



Основан в январе 1990 г.
Выходит один раз в квартал

2014
№ 1–2

Серия
«Естественные и технические науки»

ВЕСТНИК МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель – федеральное
государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального
образования «Мордовский
государственный университет
им. Н. П. Огарёва»

Founder – Federal
state-financed academic
institution of
higher education
«Ogarev Mordovia
State University»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

EDITORIAL BOARD

- С. М. Вдовин** – главный редактор, кандидат
экономических наук
С. В. Полутин – заместитель главного редактора,
доктор социологических наук, профессор
С. В. Гордина – ответственный секретарь,
кандидат педагогических наук
П. В. Сенин – научный руководитель серии
«Естественно-технические науки», доктор
технических наук, профессор
А. Ю. Маслова – научный руководитель серии
«Гуманитарные, социально-экономические и
общественные науки», доктор филологических
наук, профессор
Н. Ш. Ватолкина – координатор международно-
го совета, кандидат экономических наук, доцент

- S. M. Vdovin** – *Editor in chief*, Kandidat Nauk
(PhD) degree holder in Economic sciences
S. V. Polutin – *Deputy editor in chief*, Doktor nauk
degree holder in sociological sciences, professor
S. V. Gordina – *Executive editor*, Kandidat Nauk
(PhD) degree holder in Pedagogic sciences
P. V. Senin – *scientific supervisor of «Engineering
and Natural Sciences» series*, Doktor Nauk degree
holder in Engineering sciences, professor
A. Ju. Maslova – *scientific supervisor
of «Humanitarian, Economic and Social
Sciences» series*, Doktor Nauk degree holder
in philologic sciences, professor
N. Sh. Vatkina – *international council
coordinator*, Kandidat Nauk (PhD) degree holder
in Economic sciences, docent

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору в сфере
связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство ПИ № ФС77-54869 от 26 июля 2013 г.

Подписной индекс в каталоге Агентства "Роспечать" **70539**

Адрес редакции:

430005, Россия, Республика Мордовия,
г. Саранск, ул. Большевикская, 68.
Телефон, факс: +7 (8342) 48-14-24.

Editors office address:

68, Bolshevistskaya Str., 430005, Saransk,
Republic of Mordovia, Russia.
Telephone, fax: +7 (834-2) 48-14-24.

E-mail: vestnik_mrsu@mail.ru, inted@mail.ru

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Серия «Естественные и технические науки»

Ф. Т. Агеев – д.мед.н., профессор (Москва, Россия) • **Е. И. Алексеева** – д.мед.н., профессор (Москва, Россия)
В. Н. Анисимов – д.мед.н., профессор (Москва, Россия) • **Л. А. Балькова** – д.мед.н., профессор (Саранск, Россия)
Г. А. Бояринов – д.мед.н., профессор (Н. Новгород, Россия) • **И. В. Гуляев** – д.т.н., профессор (Саранск, Россия)
К. Г. Гуревич – д.мед.н., профессор (Москва, Россия) • **Е. М. Дианов** – д.ф.-м.н., профессор, действ. чл. РАН (Москва, Россия)
А. А. Еровиченков – д.мед.н., профессор (Москва, Россия) • **В. Т. Ерофеев** – д.т.н., профессор (Саранск, Россия)
О. Е. Железникова – к.т.н., доцент (Саранск, Россия) • **Л. А. Игумнов** – д.ф.-м.н., профессор (Н. Новгород, Россия)
В. И. Калашников – д.т.н., профессор (Пенза, Россия) • **А. П. Калинин** – д.мед.н., профессор, чл.-кор. РАН (Москва, Россия)
В. Н. Кечемайкин – к.э.н., доцент (Саранск, Россия) • **А. А. Котляров** – д.мед.н., профессор (Обнинск, Россия)
В. З. Кучеренко – д.мед.н., профессор, чл.-кор. РАН (Москва, Россия) • **А. В. Котин** – д.т.н., профессор (Саранск, Россия)
М. Ю. Ледванов – д.мед.н., профессор (Москва, Россия) • **Ю. Б. Липманов** – д.мед.н., профессор, чл.-кор. РАН (Томск, Россия)
В. И. Мидленко – д.мед.н., профессор (Ульяновск, Россия) • **Л. М. Макаров** – д.мед.н., профессор (Москва, Россия)
В. А. Маргулис – д.ф.-м.н., профессор (Саранск, Россия) • **С. А. Микаева**, д.т.н., профессор (Москва, Россия)
К. Н. Нищев – к.ф.-м.н., доцент (Саранск, Россия) • **С. Я. Новиков** – д.ф.-м.н., профессор (Самара, Россия)
Ю. Н. Прытков – д.с.-х.н., профессор (Саранск, Россия) • **В. В. Ревин** – д.б.н., профессор (Саранск, Россия)
В. А. Скрябин – д.т.н., профессор (Пенза, Россия) • **И. И. Чучаев** – к.ф.-м.н., доцент (Саранск, Россия)
А. А. Ямашкин – д.т.н., профессор (Саранск, Россия)

