F.W., Jacomb-Hood A.** // IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems. 1997. P. 19.
5. **Lewis J.A., Zajac E.E.** A Two-Gyro Gravity-Gradient Satellite Attitude Control System // The Bell System Technical J. 1964. P. 62.
6. **Baldini A.A.** Absolute orientation of Satellite Triangulation. Geophysical Monograph Ser. The use of Artificial Satellites for Geodesy. 2013. Vol. 15. P. 19—26.
7. **Frost G.** Attitude Orientation Control for a Spinning Satellite // RAND. 1991. P. 32.
8. **Abdel-Aziz Y.A., Shoab M.** Attitude dynamics and control of spacecraft using geomagnetic Lorentz force. Arxiv:1405.4411v1[astro-ph.IM], 2014. P. 18.
9. **Koh S.K., Ostrowski J.P., Ananthasuresh G.K.** Control Micro-satellite Orientation Using Bounded-input. Fully-reversed MEMS Actuators. Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, General Robotics, Automation, Sensing and Perception Laboratory, University of Pennsylvania, 2002. P. 30.
10. **Lee T., Sanyal A.K., Leok M., McClamroch N.H.** Global Attitude Estimation using Uncertainty Ellipsoids. Arxiv:0512163v1[math.OC], 2005.
11. **Tayebi A., Roberts A., Benallegue A.** Inertial Measurements Based Velocity-free Attitude Stabilization. Arxiv:1203.1526v1[math.OC], 2012.
12. **Малеев П.И.** Новые типы гироскопов. Л.: Изд-во «Соударение», 1971. 160 с.
13. **Кнобелл Н.В.** Control Engineering. 1964. Vol. 11. No. 2. P. 70—73.
14. **Фёдоров Б.Ф., Шереметьев А.Г., Умников В.Н.** Оптический квантовый гироскоп. М.: Машиностроение, 1973. 224 с.
15. **Климонтович Ю.Л., Ланда П.С., Ларионцев Е.Г.** Об устойчивости режима встречных волн в кольцевом газовом лазере // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. С. 1616—1631.
16. **Померанцев Н.М., Скроцкий Г.В.** Физические основы квантовой гироскопии // УФН. 1970. Вып. 100. С. 361.
17. **Belfi J., Beverini N., Bosi F., Carelli G., Di Virgilio A., Maccioni E., Ortolan A., Stefani F.** A 1.82 m² ring laser gyroscope for nano-rotational motion sensing. Arxiv:1104.0418v3[physics.ins-det], 2011. P. 20.
18. **Шереметьев А.Г.** Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
19. **Филатов Ю.В.** Волоконно-оптический гироскоп. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 51 с.
20. **Miller T., Gilowski M., Zaiser M., Ertner T., Rassel E.M.** A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium. Arxiv:0806.0956v1[physics.atom-ph], 2008. P. 9.
21. **Landragin A., Santos F.P.D.** Accelerometer using atomic waves for space applications. Arxiv:0808.3837v1[physics.atom-ph], 2008. P. 14.
22. **Прохоров М.Е., Захаров А.И., Тучин М.С.** Расчёт оптимальных характеристик оптической системы и матричного приёмника излучения звёздного датчика ориентации по его тактико-техническим характеристикам // Труды Третьей Всероссийской науч.-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2013. С. 80—90.
23. **Иванов Д.С., Сакович М.А., Овчинников М.Ю., Карпенко С.О.** Исследование алгоритма определения относительного положения и ориентации спутников в групповом полёте с использованием обработки видеоизображений // Труды Третьей Всероссийской науч.-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2013. С. 104—112.
24. **Потехин С.Г., Власенков Е.В., Комбаев Т.Ш., Павлова А.Н.** Решение задачи навигации и ориентации микрокосмического аппарата по данным о магнитном поле Земли с использованием фильтра Калмана // Труды Третьей Всероссийской науч. техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2013. С. 160—168.
25. **Шэнь К., 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.
26. **Неусыпин К.А., Шэнь К.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.
27. **Neusipin K.A., Proletarsky A.V., Shen K., Liu R., Guo R.** Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Nanjing Li Gong Daxue Xuebao. 2014. Vol. 38. No. 5. P. 602—607 and 614.
28. **Шахтарин Б.И., Шэнь К., Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательного аппарата // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.
29. **Прохоров М.Е., Захаров А.И.** Ориентация и навигация в космосе — новые методы и перспективы // Труды 40-й Междунар. науч. конф. «Физика космоса». Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2011. С. 170—195.
30. **Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д.** Реликтовое излучение Вселенной. М.: Наука, 2003. 390 с.
31. **Гладышев В.О., Портнов Д.И.** Способ определения кинематических параметров движения летательного аппарата // Патент России № 2611559. Заявка № 2015157112/28(088130). Заявл. 30.12.2015.
32. **Гладышев В.О., Тиунов П.С., Леонтьев А.Д., Шарандин Е.А.** Устройство измерения анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения // Патент России № 2498214. 2013. Бюл. № 31.
33. **Гладышев В.О., Кауц В.Л., Тиунов П.С.** Автономная система ориентации на принципах измерения параметров анизотропии пространства // Труды Третьей Всероссийской науч. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса, 10—13 сентября 2012 г. М.: Изд-во ИКИ РАН, 2013. Вып. 1(13). С. 146—151.
34. **Гладышев В.О., Тиунов П.С., Леонтьев А.Д., Гладышева Т.М., Шарандин Е.А.** Исследование анизотропии пространства скоростей электромагнитного излучения в движущейся среде // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 11. С. 54—63.
35. **Gladyshev V., Tiunov P., Leontev A., Gladysheva T., Sharandin Ye., Fomin I., Tereshin A., Yavorskii A.** Estimation of space-time variations in the position of the interference picture in SADE // Physical Interpretation of Relativity Theory: Proceedings of International Meeting. Moscow, 4—7 July 2011. Moscow, VMSTU, 2012. С. 88—96.
36. **Гладышев В.О., Гладышева Т.М., Дашко М., Трофимов Н., Шарандин Е.А.** Анизотропия пространства скоростей электромагнитного излучения в движущихся средах // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. 2006. Т. 3. № 2(6). С. 173—187.
37. **The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry / A.L. Fey, D. Gordon, and C.S. Jacobs (eds.) // IERS Technical Note. No. 35. Frankfurt am Main, 2009.**

38. Марков Ю.Г., Михайлов М.В., Ларьков И.И., Рожков С.Н., Крылов С.С., Перепёлкин В.В., Почукаев В.Н. Фундаментальные составляющие параметров вращения Земли в формировании высокоточной спутниковой навигации // Космические исследования. 2015. Т. 53. № 2. С. 152.

39. Гладышев В.О., Терешин А.А. Линза Люнеберга в подвижной системе координат // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 5. С. 822—830.

Ссылка для цитирования

Гладышев В.О., Кауц В.Л., Терешин А.А., Ульрих И.В., Фам Суан Чыонг. Перспективные направления развития систем ориентации и навигации летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 123—129. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-123-129.

УДК 629.05

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-129-134

С.Ч. Фам, А.Д. Суркова, М.С. Селезнева, канд. техн. наук
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

m.s.selezneva@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАРШРУТНОЙ КОРРЕКЦИИ БОРТОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ МЕСТНОСТИ

Рассмотрена система маршрутной коррекции беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Для коррекции маршрута полёта использован бортовой радиолокационный комплекс. В условиях активных помех применять радиолокационные изображения для коррекции маршрута невозможно, поэтому предложено использовать бортовую навигационную систему с алгоритмической коррекцией. Применена схема компенсации погрешностей навигационной системы в выходном сигнале с помощью алгоритма построения прогнозирующей модели погрешностей системы. Прогнозирующая модель строится с помощью генетического алгоритма и метода группового учёта аргументов. Сравнение качества алгоритмов построения прогнозирующих моделей проведено с помощью математического моделирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; коррекция; маршрутная коррекция; радиолокационная карта; инерциальная навигационная система; прогнозирующая модель.

The system of route correction of an unmanned aerial vehicle (UAV) is considered. For the route correction the on-board radar complex is used. In conditions of active interference, it is impossible to use radar images for the route correction so it is proposed to use the on-board navigation system with algorithmic correction. An error compensation scheme of the navigation system in the output signal using the algorithm for constructing a predictive model of the system errors is applied. The predictive model is building using the genetic algorithm and the method of group accounting of arguments. The quality comparison of the algorithms for constructing predictive models is carried out using mathematical modeling.

Keywords: unmanned aerial vehicle; correction; route correction; radar map; inertial navigation system; predictive model.

Введение. В настоящее время существует класс беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), основной задачей которых является полёт по заданному маршруту с выводом их в заданную область пространства с требуемой точностью. В этом случае сигнал управления рассчитывается заранее и является программным. Система управления БПЛА на маршевом участке полёта решает следующие основные задачи: обработка программной траектории с требуемой точностью; поддержание требуемого углового положения на траектории полёта; коррекция бортовой навигационной системы.

Среди многочисленных задач, связанных с созданием высокоточных навигационных систем БПЛА, большое внимание уделяется задаче выведения БПЛА с требуемой точностью в заданную область пространства. Основным требованием при решении данной задачи является обеспечение максимально возможной точности приведения БПЛА в область для осуществления конечного наведения.

Приведение БПЛА в точку начала конечного наведения на маршевом участке полёта осуществляется по данным навигационных систем.

В основе навигационной системы, находящейся на борту БПЛА, лежит одна из возможных реализаций инерциальной навигационной системы (ИНС) [1, 2]. Основным недостатком такой системы — интегральное накопление ошибки функционирования. При достаточно больших расстояниях полёта величина ошибок не позволяет использовать такую ИНС для решения задачи наведения БПЛА на цель. Для решения этой проблемы используют дополнительную подсистему коррекции работы ИНС [3]. Корректирующая подсистема получает информацию от различных датчиков в навигационной системе, совместная обработка которой позволяет значительно повысить точность работы комплексной навигационной системы.

Наиболее распространённым способом коррекции ИНС является её коррекция от радиолокационной станции (РЛС) [4, 5]. Такой подход позволяет обеспечить требуемую точность, однако он не применим при отсутствии сигнала от РЛС. Кроме того, РЛС имеет низкую помехозащищённость. Совокупность этих факторов позволяет сделать вывод о том, что требуются альтернативные способы коррекции ИНС [1, 6].

Таким образом, задача построения системы коррекции бортовой навигационной информации является актуальной в рамках маршрутной навигации.

В статье проведено исследование системы маршрутной коррекции (СМК) и сравнительный анализ методов коррекции, алгоритмов селекции и алгоритмов распознавания изображений, на основе которого осуществлён выбор метода и алгоритма коррекции.

Система маршрутной коррекции БПЛА. На маршевом участке полёта осуществляются маршрутная навигация и коррекция траектории. На этом участке полёта СМК с помощью радиолокационного канала (РЛК) выполняет визирование опорных участков местности в точках траектории, заданных в полётном задании. Полученные в результате визирования изображения поступают в вычислительную систему (ВС) СМК, где обрабатываются с помощью алгоритмов распознавания, которые определяют положение эталонного изображения опорного объекта на наблюдаемом изображении [7, 8]. По этим данным, а также по данным о координатах опорного участка определяются координаты БПЛА и сравниваются с координатами, полученными навигационной системой. В результате определяется рассогласование реальной и программной траекторий БПЛА, по которому выполняется коррекция траектории.

Таким образом, смысл задачи коррекции траектории сводится к расчёту исходных данных для выполнения коррекции траектории для системы управления движением на основе определения собственного положения БПЛА (маршрутной навигации) с помощью СМК. Задачу коррекции траектории можно представить как ряд следующих последовательных шагов:

1. Определение координат БПЛА с помощью СМК.

2. Определение координат БПЛА с помощью бортовой навигационной системы.

3. Сравнение текущих координат БПЛА, полученных с помощью СМК, с координатами БПЛА, полученными с помощью бортовой навигационной системы. Выработка поправок для коррекции данных, полученных с бортовой навигационной системы.

4. Формирование управляющих сигналов и реализация манёвра по коррекции траектории.

Для решения задачи коррекции траектории необходимо выполнение следующих условий:

выход БПЛА в зону коррекции. Под зоной коррекции подразумевается участок пространства, в котором возможно корректное визирование опорных объектов. Выход в зону коррекции с заданной точностью обеспечивает система управления движением (СУД) БПЛА;

наличие эталонных изображений опорных объектов, по которым осуществляется определение координат БПЛА в зоне коррекции. Каждому эталонному изображению ставятся в соответствие ракурс визирования и данные координатной привязки. Эталонные изображения формируются на этапе предстартовой подготовки.

Задача коррекции траектории при помощи СМК решается следующим образом:

1. При входе в зону коррекции траектории ВС СМК выдаёт команду начать визирование.

2. Одновременно с выдачей команды начала визирования ВС СМК фиксирует параметры движения БПЛА: его координаты и углы ориентации. На их основании формируется ракурс визирования.

3. На основании данных о ракурсе визирования выбирается эталонное изображение опорного объекта, соответствующего ракурсу визирования (либо формируется по трёхмерной модели объекта).

4. РЛК начинает визирование земной поверхности с передачей радиолокационного изображения в ВС СМК.

5. ВС СМК передает радиолокационное изображение в блок алгоритмов распознава-

ния, определяющих координаты БПЛА по изображению опорного объекта.

6. Координаты БПЛА, полученные с помощью СМК, сравниваются с его координатами, полученными с помощью бортовой навигационной системы. Определяются поправки координат.

7. На основании полученных поправок формируются данные для коррекции траектории в системе управления движением.

8. Данные для коррекции траектории БПЛА передаются в СУД, где на их основе реализуется закон управления, обеспечивающий коррекцию траектории.

Функционирование базы данных (БД) СМК и обработка данных БД и РЛК на основном участке полёта. Формирование базы данных СМК. На этом этапе выполняются:

1. Предварительная оценка района применения БПЛА:

проводится планирование маршрута движения с учётом рельефа местности, направления подхода к целевому объекту, априорной информации о возможных помехах, информативности подстилающей поверхности;

определяются необходимое число точек коррекции и их расположение относительно трассы полёта на основании анализа информативности местности в районе предполагаемых участков визирования;

выбираются участки коррекции и соответствующие им опорные объекты, определяются их координаты;

формируются эталонные изображения выбранных участков местности;

проводятся моделирование полёта БПЛА с коррекцией по выбранным участкам местности и оценка точности навигации с учётом предполагаемых картографических ошибок, изменений конфигурации опорных объектов, ошибок ИНС, ошибок процедур комплексирования данных от ИНС и РЛК, ошибок процедур коррекции;

при положительных результатах оценки точности навигации проводится формирование параметров БД, а при отрицательных результатах — перечисленные процедуры выполняются до достижения положительных результатов на данной траектории полёта или выбирается альтернативная траектория с другими участками коррекции и их расположением.

2. Формирование составной части БД СМК, содержащей параметры использования РЛК:

определяются траектория, дальность полёта БПЛА, число и координаты точек включения РЛК (в стартовой системе координат

(ССК)) в режиме визирования опорных участков местности (точек визирования);

определяется требуемое разрешение радиолокационных изображений (в пределах возможностей РЛК);

определяются размеры формируемых РЛК радиолокационных изображений;

определяются координаты центров опорных участков местности (реперных точек) в ССК.

Обработка данных БД и информации от РЛК на основном участке полёта. Во время полёта ВС СМК постоянно отслеживает положение БПЛА в ССК по данным от ИНС и прогнозирует момент достижения БПЛА расчётной точки включения РЛК. За заданное время до достижения расчётной точки первого визирования производятся выдача команды на начало работы РЛК и ввод данных, необходимых для включения и работы РЛК в режиме съёмки заданного участка местности.

РЛК выполняет визирование заданных участков местности в соответствии с данными от ВС СМК об их расположении относительно БПЛА, о требуемых размерах и разрешении изображения; проводит зондирование и формирует радиолокационные изображения. Сформированные радиолокационные изображения поступают в ВС СМК для дальнейшей обработки, результатом которой является привязка, в результате селекции, заранее изготовленных эталонных изображений к полученным с РЛК изображениям опорных участков местности, привязанных к фактическим координатам БПЛА и параметрам его движения (модулю и направлению вектора скорости). Координаты БПЛА и параметры его движения передаются в БЦВМ СУД для реализации коррекции траектории (либо коррекции ИНС).

РЛК должен формировать радиолокационные изображения в координатах дальность, доплеровская частота, обеспечивающих их преобразование в изображения с географическими координатами при требуемом разрешении на местности. Формируемые в РЛК изображения должны покрывать требуемые участки. Требуемые размеры отображаемых на изображениях участков местности и разрешение изображений формируются в ВС СМК и выдаются в РЛК перед включением СУД в режиме коррекции траектории.

Коррекция траектории полёта на основе прогнозирующих моделей. Основным недостатком РЛС является слабая помехозащищённость. Поэтому в условиях активного противодействия, при постановке противником активных помех, использовать РЛС для коррекции

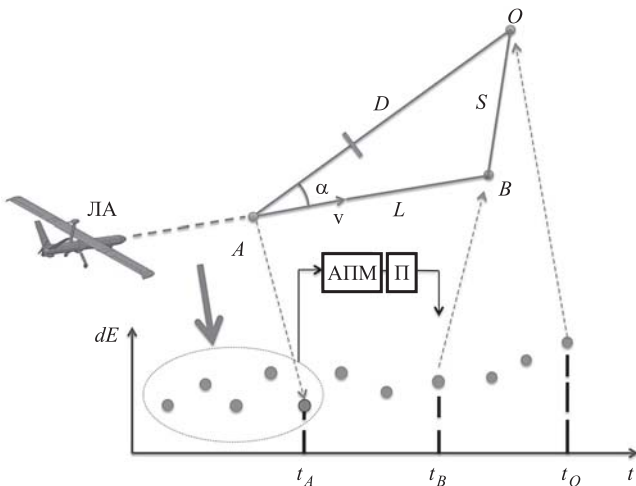


Рис. 1. Прогноз погрешностей ИНС БПЛА:

АПМ — алгоритм построения модели; ЛА — летательный аппарат в момент принятия решения (в исходной точке); dE — ошибка в определении местоположения; t_A, t_B, t_O — время полёта из стартовой точки до точек A, B, O соответственно; B — точка вывода ЛА, из которой возможно провести распознавание цели; O — объект распознавания (цель); D — дальность до объекта распознавания, измеряется дальномером с ЛА; L, S — расчётные дальности; v — вектор скорости ЛА

маршрута полёта БПЛА не представляется возможным. В практических приложениях при постановке активных помех СМК функционирует на основе информации, полученной только от бортовой навигационной системы БПЛА. Однако на исследуемых типах БПЛА обычно устанавливают ИНС третьего класса точности. Погрешности таких ИНС с течением времени быстро нарастают, что приводит к большим ошибкам СМК и в конечном итоге к срыву выполнения БПЛА поставленной задачи. В связи с этим предлагается проводить коррекцию ИНС с помощью прогнозирующих моделей её погрешностей [8, 9].

Предположим, что до момента полёта в точку A БПЛА функционировал в режиме коррекции от РЛК (рис. 1). Оценки ошибок ИНС, полученные в режиме коррекции, используются для построения прогнозирующих моделей.