Серия «Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки»

В. И. Андреев – д.п.н., профессор (Казань, Россия) • **Н. М. Арсентьев** – д.и.н., профессор, чл.-кор. РАН (Саранск, Россия)
Н. В. Буренина – д.фил.н., доцент (Саранск, Россия) • **Е. Я. Бурилина** – д.филос.н., профессор (Самара, Россия)
П. А. Гагаев – д.п.н., профессор (Пенза, Россия) • **Н. Д. Гуськова** – д.э.н., профессор (Саранск, Россия)
В. В. Знаков – д.псх.наук, профессор (Москва, Россия) • **Г. В. Ившина** – д.п.н., профессор (Казань, Россия)
Г. Б. Кошарная – д.соц.н., профессор (Пенза, Россия) • **В. И. Крусс** – д.ю.н., профессор (Тверь, Россия)
М. И. Ломшин – д.п.н., к.фил.н., профессор (Саранск, Россия)
Н. П. Макаркин – д.э.н., профессор (Саранск, Россия) • **В. Г. Маралов** – д.псх.н., профессор (Череповец, Россия)
В. В. Маркин – д.соц.н., профессор (Москва, Россия) • **Ю. А. Мишанин** – д.фил.н., профессор (Саранск, Россия)
С. Г. Пилипенко к.ю.н., доцент (Саранск, Россия) • **И. Е. Поверинов** – к.соц.н., доцент (Саранск, Россия)
О. Ю. Рыбаков – д.ю.н., профессор (Москва, Россия) • **Т. А. Салимова** – д.э.н., профессор (Саранск, Россия) •
Ф. А. Селезнев – д.и.н., профессор (Нижегород, Россия) • **А. С. Сенявский** – д.и.н., профессор (Москва, Россия)
Т. Н. Сидоркина – кандидат культурологии, доцент (Саранск, Россия) • **Ю. Н. Сушкова** – д.и.н., доцент (Саранск, Россия)
Л. В. Табаченко – д.фил.н., доцент (Ростов-на-Дону, Россия) • **Е. М. Тукалова-Орланская** – д.ю.н., профессор (Уфа, Россия)
Р. Л. Хачатуров – д.ю.н., профессор (Тольятти, Россия) • **О. В. Шиняева** – д.соц.н., профессор (Ульяновск, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Аллахвердиев Сурхай Рагим оглы, профессор кафедры лесной индустрии Бартынского государственного университета, доктор биологических наук, профессор (Бартын, Турция)

Бобрышев Юрий Вениаминович, старший научный сотрудник кафедры анатомии медицинского факультета Университета Нового Южного Уэльса, доктор биологических наук, профессор (Сидней, Австралия)

Булгаков Алексей Григорьевич, профессор Института строительного дела Дрезденского технического университета, доктор технических наук, профессор (Дрезден, Германия)

Бурбулис Наталия, директор Института биологии и биотехнологии растений, научный руководитель лаборатории Агробиотехнологии при Университете им. Александра Стулгинска, доктор биомедицинских наук, профессор (Каунас, Литва)

Ганс Гуски, член сообщества патологии г. Потсдама, доктор наук, профессор (Берлин, Германия)

Джефф Томас Кристи, директор Департамента по делам несовершеннолетних округа Вашингтон штата Орегон, доктор наук (степень присуждена Питтсбургским университетом) (Хилсборо, США)

Духовские Повилас, заведующий лабораторией физиологии растений Института садоводства и овощеводства Литовского научного центра аграрных и лесных наук, действительный член АН Литвы, хабилитированный доктор, профессор (Бабтай, Литва)

Кусмарцев Федор Васильевич, декан физического факультета Университета Лафборо, кандидат физико-математических наук (Лафборо, Великобритания)

Лайко Ирина Михайловна, старший научный сотрудник, заведующий отделом селекции и семеноводства конопли опытной станции лубяных культур Института сельского хозяйства Северо-востока Национальной академии аграрных наук Украины, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Глухов, Украина)

Милан Радованович, директор Географического института «Jovan Cvijić» Сербской академии наук и искусств, профессор (Белград, Сербия)