После построения прогнозирующих моделей погрешностей ИНС с их помощью осуществляются прогнозирование погрешностей на каждом такте работы ИНС на всем интервале автономной работы ИНС и компенсация погрешностей в выходном сигнале системы. Навигационная информация, полученная от ИНС с алгоритмом прогнозирования, поступает в СМК, где сравнивается с картой местности. Сигналы рассогласования ИНС и карты используются для коррекции траектории БПЛА.

Алгоритмы построения прогнозирующих моделей погрешностей ИНС. Метод группового учёта аргументов (МГУА) является разновидностью подхода самоорганизации и использует алгоритмы, которые напоминают правила селекции семян (используется правило порогового самоотбора) [2].

Пользуясь идеей селекции при составлении математических алгоритмов, принимаем гипотезу о том, что малоэффективные комбинации, отброшенные на первых рядах самоотбора, не могли бы дать оптимальные комбинации следующего ряда, если бы были пропущены дальше. Эта гипотеза ещё не доказана в общем виде, но подтверждена многообразными примерами.

В МГУА все вопросы оптимизации решаются при помощи перебора вариантов, только на материале заданной обучающей и одной проверочной последовательностей. Никакой информации о распределении вероятностей не используются. Для пороговых самоотборов лучших вариантов последовательно используются различные эвристические критерии [2, 9].

Недостаток МГУА — точность решения задачи сильно зависит от выбора вида опорных функций. Поэтому для решения различных задач надо выбрать различные виды опорных функций.

Генетические алгоритмы (ГА) [10] отражают естественную эволюцию методов решения проблем и, в первую очередь, задач оптимизации [2]. ГА — это процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей. ГА отличаются от традиционных методов оптимизации несколькими базовыми элементами.

Результаты моделирования прогнозирующих моделей погрешностей автономных ИНС. В автономном режиме функционирования проводится коррекция навигационных систем с помощью алгоритмов экстраполяции. В данной работе предлагаются и исследуются ГА. С помощью этих алгоритмов осуществляется прогнозирование погрешностей навигационных систем. Затем спрогнозированные оценки погрешностей используются в известных схемах коррекции.

Предположим, что после момента времени t_0 сигнал внешних источников отсутствует, при этом в ГА в качестве входного сигнала используется выборка оценки ошибок до момента времени t_0 для построения прогнозирующих моделей погрешностей ИНС.

ГА представляют собой механизм оптимизации, основанный на концепциях естественного отбора и генетики. В исследуемой задаче ГА используются для построения моделей погрешностей ИНС, и затем эти модели используются для прогнозирования погрешностей ИНС при автономном режиме работы.

Предположим, что до момента времени $t_0 = 30$ мин присутствует сигнал внешних источников. Используем ГА и выборку сигналов СМК до момента времени $t_0 = 30$ мин для построения прогнозирующих моделей погрешностей ИНС. Полученные модели погрешностей ИНС используются для прогнозирования погрешностей ИНС после момента времени $t_0 = 30$ мин.

Основная проблема при применении ГА заключается в преждевременной сходимости. Преждевременная сходимость — это нахождение локального экстремума вместо глобального, она возникает вследствие различных причин. Для её предотвращения в каждой конкретной задаче используются конкретные правила работы ГА. В исследуемой задаче используются следующие правила работы ГА:

число хромосом в популяции: 1200. Это число обеспечивает разнообразие популяции. Если число хромосом мало, то ГА быстро сходится и может иметь место преждевременная сходимость. А если число хромосом больше, то это ведёт к увеличению занимаемого объёма памяти и времени работы ГА;

критерий остановки ГА: исчерпание числа поколений. Для устранения преждевременной сходимости можно увеличивать число поколений. Но, с другой стороны, увеличение числа поколений ведёт к увеличению занимаемого объёма памяти и времени работы ГА. Поэтому следует выбрать оптимальное число поколений, для того чтобы обеспечить требуемые точность и время работы ГА. В исследуемой задаче выбрали число поколений, равное 10;

метод селекции: турнирный. Этот метод обеспечивает ситуацию, когда наилучшие хромосомы всегда участвуют в создании потомков в следующей популяции.

При использовании ГА и МГУА для построения прогнозирующей модели ошибки в определении местоположения получены результаты, представленные на рис. 2.

При использовании прогнозирующей модели для коррекции точность определения местоположения повышается по сравнению с автономной ИНС в среднем на 65 %, а по сравнению с известными методами в среднем на 5 %.

При исчезновении сигнала РЛК коррекция автономной ИНС проводится с помо-

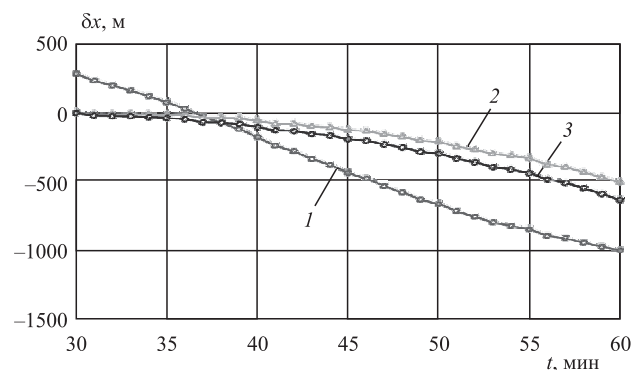


Рис. 2. Компенсация ошибки в определении местоположения с помощью прогнозирующих моделей:

1 — ошибка в определении местоположения автономной ИНС; 2 — ошибка в определении местоположения после коррекции с помощью ГА; 3 — ошибка в определении местоположения после коррекции с помощью МГУА; δx — погрешность местоположения ИНС; t — время

щью МГУА и ГА. Поэтому в СМК проводится сравнение ГА с МГУА. Входные сигналы для алгоритмов построения моделей получают с выхода СМК. Эти сигналы являются входом для МГУА и ГА. Точность разработанного ГА незначительно превосходит точность МГУА.

Выводы:

1. Сформировано алгоритмическое обеспечение СМК БПЛА, функционирующее при использовании РЛК и в условиях активных помех, когда сигналы РЛК недоступны.
2. Разработаны алгоритмы коррекции автономной ИНС БПЛА, включающие ГА и алгоритм прогнозирования.
3. Результаты моделирования продемонстрировали работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов коррекции, что обуславливает целесообразность их использования в реальных СМК для повышения точности их функционирования и решения задач БПЛА.

Библиографические ссылки

1. Кай Ш., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.
2. Неусыпин К.А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: МГОУ, 2009. 500 с.
3. Селезнева М.С., Нгуен Д.Т. Выбор приоритетной ИНС в составе бортового комплекса для решения целевых задач ЛА // Достижения вузовской науки: Труды II Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 127—130.
4. Красильщиков М.Н., Сыпало К.И., Козорез Д.А. Анализ условий обеспечения функционирования инерциально-спутниковой навигационной системы беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Автоматика и телемеханика. 2010. № 3. С. 72—76.

5. Selezneva M.S., Neusypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.

6. Клычников В.В., Ли Юе, Селезнева М.С. Методы совершенствования алгоритмического обеспечения навигационных систем и комплексов ЛА // Достижения вузовской науки: труды III Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 35—38.

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

8. Селезнева М.С., Оглоблина Ю.С. Построение самоорганизующейся модели с высокой степенью наблюдаемости // Научный взгляд: труды Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 250—253.

9. Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18—24.

10. Koza J.R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Cambridge: MIT Press, 1992. 840 p.

Ссылка для цитирования

Фам С.Ч., Суркова А.Д., Селезнева М.С. Исследование системы маршрутной коррекции бортовой навигационной системы беспилотного летательного аппарата по радиолокационным изображениям местности // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 129—134. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-129-134.

УДК 681.5.09

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-134-144

А.Е. Коченгин, А.В. Шихина, Т.В. Ягодкина
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва)

kochenginalexy@gmail.com

АГРЕГИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА ЦЕНЫ НА РЫНКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Предложен алгоритм построения прогноза цены электроэнергии с введением агрегированной модели, включающей учёт поправочных составляющих по прогнозу влияющих факторов. Алгоритм предусматривает предварительное определение доминирующих факторов в зависимости от специфики решения задачи, включая конкретный регион, глубину прогноза, сложившуюся региональную конъюнктуру рынка электроэнергии. По выделенным факторам построена модель прогноза в форме временных рядов. Предложенный механизм формирования прогноза реализован посредством применения искусственных нейронных сетей (ИНС). Структура ИНС позволяет осуществить свёртку моделей влияющих факторов и модели основной переменной в единый временной ряд прогнозируемой переменной. Такая агрегированная модель прогноза позволяет существенно повысить точность прогноза в постоянно изменяющихся условиях поведения микро- и макроэкономики, климата, структуры производства и потребления энергоресурсов, что подтверждается на примере Белгородской области.

Ключевые слова: агрегированная модель; предсказание; точность прогноза; цена электроэнергии; временной ряд; факторный анализ.

An algorithm for constructing a forecast of the electricity price with the introduction of an aggregated model that includes the accounting of correction components according to the forecast of influencing factors is proposed. The algorithm provides a preliminary determination of the dominant factors depending on the specifics of solving the problem, including a specific region, the depth of the forecast, the established regional conjuncture of the electricity market. Based on the selected factors, a forecast model in the form of time series is constructed. The proposed forecast formation mechanism is implemented by the use of artificial neural networks (ANN). The structure of the ANN allows the convolution of models of influencing factors and the model of the main variable in a single time series of the predicted variable. Such aggregated forecast model makes it possible to significantly increase the accuracy of the forecast in constantly changing behavior conditions of micro- and macroeconomics, climate, production structure and consumption of energy resources, which is confirmed by the example of the Belgorod region.

Keywords: aggregated model; prediction; forecast accuracy; price of electricity; time series; factor analysis.