Пачаманов Ангел Саракинов, профессор Технического университета Софии, доктор инженерии, профессор (София, Болгария)
Преображенский Владимир Леонидович, главный научный сотрудник Научного центра волновых исследований Института общей физики РАН, профессор Центральной (инженерной) школы Лилля, доктор физико-математических наук, профессор (Лилль, Франция)

Райко Буквич, профессор Географического института «Jovan Cvijić» Сербской академии наук и искусств, доктор экономических наук, профессор (Белград, Сербия)

Руппел Оливер, профессор юридического факультета Университета Стеленбош, доктор права (Стеленбош, ЮАР)

Серяков Иван Степанович, академик сельского и лесного хозяйства Латвии, заведующий кафедрой свиноводства и мелкого животноводства УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Могилев, Белоруссия)

Сосунов Александр Алексеевич, Колумбийский университет, департамент нейрохирургии, доктор медицинских наук, профессор (Нью Йорк, США)

Яновский Олег Антонович, кандидат исторических наук, профессор, заведующий кафедрой истории России Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь)

Янош Пустан, директор Института «Collegium Fennougricum», доктор филологических наук, профессор (Сомбатгей, Венгрия)

EDITORIAL BOARD

«Engineering and Natural Sciences» series

- F. T. Ageev – d.med.sc., professor (Moscow, Russia) • E. I. Alekseeva – d.med.sc., professor (Moscow, Russia)
 V. S. Anisimov – d.med.sc., professor (Moscow, Russia) • L. A. Balykova – d.med.sc., professor (Saransk, Russia)
 G. A. Bojarinov – d.med.n, professor (N. Novgorod, Russia) • I. V. Guljaev – d.t.sc., professor (Saransk, Russia)
 K. G. Gurevich – d.med.sc., professor (Moscow, Russia) • E. M. Dianov – d.ph.-m.sc., professor, member-corr. of RAS (Moscow, Russia)
 A. A. Erovičenko – d.med.sc., professor (Moscow, Russia) • V. T. Erofeev – d.t.sc., professor (Saransk, Russia)
 O. E. Zheleznikova – k.t.sc., docent (Saransk, Russia) • L. A. Igumnov – d.ph.-m.sc., professor (N. Novgorod, Russia)
 V. I. Kalashnikov – d.t.sc., professor (Penza, Russia) • A. P. Kalinin – d.med.sc., professor, member-corr. of RAMS (Moscow, Russia)
 V. N. Kechemajkin – k.nat.sc., docent (Saransk, Russia) • A. A. Kotljarov – d.med.sc., professor (Obninsk, Russia)
 V. Z. Kucherenko – d.med.sc., professor, chl.-kor. RAMN (Moscow, Russia) • A. V. Kotin – d.t.sc., professor (Saransk, Russia)
 M. Ju. Ledvanov – d.med.sc., professor (Moscow, Russia) • Ju. B. Lishmanov – d.med.sc., professor, member-corr. of RAMS (Tomsk, Russia)
 V. I. Midlenko – d.med.sc., professor (Ul'janovsk, Russia) • L. M. Makarov – d.med.sc., professor (Moscow, Russia)
 V. A. Margulis – d.ph.-m.sc., professor (Saransk, Russia) • S. A. Mikaeva, d.t.sc., professor (Moscow, Russia)
 K. N. Nishhev – k.ph.-m.sc., docent (Saransk, Russia) • S. Ja. Novikov – d.ph.-m.sc., professor (Samara, Russia)
 Ju. N. Prytkov – d.agr.sc., professor (Saransk, Russia) • V. V. Revin – d.b.sc., professor (Saransk, Russia)
 V. A. Skrbabin – d.t.sc., professor (Penza, Russia) • I. I. Chuchaev – k.ph.-m.sc., docent (Saransk, Russia)
 A. A. Jamashkin – d.g.sc., professor (Saransk, Russia)

«Humanitarian, Economic and Social Sciences» series

- V. I. Andreev – d.p.sc., professor (Kazan', Russia) • N. M. Arsent'ev – d.h.sc., professor, member-corr. of RAS (Saransk, Russia)
 N. V. Burenina – d.phil.sc., docent (Saransk, Russia) • E. Ja. Burlina – d.filos.sc., professor (Samara, Russia)
 P. A. Gageev – d.p.sc., professor (Penza, Russia) • N. D. Gus'kova – d.je.sc., professor (Saransk, Russia)
 V. V. Znakov – d.ps.nauk, professor (Moscow, Russia) • G. V. Ivshina – d.p.sc., professor (Kazan', Russia)
 G. B. Kosharnaja – d.soc.sc., professor (Penza, Russia) • V. I. Kruss – d.ju.sc., professor (Tver', Russia)
 M. I. Lomshin – d.p.sc., c.phil.sc., professor (Saransk, Russia)
 N. P. Makarkin – d.je.sc., professor (Saransk, Russia) • V. G. Maralov – d.ps.sc., professor (Cherepovec, Russia)
 V. V. Markin – d.soc.sc., professor (Moscow, Russia) • Ju. A. Mishanin – d.phil.sc., professor (Saransk, Russia)
 S. G. Pilipenko – k.ju.sc., docent (Saransk, Russia) • I. E. Poverinov – k.soc.sc., docent (Saransk, Russia)
 O. Ju. Rybakov – d.ju.sc., professor (Moscow, Russia) • T. A. Salimova – d.je.sc., professor (Saransk, Russia) •
 F. A. Seleznev – d.i.sc., professor (N. Novgorod, Russia) • A. S. Senjavskij – d.i.sc., professor (Moscow, Russia)
 T. N. Sidorkina – k.cult., docent (Saransk, Russia) • Ju. N. Sushkova – d.h.sc., docent (Saransk, Russia)
 L. V. Tabachenko – d.phil.sc., docent (Rostov-na-Donu, Russia) • E. M. Tuzhilova-Ordanskaja – d.ju.sc., professor (Ufa, Russia)
 R. L. Hachaturov – d.ju.sc., professor (Tol'jatti, Russia) • O. V. Shinjaeva – d.soc.sc., professor (Ul'janovsk, Russia)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

- Allahverdiev Surhaj Ragim oglu, head of Forest Industry chair of Bartın University, doktor nauk degree holder in biology, professor (Bartın, Turkey)
 Bobryshev Jurij Veniaminovich, senior research associate of School of Medical Sciences, Faculty of Medicine, University of New South Wales, doktor nauk degree holder in biology, professor (Sydney, Australia)
 Bulgakov Aleksej Grigor'evich, professor of Faculty of Architecture of Dresden University of Technology, doktor nauk degree holder in engineering, professor (Dresden, Germany)
 Burbulis Natalija, director of Institute of Rural Culture, research adviser of Agrobiotechnology laboratories of Aleksandras Stulginskis University, doktor nauk degree holder in medicine, professor (Kaunas, Lithuania)
 Gans Guski, Potsdam Pathology community member, doktor nauk degree holder in medicine, professor (Berlin, Germany)
 Jozeph Thomas Christie, director of Juvenile Department, Washington Co., Oregon, philosophy doctor degree holder (Hillsborough, USA)
 Duhovskis Povilas, head of Plant Physiology Laboratories of Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, fellow of Lithuanian Academy of Sciences, Dr. habil., professor (Babtai, Lithuania)
 Kusmarcev Fedor Vasil'evich, dean of Institute Physics Loughborough University, kandidat nauk in physico-mathematical sciences (Loughborough, Great Britain)
 Lajko Irina Mihajlovna, senior research associate, head of Hemp Breeding and Seedage of experimental station of textile plants of Institute of Bast Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, doktor nauk degree holder in agriculture, professor (Gluhov, Ukraine)
 Milan Radovanovich, director of Geographic institute «Jovan Cvijic» of Serbian academy of sciences and arts, professor (Belgrad, Serbia)
 Pachamanov Angel Sarakinov, professor of Technical University of Sofia, doktor nauk degree holder in engineering, professor (Sofia, Bulgaria)
 Preobrazhenskij Vladimir Leonidovich, chief research associate of Academic Center of Wave Researches of General Physics Institute of RAS, professor of the Ecole Centrale de Lille, doktor nauk degree holder in physic-mathematical sciences, professor (Lille, France)
 Rajko Bukvich, professor of Geographic institute «Jovan Cvijic» of Serbian academy of sciences and arts, doktor nauk degree holder in economy, professor (Belgrad, Serbia)
 Ruppel Oliver, professor of law faculty of Stellenbosch University, philosophy doctor degree holder in juridical sciences (Stellenbosch, Republic of South Africa)
 Serjakov Ivan Stepanovich, academician of Agriculture and Forestry of Latvia, head of Pig Breeding and Small Livestock of Belarusian State Agricultural Academy, doktor nauk degree holder in agriculture, professor (Mogilev, Belarus)
 Sosunov Aleksandr Alekseevich, Columbia University, department of neurosurgery, doktor nauk degree holder in medicine, professor (New York, USA)
 Janovskij Oleg Antonovich, kandidat nauk degree holder in history, professor, head of Russian history chair of Belorussia State University (Minsk, Belarus)
 Janosh Pustai, director of «Collegium Fenno-Ugricum» Institute, doktor nauk degree holder in philosophy, professor (Szombathely, Hungary)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