Введение. В настоящее время основные объёмы электроэнергии и мощности в России продаются по свободным (нерегулируе-

мым) ценам в основном на рынке «на сутки вперёд» (РСВ) [1] с 1 сентября 2006 г. Таким образом, для хозяйствующих субъектов сво-

бодного рынка электроэнергии появился экономический стимул оперативного планирования энергопотребления и генерации, что является необходимым условием извлечения максимальной экономической эффективности из краткосрочных договоров. Задача прогнозирования свободных цен на электроэнергию в России является крайне актуальной как для поставщиков, так и для потребителей, поскольку во многом определяет эффективность их действий. Очевидно, что наличие у каждого из субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) надёжного прогноза цены позволяет эффективно осуществлять свою деятельность на свободном рынке электроэнергии. Так, например, производитель электроэнергии может оптимизировать соотношение состава включённого генерирующего оборудования и находящегося в резерве, режимы работы оборудования и графики вывода оборудования на ремонт. Потребитель в свою очередь переходит на рациональную закупку необходимых объёмов и снижает убытки от выхода на более дорогой балансирующий рынок [2].

Модели ценообразования в России и на европейских рынках EEX (European Energy Exchange) и Nord Pool существенно отличаются, поэтому модели, разработанные для европейских стран, лишь условно могут быть применены на отечественном ОРЭМ [2]. К особенностям российского ОРЭМ, а следовательно, и к особенностям его прогнозирования, можно отнести существенную неравномерность графика поставок мощности и электроэнергии, что зависит не только от потребителей и производителей со своей спецификой жизненных циклов, но также и от множества других, не менее значимых факторов.

Актуальность проблемы прогнозирования цены электроэнергии на ОРЭМ связана прежде всего со следующими основными обстоятельствами:

- стремление к снижению расходов хозяйствующих субъектов на покупку электроэнергии;

- необходимость снижения доли энергозатрат в себестоимости выпускаемой предприятиями продукции;

- повышение действенности рыночных механизмов формирования цены на ОРЭМ и эффективности функционирования администратора торговой системы АО АТС — НП «Совет рынка»;

- низкая точность прогнозирования цены электроэнергии по существующим моделям при условии высокой изменчивости основных макроэкономических показателей и климатических условий;

- отсутствие комплексного подхода к многофакторному прогнозированию цены с учётом специфики функционирования российского ОРЭМ.

Кроме того, электроэнергия, как товар, имеет свои особенности, поскольку обладает определёнными физическими свойствами:

- необходимость сохранения баланса производства и потребления;

- хранение электроэнергии в достаточном объёме пока невозможно обеспечить технологически;

- плановый график нагрузки носит вероятностный характер и слабо управляем;

- при передаче и потреблении электроэнергии не идентифицируется производитель;

- существенные затруднения вызывает установление источников снижения показателей качества электроэнергии при её распределении и потреблении.

Имеющиеся результаты и проблемы. При решении задачи ценообразования на РСВ администратор торговой системы использует математическое представление энергосистемы с информацией о потребителях и производителях в форме узлов и ветвей — «узловая расчётная модель» [2]. Данная модель постоянно актуализируется и в сочетании с ценовыми заявками субъектов ОРЭМ является основным источником ценообразования.

В существующих условиях сложно построить универсальную модель прогноза (МП) цены на электроэнергию, так как постоянно обнаруживаются те или иные влияющие факторы (макроэкономические показатели, климатические условия и др.), динамично меняющиеся на интервале прогноза, а также в разной степени доминирующие в зависимости от конкретного региона или ценовой зоны ОРЭМ, избранного горизонта прогнозирования, сложившейся конъюнктуры рынка, влияния системных ограничений на перетоки мощности и др. В связи с этим предпринимаются попытки учесть многофакторное влияние при прогнозировании цены, например, в форме гибридной регрессионной модели [3], однако доступная в настоящее время информация пока не позволяет с достаточной достоверностью подтвердить работоспособность таких моделей.

Предпринимаемые многочисленные попытки улучшения статистических моделей для целей прогнозирования [4, 6, 10—26] приводят к определённым положительным, но весьма ограниченным результатам, хотя при этом и сопровождаются дополнительно вводимыми существенными предпосылками. Следует также отметить, что использование улучшенных

статистических моделей, показывающих относительно неплохие прогнозирующие возможности в условиях стабильных зарубежных рынков электроэнергии, ведут себя совсем иначе при попытках прогноза цен отечественного рынка электроэнергии, что, в частности, связано с отмеченными ранее его особенностями. Соответствующая информация об имеющихся результатах прогнозирования цен по зарубежным рынкам электроэнергии, опубликованных за последние годы, представлена в табл. 1.

В табл. 1 указаны следующие меры точности, наиболее широко используемые для моделей прогноза:

средняя абсолютная ошибка

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|; \quad (1)$$

среднеквадратичная ошибка

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2; \quad (2)$$

квадратный корень из среднеквадратичной ошибки

$$RMSE = \sqrt{MSE}; \quad (3)$$

средняя по модулю относительная ошибка в процентах (прямой перевод «mean absolute error» не соответствует принятой отечественной терминологии)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|; \quad (4)$$

коэффициент расхождения Тейла

$$TIC = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}}. \quad (5)$$

Из приведённого обзора в табл. 1 можно сделать несколько заключений:

точность прогнозирования цены электроэнергии существенно зависит от специфики структуры производства и потребления электроэнергии отдельных стран. Например, применение такой же модели прогнозирования для рынка Калифорнии (США) и группы стран Северной Европы [12] даёт существенную разницу в уровне точности прогнозирования (13,96 или 4,33 % соответственно);

наращивание сложности модели [12, 21, 23, 26] (структуры, количества искомым параме-

Таблица 1

Достигнутые уровни точности прогнозирования цен рынков электроэнергии разных стран

Страна	Модель прогноза	Мера точности прогноза, %
UK [24]	Multifactor nonlinear RM (second order)	<i>MAPE</i> = 11,11
UK [23]	МП1: AR	<i>MAPE</i> = 13,14
	МП2: в МП1 + extra coefficients	<i>MAPE</i> = 10,32
	МП3: в МП1 + extra coefficients with Markov switching	<i>MAPE</i> = 11,03
	МП4: multifactor nonlinear RM	<i>MAPE</i> = 12,2
	МП5: в МП4 + extra coefficients	<i>MAPE</i> = 9,23
	МП6: в МП4 + extra coefficients with Markov switching	<i>MAPE</i> = 9,23
	МП7: в МП4 + extra coefficients with min distance switching	<i>MAPE</i> = 6,31
California / NordPool [12]	МП1: AR ; ARX (+ extra variables)	<i>MAPE</i> = 13,96; 13,36/4,33; 4,66
	МП2: p-AR ; p-ARX + smoothing	<i>MAPE</i> = 13,44; 12,96/4,33; 4,65
	МП3: TAR ; TARX + switching	<i>MAPE</i> = 3,99; 13,31/4,43; 4,65
	МП4: MRJD ; MRJDX + jumping component	<i>MAPE</i> = 15,39; 14,67/4,88; 4,99
	МП5: SNAR ; SNARX + nonparametric estimator	<i>MAPE</i> = 13,87; 13,17/4,04; 4,16
Australia [21]	МП1: AR + extra coefficients + separating deterministic/stochastic components	<i>TIC</i> = 8,62
	МП2: МП1 + recovery	<i>TIC</i> = 8,15
	МП3: МП1 + Markov switching	<i>TIC</i> = 6,52
California / Spain [15]	МП1: ARIMA	<i>MAPE</i> = 15,65/19,37
	МП2: ARIMAX	<i>MAPE</i> = 21,03/14,68
USA [14]	МП1: ARIMA	<i>MAPE</i> = 27,77
	МП2: ANNs	<i>MAPE</i> = 32,54
	МП3: WT (wavelet transform)	<i>MAPE</i> = 25,70
Spain [26]	МП1: ARIMA	<i>MAPE</i> = 17,43
	МП2: ARIMA—GARCH	<i>MAPE</i> = 17,39
	МП3: WT—ARIMA	<i>MAPE</i> = 10,45

тров, комбинирование разнородных составляющих, введение поправочных коэффициентов) лишь в отдельных случаях ведёт к определённому повышению точности прогнозирования.

Формулировка задачи исследований. При построении модели прогнозирования цен РСВ принимаем следующие положения:

прогнозируемая величина зависит от некоторого набора независимых факторов с заданной вероятностью;

для проведения численного анализа доступны исторические данные в объёмах, позволяющих производить необходимый набор операций в рамках статистического анализа; ограниченное изменение основных влияющих факторов относительно прошлых периодов.

Построение статистических МП представляется в настоящее время наиболее актуальным не только в связи с доминированием по числу публикаций, накопленному опыту исследований, но и по уровню проработки аналитических изысканий. Построение статистической модели можно схематично представить в виде нескольких этапов, начиная с предварительного анализа и определения необходимости предобработки временных рядов (ВР) цен на электроэнергию, что связано во многом со спецификой ценообразования в данной области. Используемые на данном этапе приёмы достаточно универсальны, практически не зависят от специфики функционирования национальных рынков электроэнергии и, как правило, включают первичное взятие разности ряда [11], центрирование ряда [12], удаление резких выбросов [13], сглаживание скачков [12], применение операции логарифмирования над данными [13—19, 21, 22], учёт периодичности данных во временных рядах (внутри-суточной, суточной, сезонно-климатической, по типу отопительного сезона и др.) с применением различных методик [16, 21—23], включая, в частности, вейвлет-преобразование [24, 26].