А. О. Щукина, Ю. С. Куракина, М. Н. Ершков, С. А. Солохин, С. Н. Сметанин. Генерация излучения в синей области спектра при нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd-излучения на длине волны 1,34 мкм	12
В. В. Андреев. Синтез наноструктур на поверхности твердых тел в поле лазерного излучения слабой интенсивности	17
В. И. Чепурнов. Кинетические особенности формирования гетероструктур β -SiC / Si методом эндотаксии	28
Г. В. Шилова, П. Г. Зверев, Л. И. Ивлева. Генерация второй гармоники в порошках кристаллов ниобата бария стронция	43
Н. Е. Фомин, В. И. Ивлев, В. А. Юдин. Влияние примесей на электросопротивление меди и алюминия	50

ХИМИЯ

Л. А. Живечкова, А. А. Самсонкин, Е. Е. Мурюмин, М. К. Пряничникова, Е. П. Коновалова, Б. С. Танасейчук. О дегидрирующих свойствах 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2H-имидазола)	58
А. А. Буртасов, М. К. Пряничникова, Е. В. Безрукова, Л. Г. Тихонова, Б. С. Танасейчук. Константы диссоциации димеров 2-(п-аллилоксифенил)- и 2-(п-пропаргилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолилов	64
Б. С. Танасейчук, А. И. Азрапкина, Ю. А. Маркелова, Е. Е. Мурюмин, М. К. Пряничникова. Синтез и свойства 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола	69

СВЕТОТЕХНИКА

И. И. Байнева, В. В. Байнев. Аспекты разработки энергоэффективных светотехнических изделий для решения задач повышения энергосбережения	76
А. А. Горбунов. Разработка способа измерения количества ртути в люминесцентных лампах диаметром 16 мм	81
А. А. Горьков. Моделирование вводных устройств светящихся панелей на основе светодиодной оптики	85
О. Е. Железникова, С. А. Амеликина, Л. В. Синицына, М. П. Куликова. Исследование условий светодиодного освещения	89
А. А. Ашрятов. Об особенностях эксплуатации компактных люминесцентных ламп	98

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Е. Н. Канинина. Актуальные вопросы подтверждения соответствия товаров для детей	104
С. А. Панфилов, В. М. Каликанов, Ю. А. Фомин, О. С. Панфилова. Анализ характеристик источников питания	107
Т. А. Попов, В. В. Родин. Устройство ввода информации в персональный компьютер	113
В. Г. Щукин. Параллельная работа инверторов с безынерционным формированием опорных синусоид	119
Ю. С. Игольников, А. А. Курганов. Развитие схемотехники выпрямителей на базе кольцевой схемы	125

МАТЕМАТИКА

- А. Г. Смольянов, Е. Г. Смольянова.** Задача отсечения и произвольное выпуклое окно132
- В. Д. Ширяев, Е. В. Анощенко.** Игра с «линией жизни». Случай поточной встречи139

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- М. В. Чугунов, А. В. Щёкин.** Моделирование и анализ элементов механических передач в среде SOLIDWORKS на базе API148
- И. Ф. Душин, С. Е. Маскайкина, Н. И. Полушина, Н. Г. Ваваева.** Прочностный расчет корпуса шестеренного насоса с использованием SOLIDWORKS SIMULATION154
- А. В. Щёкин, С. П. Сульдин, Э. В. Митин.** Постпроцессор системы ЧПУ «МАЯК 600Т» для САМ-приложения «Модуль ЧПУ. Токарная обработка»161
- А. М. Коленченко, Е. Н. Коленченко.** Управление потоками информации в локальной промышленной сети гибкого автоматического производства165

МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ

- И. И. Байнева, В. В. Байнев.** Автоматизированная система для разработки энергоэффективных световых приборов171
- И. В. Гуляев, А. В. Волков.** Разработка метода управления серийными преобразователями для реализации электропривода на базе асинхронизированного вентильного двигателя177
- Ю. С. Игольников, О. Ю. Герман.** Разработка микропроцессорной системы управления шестиступенчатого компенсатора реактивной мощности182
- А. С. Князьков, Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин.** Повышение эффективности функционирования самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез путем использования адаптивных энергоэффективных рабочих органов186
- М. А. Спирина, И. В. Бойнова, П. В. Зеленцов.** Влияние внутрисосудистого лазерного облучения крови на липидный метаболизм в ткани головного мозга при перитонеальном эндотоксикозе195

Редакторы *Т. А. Чужайкина, Л. А. Пудовкина*
 Перевод *О. Ю. Малышева, Н. Н. Плеханковой*
 Компьютерная верстка *А. С. Полутина*
 Информационная поддержка *Р. В. Карасева*

Подписано в печать 5.05.14. Формат 70 × 100 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 16,42.

Тираж 200 экз. Заказ № 594. Свободная цена.

Типография Издательства Мордовского университета
 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, 24

CONTENTS

PHYSICS

A. O. Schukina, Y. S. Kurakina, M. N. Ershkov, S. A. Solokhin, S. N. Smetanin. Lasing in the blue spectral range by the nonlinear frequency conversion of a Nd:YAG laser radiation at a wavelength of 1,34 μm	12
V. V. Andreev. Synthesis of nanostructures on solid surfaces in the field of weak laser irradiation	17
V. I. Tchepurnov. Concentration of single defects in the Si-phase including SiC-phase, formation of endotax method of semiconductor heterostructure	28
G. V. Shilova, P. G. Zverev, L. I. Ivleva. Second harmonic generation in powdered strontium barium niobate crystals	43
N. E. Fomin, V. I. Ivlev, V. A. Yudin. Effect of impurities on the electrical resistivity of copper and aluminum	50

CHEMISTRY

L. A. Zhivechkova, A. A. Samsonkin, E. E. Muryumin, M. K. Pryanichnikova, E. P. Konovalova, B. S. Tanaseichuk. On the dehydrating properties of 2,2'-(anthracene-9,10- diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole)	58
A. A. Burtasov, M. K. Pryanichnikova, E. V. Bezrukova, L. G. Tichonova, B. S. Tanaseichuk. The constants of dissociation of dimers 2-(p-allyloxyphenyl)- and 2-(p-propargyloxyphenyl)-4,5-diphenylimidazolyls	64
B. S. Tanaseichuk, A. I. Azrapkina, Yu. A. Markelova, E. E. Muryumin, M. K. Pryanichnikova. Synthesis and properties of 2-(9-antracenil)-4,5-diphenylimidazole	69

LIGHT ENGINEERING

I. I. Bayneva, V. V. Baynev. Development of energy efficient light devices for energy conservation improvements	76
A. A. Gorbunov. Development of a method of measuring of the amount of mercury in 16 mm tube fluorescent lamps	81
A. A. Gor'kov. Modeling of input devices of luminous panels based on LED optics	85
O. E. Zheleznikova, S. A. Amel'kina, L. V. Sinitsyna, M. P. Kulikova. Study of the conditions of LED lighting	89
A. A. Ashryatov. On specifics of employment of compact fluorescent lamps	98

ELECTRICAL ENGINEERING

E. N. Kaninina. Topical issues of conformity of goods for children	104
S. A. Panfilov, V. M. Kalikanov, Yu. A. Fomin, O. S. Panfilova. Power sources analysis	107
T. A. Popov, V. V. Rodin. Input devices for personal computers	113
V. G. Shchukin. Parallel operation of invertors with inertia-free formation of reference sinewaves	119
Yu. S. Igol'nikov, A. A. Kurganov. Development of circuitry rectifiers based on circular patterns	125

MATHEMATICS

- A. G. Smol'yanov, Ye. G. Smol'yanova.** Clipping problem and planar convex polygon132
V. D. Shiryaev, E. V. Anoshchenkova. «Life line» game. Line of pursuit meeting139

MECHANIC ENGINEERING

- M. V. Chugunov, A. V. Schekin.** 3D-modeling and analysis
for mechanical transmission elements in Solidworks software based on API148
I. F. Dushin, S. Ye. Maskaykina, N. I. Polueshina, N. G. Vavaeva.
Computer analysis for strength of case for gear pump using Solidworks simulation154
A. V. Schekin, S. P. Sul'din, E. V. Mitin. Post-processor of NC system
«Mayak 600T» for CAM-application161
A. M. Kolenchenko, E. N. Kolenchenko. Control of data flow
in the local industrial net of flexible automatic production165

YOUNG SCIENTISTS

- V. V. Baynev, I. I. Bayneva.** Automated system
for development of energy efficient light devices171
I. V. Gulyaev, A. V. Volkov. Development of methods of control of the standart
frequency converters for implementation of electric drives based on self-controlled
inverter-fed asynchronous motor177
Yu. S. Igol'nikov, O. Yu. German. Development of micro-processing control
system for six-stage reactive power compensator182
A. S. Knyaz'kov, N. I. Naumkin, V. F. Kupryashkin. Improvement of the operating effect
of small self-propelled rotary tillers by using adaptive power efficient tools186
M. A. Spirina, I. V. Boynova, P. V. Zelentsov. Influence of intravascular laser
irradiation of blood on lipid metabolism in brain tissue during peritoneal endotoxiosis
 ..195

Editors *T. A. Chuzhajkina, L. A. Pudovkina*
 Translation *O. Ju. Malyshev, N. N. Plehankova*
 Desktop publishing *A. S. Polutin*
 Informational support *R. V. Karasjov*

Signed to print 05.05.14. Sheet size $70 \times 100 \frac{1}{16}$,
 Conventional printed sheets 16,42.
 Number of copies 200. Order no. 594.