По результатам анализа на первом этапе выбирается тип искомой модели прогноза, а в рамках избранного типа (например, статистические модели) определяется их класс. Следует отметить, что при прогнозировании цены электроэнергии нашли применение практически все классы статистических моделей: *AR*-модели [12, 23], *ARMA*-модели [10, 18, 25], *ARIMA*-модели [13—15, 17, 19, 26, 27], *ARFIMA*-модели [20, 22], а также частные производные от перечисленных моделей типа *ARCH*, *GARCH*, *EGARCH*, *GIGARCH* и др. [10, 13, 17—20, 22, 25, 26], что видно также из приведённого обзора в табл. 1.

Среди моделей статистического типа широко распространена авторегрессионная мо-

дель скользящего среднего (*ARMA*) [5, 9]. *ARMA*-модели имеют чёткое математико-статистическое обоснование, что делает их одними из наиболее научно обоснованных моделей из всего множества моделей прогнозирования. Ещё одним преимуществом является формализованная и наиболее подробно разработанная методика, следуя которой можно подобрать модель, наиболее подходящую к каждому конкретному ВР. Процедура проверки модели на адекватность достаточно хорошо формализована. Рассмотрим основные составляющие *ARMA*-модели.

Первая составляющая — авторегрессионная модель *AR* (p) порядка p :

$$y_t = \varphi_0 + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (6)$$

где y_t — уровень временного ряда в момент времени t ; $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$ — уровни ВР в соответствующие моменты времени $t-1, t-2, \dots, t-p$; p — глубина исторического ряда; $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ — оцениваемые коэффициенты; ε_t — случайный остаток, учитывающий влияние переменных, не вошедших в модель (6); коэффициент φ_0 определяет постоянный уровень ряда и связан с математическим ожиданием временного процесса $\mu = Ex[y]$.

Включение второй составляющей — модели скользящего среднего (*MA*) приводит к модели *ARMA* (p, q) вида

$$y_t = \varphi_0 + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \omega_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t. \quad (7)$$

Применение к историческому ряду оператора разности $\Delta^d y_t$ d -го порядка ($\Delta^1 y_t = y_t - y_{t-1}$ есть разность первого порядка) приводит к переходу к модели *ARIMA* (p, d, q) при сохранении формы модели *ARMA* (p, q):

$$\Delta^d y_t = \varphi_0 + \sum_{i=1}^p \varphi_i \Delta^d y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \omega_i \Delta^d \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (8)$$

где $\varepsilon_t \leftrightarrow N(0, \sigma_t^2)$.

Последовательность значений получаемого исходного ряда в форме *ARIMA* (p, d, q)-модели после интегрирования ряда образует *ARMA* (p, q)-модель.

Процесс прогнозирования, как указано ранее, включает разные этапы, а алгоритм состоит из множества операций. Однако операции достаточно хорошо формализуемы и допускают применение известных многочисленных программных продуктов (*R*-язык, *MatLab*, *SciPy*, *MS Excel*, *SAS*, *STATISTICA*), что позволяет автоматизировать процесс мо-

делирования, избежать ошибок, связанных с вводом данных и т. д. Среди множества существующих вариантов выбран пакет *STATISTICA*, который является комплексным аналитическим инструментом, предназначенным для построения прогнозов в любых областях, используя различные методы прогнозирования. Опубликовано множество руководств и инструкций по использованию той или иной функции в составе пакета. *STATISTICA* содержит модуль «Временные ряды и прогнозирование» (*Time Series/Forecasting*).

В качестве примера выбран рынок электроэнергии Белгородской области. Данные находятся в открытом доступе *TIME2SAVE* [8]. Для построения модели взяты данные за 2016 и 2017 гг. от гарантирующего поставщика ОАО «Белгородэнергосбыт». Данные сведены в таблицу, в которой на каждый час каждого дня одного месяца указана ставка на электрическую энергию предельного уровня нерегулируемых цен для группы «Иные прочие потребители». Под фактической ставкой указаны средневзвешенная стоимость, стоимость услуги по передаче, сбытовая надбавка гарантирующего поставщика и инфраструктурные платежи. Файл с данными содержит в себе 6 вкладок, включая вкладку «4ЦК» (четвёртая ценовая категория), в которой отображены цены для объёмов покупки электрической энергии (мощности), в отношении которых за расчётный период осуществляется почасовой учёт. Стоимость услуг по передаче электрической энергии определяется по тарифу на услуги по передаче электрической энергии в двухставочном выражении. Так как прогноз строится на РСВ, то для построения модели цены использовались её среднесуточные значения. Такие данные были сгруппированы помесечно в 24 таблицах (с января 2016 г. по декабрь 2017 г.) по числу дней 731. Для оценки точности прогноза по построенной модели дополнительно были получены с оптового рынка данные за январь 2018 г.

Удалось получить точность прогноза по модели *ARIMA* (1, 1, 1) (0, 1, 1) 9,5 % по *MAPE* на 30 первых дней отопительного сезона 2018 г. (рис. 1, табл. 2). В работе [6] достаточно подробно изложен процесс построения указанной модели прогноза.

Следует отметить, что достигнутый уровень точности прогнозирования цены на РСВ по Белгородской области (*MAPE* = 9,5 %) в целом соответствует данным табл. 1 по зарубежным рынкам. Результат прогнозирования оказался приемлемым, но была сделана попытка улучшить прогноз за счёт учёта фактора сезонности — отопительный и неопотительный

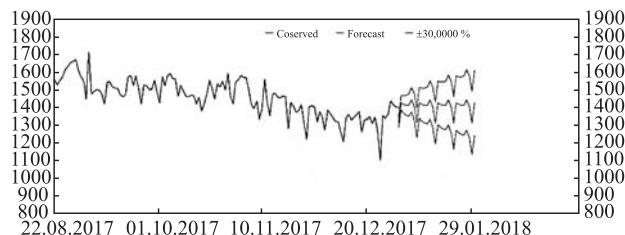


Рис. 1. Результат прогноза по модели *ARIMA* (0,1,0) на фрагменте интервала отопительного сезона (январь 2018 г.), ошибка *MAPE* = 9,5 %

Таблица 2

Точность прогноза на январь 2018 г.

Дата	Значение	Прогноз	<i>MAPE</i>
01.01.2018	1096,9646	1327,97727	0,210592658
02.01.2018	1341,2429	1246,82336	0,070397062
03.01.2018	1464,2858	1343,07619	0,082777308
04.01.2018	1519,2104	1329,69579	0,124745474
05.01.2018	1459,8367	1322,60678	0,094003587
06.01.2018	1428,0154	1319,46098	0,076017689
07.01.2018	1390,2595	1363,01241	0,01959833
08.01.2018	1442,5413	1316,16635	0,087605747
09.01.2018	1469,6058	1235,01243	0,159630151
10.01.2018	1437,2833	1331,26527	0,073762814
11.01.2018	1406,1471	1317,88487	0,062768835
12.01.2018	1344,0708	1310,79586	0,02475686
13.01.2018	1351,9929	1307,65006	0,032798143
14.01.2018	1279,2079	1351,20149	0,056279802
15.01.2018	1387,0658	1304,35542	0,059629766
16.01.2018	1393,8154	1223,20151	0,122407821
17.01.2018	1530,8592	1319,45435	0,138095538
18.01.2018	1454,7354	1306,07395	0,102191415
19.01.2018	1461,9483	1298,98494	0,111470012
20.01.2018	1462,1433	1295,83914	0,11374001
21.01.2018	1390,8617	1339,39056	0,037006632
22.01.2018	1485,9467	1292,5445	0,130154179
23.01.2018	1457,5421	1211,39058	0,174544568
24.01.2018	1471,1221	1307,64342	0,11112515
25.01.2018	1387,7225	1294,26302	0,067347383
26.01.2018	1444,9463	1287,17401	0,109189002
27.01.2018	1384,8521	1284,02821	0,072804794
28.01.2018	1263,4583	1327,57964	0,050750628
29.01.2018	1461,9800	1280,73357	0,123973259
30.01.2018	1415,7779	1199,57966	0,152706335

сезон. Для этого из всей выборки данных за 2016—2017 гг. сформированы две выборки по критерию сезонности: (январь — март) и (октябрь — декабрь), (апрель — сентябрь). Для примера взята зимняя выборка (январь — март) и (октябрь — декабрь). Размерность исследуемой выборки — 365 значений.

Полученная в результате модель *ARIMA* (1, 1, 1) (0, 1, 2) обеспечила снижение ошибки прогнозирования на отопительный период до значения $MAPE = 6,14 \%$, что соответствует наилучшим значениям обзора результатов по опубликованным в настоящее время данным (см. табл. 1) и это достигнуто без дополнительных попыток усложнить исходную МП.

Предпринятые дальнейшие попытки повысить точность прогноза (например, за счёт учёта дня недели), оставаясь в рамках выбранного типа и структуры статистической МП и изложенные, в частности, в работе [6], не привели к положительному результату.

Отсюда можно сделать вывод о целесообразности привнесения в модели прогноза дополнительной информации, что можно исполнить посредством введения соответствующего изменения механизма формирования прогноза, который бы учитывал существенно влияющие факторы на ценообразование.

Исследование факторов влияния на формирование цены. В конечной цене на электроэнергию в европейской части России (первая ценовая зона) можно выделить основные составляющие:

- топливный фактор (цена газа, угля);
- экономический фактор (курс валют);
- климатический фактор (метеорологические условия, температурный режим);
- фактор спроса (объём потребления);
- фактор предложения (объём генерации).

Основное внимание при прогнозе цены на электроэнергию следует обратить на цены газа и угля, так как их рост или падение будут напрямую влиять на конечную цену электроэнергии.