Publishing House of Mordovia State University
 24 Sovetskaya Str., 430005 Saransk, Republic of Mordovia

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Серия «Естественные и технические науки»

Медицина

Балашихов Владимир Павлович, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)
Бибнева Тамара Николаевна, кандидат медицинских наук (Москва, Россия)
Блинов Дмитрий Сергеевич, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Власов Алексей Петрович, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Герасимова Наталья Геннадьевна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Давыдкин Василий Иванович, кандидат медицинских наук, доцент (Саранск, Россия)
Еремينا Елена Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Инчина Вера Ивановна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Камаев Игорь Александрович, доктор медицинских наук, профессор (Нижний Новгород, Россия)
Кораблева Наталья Николаевна, кандидат медицинских наук, доцент (Сыктывкар, Россия)
Лещанкина Нина Юрьевна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Мозеров Сергей Алексеевич, доктор медицинских наук, профессор (Обнинск, Россия)
Моисеева Инесса Яковлевна, доктор медицинских наук, профессор (Пенза, Россия)
Мосина Лариса Михайловна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Новикова Людмила Владимировна, кандидат медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Павелкина Вера Федоровна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Пиксин Иван Никифорович, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Плотникова Надежда Алексеевна, доктор медицинских наук, профессор (Саранск, Россия)
Ураков Александр Ливиевич, доктор медицинских наук, профессор,
заслуженный изобретатель Российской Федерации (Ижевск, Россия)

Биология

Девяткин Аркадий Анатольевич, кандидат биологических наук, доцент (Саранск, Россия)
Кадималиев Давуд Али оглы, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)
Кузнецов Вячеслав Александрович, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)
Лукаткин Александр Степанович, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)
Силева Татьяна Борисовна, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)
Трофимов Владимир Александрович, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)
Шляхтин Геннадий Викторович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

Математика

Андреев Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор (Ульяновск, Россия)
Смольянов Андрей Григорьевич, кандидат физико-математических наук, доцент (Саранск, Россия)
Щенников Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор (Саранск, Россия)

Физика и химия

Васин Виктор Алексеевич, доктор химических наук, профессор (Саранск, Россия)
Зюзин Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор (Саранск, Россия)
Курков Андрей Семенович, доктор физико-математических наук, профессор (Москва, Россия)
Логунов Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор (Саранск, Россия)
Рябочкина Полина Анатольевна, доктор физико-математических наук, доцент (Саранск, Россия)
Томилин Олег Борисович, кандидат химических наук, доцент (Саранск, Россия)
Шорохов Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент (Саранск, Россия)

Технические науки

Амелькина Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Аириатов Альберт Аббасович, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Богатов Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Горбунов Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Животовский Григорий Альбертович, доктор технических наук, доцент (Нижний Новгород, Россия)
Ивлиев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Коваленко Ольга Юрьевна, доктор технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Кокинов Андрей Михайлович, доктор технических наук, профессор (Саранск, Россия)
Кудаев Сергей Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент (Саранск, Россия)
Митин Эдуард Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)
Панфилов Степан Александрович, доктор технических наук, профессор (Саранск, Россия)
Римшин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор (Москва, Россия)
Федоренко Анатолий Степанович, доктор технических наук, профессор (Саранск, Россия)
Чугунов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Саранск, Россия)

Науки о Земле

Каверин Александр Владимирович, кандидат географических наук,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
Масляев Валерий Николаевич, кандидат географических наук, доцент (Саранск, Россия)
Носонов Артур Модестович, доктор географических наук, доцент (Саранск, Россия)

Сельскохозяйственные науки

Вельматов Анатолий Павлович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)

Емельянов Сергей Владимирович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент (Саранск, Россия)
 Еряшев Александр Павлович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
 Зенкин Сергей Александрович, доктор ветеринарных наук, профессор (Саранск, Россия)
 Ивойлов Александр Васильевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
 Матяев Владимир Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
 Смолин Николай Васильевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Саранск, Россия)
 Тельцов Леонид Петрович, доктор естественных наук, профессор (Саранск, Россия)

Серия «Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки»

Экономика

Ананьев Михаил Александрович, доктор экономических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Артемьева Светлана Степановна, доктор экономических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Кормишкина Людмила Александровна, доктор экономических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Краковская Ирина Николаевна, доктор экономических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Неретина Евгения Алексеевна, доктор экономических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Осипов Владимир Иванович, доктор экономических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Полушкина Татьяна Михайловна, доктор экономических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Федоськина Людмила Александровна, кандидат экономических наук, доцент (Саранск, Россия)