Цена на газ. Проанализировать цены на уголь не представляется возможным, так как данные не публикуются в открытом доступе. Цены на газ доступны [7], поэтому они рассмотрены за 2016 и 2017 гг. и отсортированы по сезонам и дням недели аналогично данным по цене на электроэнергию. Приведя массивы данных к единому масштабу времени, стало возможным проследить корреляцию между данными. Анализ корреляции показал, что взаимосвязь значений незначительна. Согласно шкале Чеддока, полученное значение корреляции ($-0,212$) говорит об отрицательной слабой корреляции, а следовательно, приведённое ранее предположение не подтвердилось.

Курс валют. В данной работе рассмотрен курс евро, так как на многих электростанциях установлено газотурбинное оборудование зарубежного производства. Например, на Белгородской ТЭЦ имеются два газотурбинных энергоблока на базе газовой турбины LM 2500 + DLE

HSPT производства General Electric (США). Эти турбины требуют технического обслуживания, поставки запчастей, что оплачивается в евро, поэтому курс евро влияет на цену электроэнергии. Анализ корреляции дал положительный результат. Значение коэффициента, равное 0,489, говорит о средней величине корреляции, поэтому данный фактор может быть выбран для дальнейшего исследования.

Метеорологические условия. Погодные условия, значения выработки и потребления электроэнергии, а значит цены электроэнергии связаны между собой, что также в значительной степени зависит от конкретного региона и определяется сложившейся структурой генерации и структурой потребления электроэнергии. Однако полученное значение коэффициента корреляции 0,313 говорит о наличии относительно слабой связи. Возможно, что это объясняется тем, что исследование производилось только на интервале отопительного сезона, когда температура воздуха в Белгородской области в этот период не имеет значительных колебаний.

Спрос и предложение. Объём потребления и объём генерации имеют прямое влияние на цену электроэнергии, так как формирование цены на РСВ происходит на пересечении кривых спроса и предложения. Но так как данные по этим факторам, обычно направляемые в виде заявок в НП АТС, не публикуются в открытом доступе, то их анализ не проводился.

Метод прогнозирования по агрегированной посредством искусственной нейронной сети (ИНС) модели. Под термином «агрегированная модель» будем понимать модель прогнозирования, где совокупность факторов, сценариев и событий накладывается на исторические данные прогнозируемой выборки. Одним из условий эффективности такого комбинирования является низкая корреляция ошибок моделей, реализующих индивидуальные прогнозы. Так как формализовать сценарии и события довольно сложно, в агрегированной модели в качестве составных частей принимается влияние каждого отдельно фактора на прогнозные значения.

Для того чтобы сделать прогноз наиболее точным и не усложнять модель, необходимо выбрать факторы, существенно влияющие на изменение основной исследуемой переменной — цены на электроэнергию. Для этого на основе результатов исследования влияющих факторов на примере Белгородской области сделаем соответствующие выводы:

цена на природный газ практически не имеет влияния на цену электроэнергии, хотя Белгородская ТЭЦ работает на газовых турби-

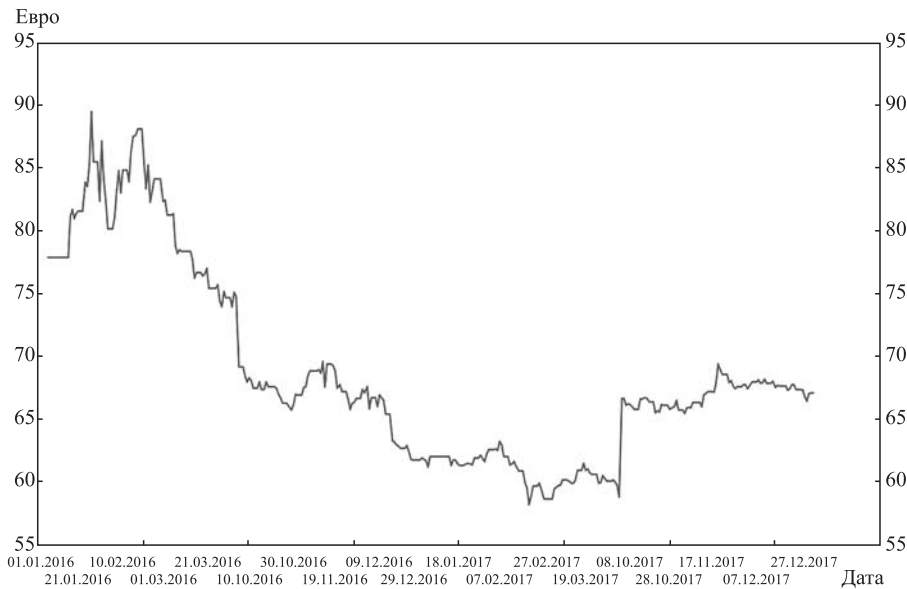


Рис. 2. Исторические данные среднесуточных значений курса евро к рублю

нах (это можно объяснить наличием в достатке природного газа в промышленных зонах городов центральной России);

температура воздуха в рассматриваемые периоды 2016 и 2017 гг. слабо влияла на цену электроэнергии;

курс евро является наиболее значимым фактором, что объясняется, в частности, существенными затратами на поддержание работоспособности электростанций, оснащённых импортным оборудованием.

После проведённых исследований влияющими факторами будем считать температуру воздуха и курс евро. Чтобы активировать агрегированную модель, необходимо составить прогноз выбранных факторов с использованием *ARIMA*-модели. Период прогнозирования факторов разбиваем на отопительный (январь — март) и (октябрь — декабрь) и неотапливаемый (апрель — сентябрь) периоды, так как на приведённые факторы день недели не оказывает сильного влияния, как это было в эксперименте прогнозирования цен электроэнергии с использованием только *ARIMA*-модели на выборке за 2 года. Размерность выборки по отопительному сезону — 365 значений.

Прогноз среднесуточных значений курса евро к рублю за 2016—2017 гг. в отопительный период. Визуальный анализ временного ряда (рис. 2) определил, что график ВР ломаный и разделён на три части резкими переходами. Это обусловлено выборкой данных отопительного сезона. Каждая из трёх частей графика имеет свои особенности: в январе 2016 г. большой разброс значений; с февраля 2016 г. по март 2017 г. некоторый нисходящий тренд в период; с ноября 2017 г. достаточно ровный график.

Для проверки и визуального анализа предположения о периоде сезонности построим периодограмму и сформируем таблицу по ней для численной иллюстрации (рис. 3).

Из периодограммы (рис. 3, а) видно, что наиболее существенное значение имеет наблюдение 364. Это значение не учитывается, так как оно последнее (общее количество наблюдений 364, а не 365, поскольку для спектрального анализа необходимо чётное количество). Также выделяется значение 121, равное 4 месяцам, и значение 91, равное 3 месяцам. Ряд имеет свойство сезонности, можем считать его нестационарным.

Дополнительной проверкой на стационарность является гистограмма нормального распределения (рис. 4), откуда видно, что распределение ВР значений курса евро к рублю далеко от нормального, а автокорреляционная функция (АКФ) и частная автокорреляционная функция (ЧАКФ) (рис. 5) показывают сильную коррелированность значений, поэтому считаем ряд нестационарным.



Spectral analysis: EURO (seasonal in Лист Microsoft Excel)						
No. of cases: 364						
No.	Frequency	Period	Cosine Coeffs	Sine Coeffs	Periodogram	Density
1	0,002747	364,0000	7,04359	0,58323	9091,331	4421,171
3	0,008242	121,3333	-1,65805	0,68819	586,536	712,489
4	0,010989	91,0000	-1,49441	-0,29889	422,713	385,533
5	0,013736	72,8000	0,32451	-1,00247	202,064	243,927
11	0,030220	33,0909	-0,72568	-0,49280	140,043	75,417
6	0,016484	60,6667	-0,73768	-0,32406	118,153	133,322
13	0,035714	28,0000	-0,05713	-0,64471	76,242	51,217
2	0,005495	182,0000	0,61320	-0,08718	69,818	2379,334
7	0,019231	52,0000	-0,38582	-0,46696	66,776	70,752
17	0,046703	21,4118	0,52131	-0,18707	55,830	36,206

б)

Рис. 3. Исходная выборка:

а — периодограмма; б — таблица данных

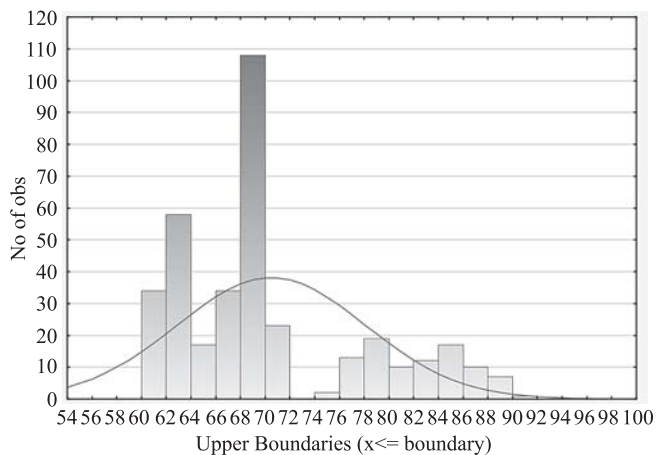


Рис. 4. Гистограмма нормального распределения

Чтобы построить прогноз значений курса евро, необходимо преобразовать ВР для приведения к стационарному и построения адекватной модели. Проведём анализ АКФ и ЧАКФ для подбора параметров *ARIMA*-модели. Гистограмма АКФ показывает сильную коррелированность значений, но не имеет явно выделенных лагов, поэтому параметр *d* определим методом подбора, начиная с *d* = 1. ЧАКФ имеет значимый первый лаг, поэтому можем принять *p* = 1. Для приведения ВР к стационарному виду применим дифференцирование с лагом 1 и преобразование значения для удаления автокорреляции лага, равного 1, с помощью функции *Autocorr* в составе пакета *STATISTICA*. После преобразования ВР (рис. б) имеет сходство с белым шумом, поэтому предположим, что ряд стационарен.

Проверим предположение о стационарности на функциях АКФ и ЧАКФ (рис. 7). Значения АКФ имеют случайный характер и ограниченную амплитуду. В ЧАКФ первый лаг перестал быть значимым, а последующие убывают в обозначенных границах, поэтому ВР можно считать стационарным.

Сделав дополнительную проверку на гистограмме нормального распределения, ещё раз убеждаемся, что ВР стационарен, так как гистограмма нормального распределения (рис. 8) показывает приближённость значений остатков к нормальному (гауссовскому) распределению.

Убедившись, что ряд стационарен, была получена модель *ARIMA* (1, 1, 1)(1, 0, 1) и

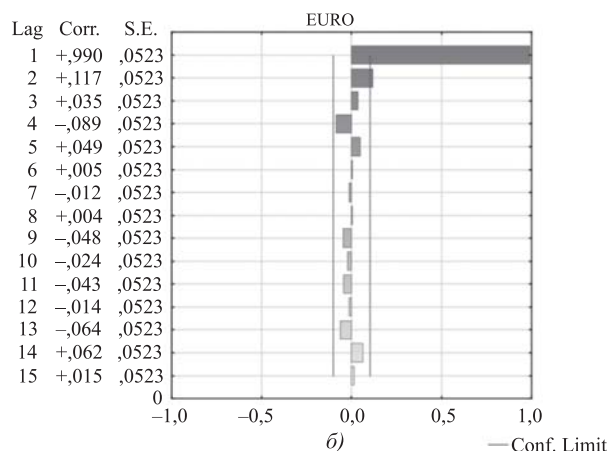
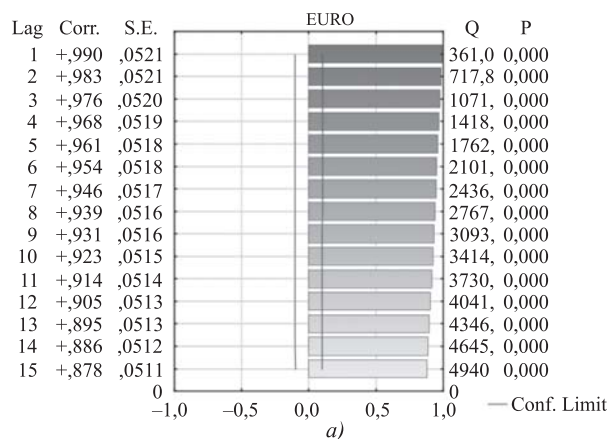


Рис. 5. Исходная выборка:

а — АКФ; б — ЧАКФ

проверена её адекватность по анализу АКФ и ЧАКФ для остатков. Достигнута достаточно хорошая точность прогнозирования значений курса евро к рублю в отопительный период января 2018 г. (*MAPE* = 0,81 %).

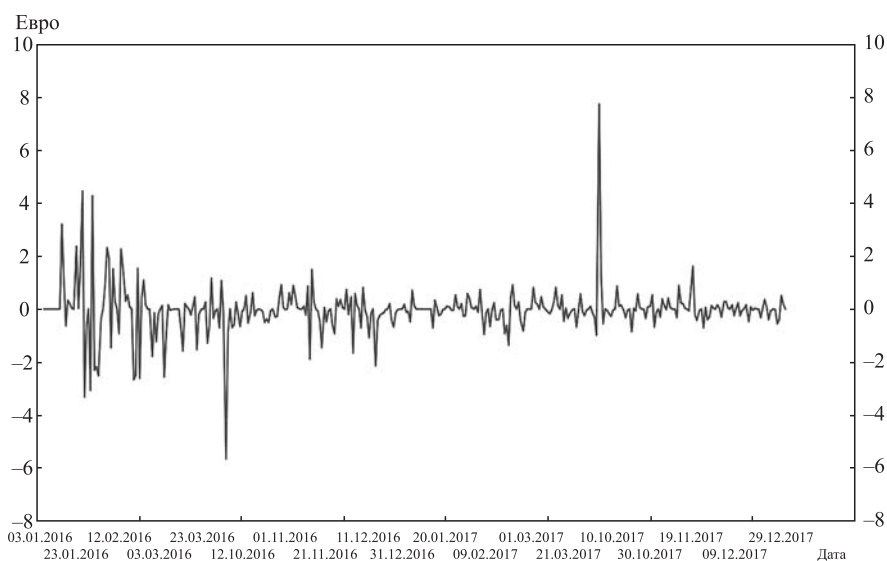


Рис. 6. Преобразованные исторические данные курса евро к рублю

Прогноз среднесуточной температуры воздуха за 2016—2017 гг. в отопительный период. Построенная по тому же алгоритму модель прогноза среднесуточной температуры в отопительный период оказалась неэффективной ($MARE = 77\%$), так как температуру воздуха и другие природные явления довольно трудно предсказать даже на непродолжительный период времени.

Схема прогнозирования по агрегированной модели предполагает использование искусственной нейронной сети (ИНС) как средства

учёта влияющих факторов в прогнозных значениях основной переменной. Для этого необходимо выбрать факторы, оказывающие наибольшее влияние на изменение основной исследуемой переменной — цены на электроэнергию. В качестве такого фактора ранее определён курс евро к рублю. Таким образом, на входе агрегирующей модели в форме ИНС в качестве входа (типа «input») используется выход построенной модели прогноза значения курса евро к рублю, а в качестве второго входа (типа «target») выступают прогнозные значения, полученные по модели цены электроэнергии.

Эффективность нейросетевой модели повышается, если диапазоны изменения входных и выходных величин приведены к некоторому интервалу, например, $[0, 1]$, т. е. произведено масштабирование. Конструирование ИНС состоит в синтезе её архитектуры (число слоёв и число нейронов в каждом слое). Структура ИНС формируется до начала обучения, поэтому успешное решение этой задачи во многом определяется опытом и искусством аналитика, проводящего исследование. Далее необходимо обучение сети, которое может проводиться на основе конструктивного или деструктивного подхода. В соответствии с первым подходом обучение ИНС начинается на сети небольшого размера, который постепенно увеличивается до достижения требуемой точности по результатам тестирования. Деструктивный подход базируется на принципе «прореживания дерева», в соответствии с которым из сети с заведомо избыточным объёмом постепенно удаляют «лишние» нейроны и примыкающие к ним связи. Этот подход даёт возможность исследовать влияние удалённых связей на точность сети. Процесс обучения ИНС представляет собой уточнение значений весовых коэффициентов для отдельных узлов на основе постепенного увеличения объёма входной и выходной информации. Началу обучения должна предшествовать процедура выбора функции активации нейронов, учитывающая характер решаемой задачи. В частности, в трёхслойных перцептронах на нейронах скрытого слоя в большинстве случаев применяется логистическая функция, а тип передаточной функции нейронов выходного слоя определяется на основе анализа результатов вычислительных экспериментов на сети. Индикатором обучаемости ИНС может служить гистограмма значений межнейронных связей.

Для построения ИНС использованы возможности пакета MatLab, достоинства и недостатки которого хорошо известны. Для улучшения прогноза выбран Network Fitting Tool, который конструирует двухслойную однона-

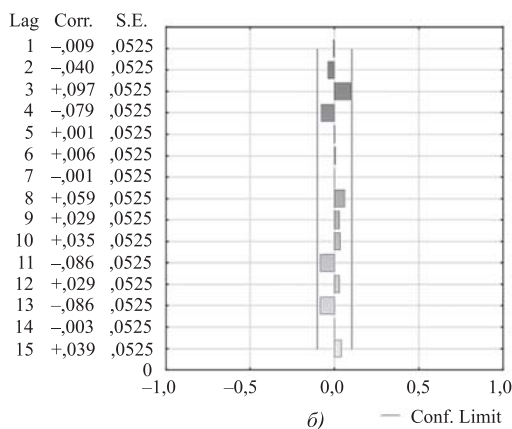
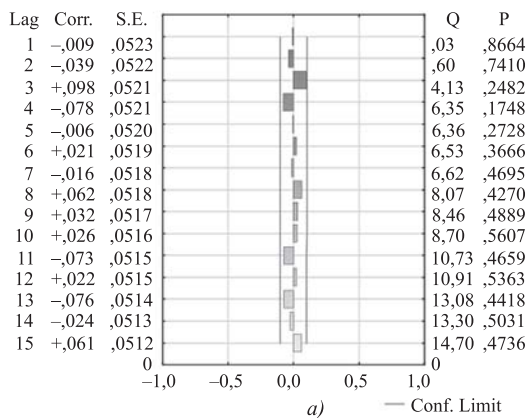


Рис. 7. Преобразованная выборка:
а — АКФ; б — ЧАКФ

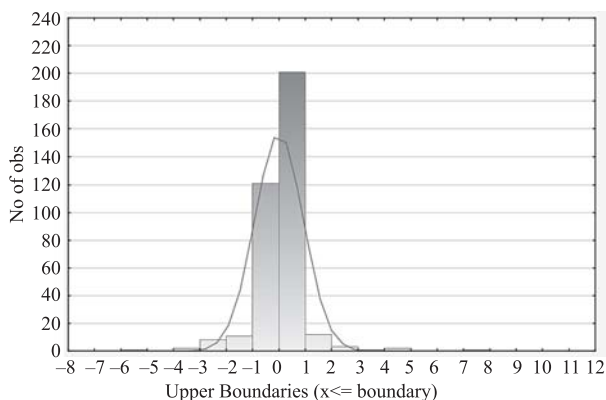


Рис. 8. Гистограмма нормального распределения преобразованного BP

правленную сеть с сигмоидальной функцией активации нейронов скрытого слоя нейронов и линейной функцией активации нейронов выходного слоя (создаётся функцией `fitnet`).

Сеть обучалась методом обратного распространения ошибки с использованием алгоритма Байесовской регуляризации. Проводилось распределение набора данных между обучающим набором (Training), проверочным набором (Validation), которые используются для оценки обобщающих свойств сети и остановки обучения, когда обобщение прекращает улучшаться, и тестовым множеством (Testing), не оказывающим влияния на обучение, но служащим для проверки качества обучения на данных, которые не использовались в обучении сети. На основе экспертных знаний, заложенных в MatLab, оптимальным соотношением для нашей задачи с размерностью выборки 30 является 70 — 15 — 15 %, что и было принято.

Наиболее широко используемая ИНС является сетью прямого распространения с двумя слоями, сигмоидальной функцией активации в первом слое и линейной функцией активации в выходном слое [28]. В результате серии экспериментов наилучший результат получился с числом нейронов в скрытом слое, равным 8.

Сохранённые результаты можно посмотреть и проанализировать в рабочей области MatLab, а также увидеть ошибку прогнозирования ($MAPE = 4,79\%$) (рис. 9).

Таким образом, за счёт введения в рассмотрение агрегированной модели прогноза на основе ИНС ошибка прогнозирования $MAPE$ цены электроэнергии на отопительный пе-

риод на примере Белгородской области была снижена с 6,14 до 4,79 %.

Выводы. Посредством построения *ARIMA*-моделей прогноза цены на электроэнергию на примере Белгородской области по варьируемым выборкам достигнута ошибка ($MAPE = 6,14\%$), что соответствует лучшим результатам из обзора зарубежных источников.

Показано, что точность прогнозирования цены электроэнергии существенно зависит от специфики структуры производства и потребления электроэнергии отдельных стран и регионов, а наращивание сложности статистических моделей за счёт усложнения структуры, количества искомых параметров, комбинирования разнородных составляющих, введения поправочных коэффициентов лишь в отдельных случаях ведёт к определённому повышению точности прогнозирования.

Предложенные в работе подходы и решения по привнесению в модели прогноза дополнительной информации исполнены посредством изменения механизма формирования прогноза, который учитывает факторы, существенно влияющие на основную прогнозируемую переменную. Введена в рассмотрение агрегированная модель прогноза с использованием ИНС в качестве инструмента свёртки отдельных моделей влияющих факторов и модели основной переменной.

Алгоритм построения агрегированной модели включает в себя три основных этапа: формирование исходных выборок данных, построение *ARIMA*-моделей прогноза изменения факторов и основной переменной, а также формирование агрегированной модели прогноза на основе свёртки предсказанных временных рядов посредством встроенной ИНС.

Эффективность использования агрегированной модели прогноза с применением ИНС подтверждается существенным повышением точности прогнозирования, что на рассмотренном примере по Белгородской области составило изменение с 6,14 до 4,7 % по ошибке $MAPE$.

Библиографические ссылки

1. Поршнев С.В., Соломаха И.В. Исследование методов анализа и прогнозирования технологической информации, собираемой информационными системами тепловых электрических станций. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 208 с.
2. Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации / под общ. ред. О.Г. Баркина. 3-е изд., М., 2017. 523 с.
3. Смирнова Е.О. Решение задачи прогнозирования цен на электроэнергию на рынке «На сутки вперёд» эконометрическими методами. Иркутский гос. ун-т, Инст. математики, экономики и

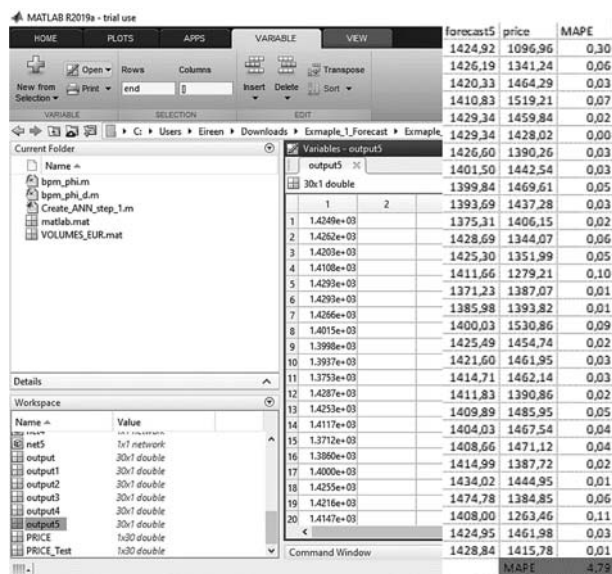


Рис. 9. Результаты предсказания по агрегированной модели прогнозирования, $MAPE = 4,79\%$

информатики [Электронный ресурс]. Режим доступа: smirnovygen-91@mail.ru (дата обращения: 10.07.2019)

4. **Шихин В.А., Павлюк Г.П.** Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 39—45.

5. **Дуброва Т.А.** Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.

6. **Kim B., Zhang Y., Schaar M., Lee J.** Dynamic pricing and energy consumption scheduling with reinforcement learning // IEEE Transactions on smart grid. 2016. Vol. 7. No. 5. P. 2187—2198.

7. **Динамика** цены на природный газ для Европы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.calc.ru/dinamika-Gas.html> (дата обращения: 10.07.2019).

8. **База** тарифов на электроэнергию [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://time2save.ru/calculaters/nereguliruemie-ceni-na-elektroenergiu> (дата обращения: 10.07.2019).

9. **Дробыш И.И.** Статистические модели прогнозирования цен на оптовых рынках электроэнергии: российский и зарубежный опыт // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Экономика и менеджмент. 2017. Т. 11. № 3. С. 41—54.

10. **Liu H., Shi J.** Applying ARMA—GARCH Approaches to Forecasting Short-term Electricity Prices // Energy Economics. 2013. Vol. 37. P. 152—166.

11. **Чучуева И.А.** Модель экстраполяции по максимуму подобия (ЭМП) для временных рядов цен и объемов на рынке на сутки вперед ОРЭМ (Оптовом рынке электроэнергии и мощности) [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2010. № 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/135870.html> (дата обращения: 10.07.2019).

12. **Weron R., Misiolek A.** Forecasting Spot Electricity Prices: A Comparison of Parametric and Semiparametric Time Series Models // International Journal of Forecasting. 2008. Vol. 24. P. 744—763.

13. **Nogales F., Contreras J., Conejo A., Espinola R.** Forecasting Next-day Electricity Prices by Time Series models // IEEE Transactions on power systems. 2002. Vol. 17. No. 2. P. 342—348.

14. **Conejo A., Contreras J., Espinola R., Plazas M.** Forecasting Electricity Prices for a Day-ahead Pool-based Electric Energy Market // International Journal of Forecasting. 2005. Vol. 21. P. 435—462.

15. **Contreras J., Espinola R., Nogales F., Conejo A.** ARIMA Models to Predict Next-day Electricity Prices // IEEE Transactions on power systems. 2003. Vol. 18. No. 3. P. 1014—2020.

16. **Cuaresma J., Hlouskova J., Kossmeier S., Obersteiner M.** Forecasting Electricity Spot-prices Using Linear Univariate Time-series Models // Applied Energy. 2004. Vol. 77. P. 87—106.

17. **Diongue A., Guégan D., Vignal B.** Forecasting Electricity Spot Market Prices with a k-factor GIGARCH Process // Applied Energy. 2009. Vol. 86. P. 505—510.

18. **Garcia R., Contreras J., Akkeren M., Garcia J.** A GARCH Forecasting Model to Predict Day-ahead Electricity Prices // IEEE Transactions on power systems. 2005. Vol. 20. No. 2. P. 867—874.

19. **García-Martos C., Rodríguez J., Sánchez M.** Modelling and Forecasting Fossil Fuels, CO₂ and Electricity Prices and their Volatilities // Applied Energy. 2013. Vol. 101. P. 363—375.

20. **Gianfreda A., Grossi L.** Forecasting Italian Electricity Zonal Prices with Exogenous Variables // Energy Economics. 2012. Vol. 34. P. 2228—2239.

21. **Higgs H., Worthington A.** Stochastic Price Modeling of High Volatility, Mean-reverting, Spike-prone Commodities: The Australian Wholesale Spot Electricity Market // Energy Economics. 2008. Vol. 30. P. 3172—3185.

22. **Koopman S., Ooms M., Carnero M.** Periodic Seasonal Reg-ARFIMA-GARCH Models for Daily Electricity Spot Prices // Journal of the American Statistical Association. 2007. Vol. 102. No. 477. P. 16—27.

23. **Karakatsani N., Bunn D.** Forecasting Electricity Prices: The Impact of Fundamentals and Time-varying Coefficients // International Journal of Forecasting. 2008. Vol. 24. P. 764—785.

24. **Kim C., Yu I., Song Y.** Prediction of System Marginal Price of Electricity Using Wavelet Transform analysis // Energy Conversion and Management. 2002. Vol. 43. P. 1839—1851.

25. **Knittel C., Roberts M.** An Empirical Examination of Restructured Electricity Prices // Energy Economics. 2005. Vol. 27. P. 791—817.

26. **Tan Z., Zhang J., Wang J., Xu J.** Day-ahead Electricity Price Forecasting Using Wavelet Transform Combined with ARIMA and GARCH Models // Applied Energy. 2010. Vol. 87. P. 3606—3610.

27. **Ширяев А.Н.** Основы стохастической финансовой математики. Т. 1. Факты. Модели. М.: ФАЗИС, 1998. 174 с.

28. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс — Москва, 2006. 85 с.

Ссылка для цитирования

Коченгин А.Е., Шихина А.В., Ягодкина Т.В. Агрегированная модель прогноза цены на рынке электроэнергии // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 3. С. 134—144. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-3-134-144.

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 25.12.2019.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 20.02.2020.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Авансед 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