Юриспруденция

Дудко Игорь Геннадьевич, доктор юридических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Емелькина Ирина Александровна, доктор юридических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Еремин Алексей Роеальдович, доктор юридических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Калинин Любовь Даниловна, кандидат юридических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Фомина Лилия Юрьевна, кандидат юридических наук (Саранск, Россия)
 Худойкина Татьяна Викторовна, доктор юридических наук, профессор (Саранск, Россия)

История, социология и философия

Богатова Ольга Анатольевна, доктор социологических наук (Саранск, Россия)
 Богатырев Эдуард Дмитриевич, доктор исторических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Гагаев Андрей Александрович, доктор философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Елдин Михаил Александрович, кандидат философских наук, доцент (Саранск, Россия)
 Емелькина Ирина Владимировна, доктор философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Изергина Нина Ивановна, доктор политических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Кистанов Сергей Васильевич, кандидат исторических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Корнишина Галина Альбертовна, доктор исторических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Мочалов Евгений Владимирович, доктор философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Новикова Надежда Львовна, доктор философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Сергеевкова Вера Васильевна, кандидат исторических наук, доцент (Минск, Республика Беларусь)
 Шапошиников Лев Евгеньевич, доктор философских наук, профессор (Нижегород, Россия)

Педагогика и психология

Андронов Владимир Петрович, доктор психологических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Винтин Игорь Анатольевич, доктор педагогических наук, кандидат философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Мешков Николай Иванович, доктор психологических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Романов Константин Михайлович, доктор психологических наук, профессор (Саранск, Россия)

Филология

Акимова Эльвира Николаевна, доктор филологических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Анашкина Ирина Александровна, доктор филологических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Антонов Юрий Григорьевич, доктор филологических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Гудкова Светлана Петровна, доктор филологических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Демин Василий Иванович, доктор филологических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Ивлева Алина Юрьевна, доктор философских наук, доцент (Саранск, Россия)
 Киржаева Вера Петровна, доктор педагогических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Клементьева Елена Филипповна, кандидат филологических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Конкина Лариса Семеновна, доктор филологических наук, профессор (Саранск, Россия)
 Кудрявцева Раисия Алексеевна, доктор филологических наук, профессор (Йошкар-Ола, Россия)
 Ракин Анатолий Николаевич, старший научный сотрудник института языка, литературы и истории Коми научно-го центра УрО РАН
 Свойкин Константин Бертольдович, доктор филологических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Филиппова Ольга Викторовна, доктор педагогических наук, доцент (Саранск, Россия)
 Фурманова Валентина Павловна, доктор педагогических наук, профессор (Саранск, Россия)

Искусствоведение и культурология

Воронина Наталья Ивановна, доктор философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Логинова Марина Васильевна, доктор философских наук, профессор (Саранск, Россия)
 Прокаева Ольга Николаевна, кандидат философских наук (Саранск, Россия)

INSTITUTE OF PUBLICATIONS PEER REVIEWING

«Engineering and Natural Sciences» series

Medicine

Balashov Vladimir Pavlovich, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saransk, Russia)
Bebneva Tamara Nikolaevna, kandidat nauk (PhD) degree holder in medical sciences (Moscow, Russia)
Blinov Dmitriy Sergeevich, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Vlasov Aleksey Petrovich, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Gerasimova Natal'ya Gennad'evna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Davydkin Vasilij Ivanovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in medical sciences, docent (Saransk, Russia)
Eremina Elena Jur'evna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Inchina Vera Ivanovna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Kamaev Igor' Aleksandrovich, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Nizhnij Novgorod, Russia)
Korableva Natal'ya Nikolaevna, kandidat nauk (PhD) degree holder in medical sciences, docent (Syktyvkar, Russia)
Leshhankina Nina Jur'evna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Mozerov Sergey Alekseevich, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Obninsk, Russia)
Moiseeva Inessa Jakovlevna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Penza, Russia)
Mosina Larisa Mihajlovna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Novikova Ljudmila Vladimirovna, kandidat nauk (PhD) degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Pavelkina Vera Fedorovna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Piksin Ivan Nikiforovich, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Plotnikova Nadezhda Alekseevna, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor (Saransk, Russia)
Uraikov Aleksandr Livievich, doktor nauk degree holder in medical sciences, professor, honorary inventor of Russian Federation (Izhevsk, Russia)

Biology

Devjatkin Arkadij Anatol'evich, kandidat nauk (PhD) degree holder in biological sciences, docent (Saransk, Russia)
Kadimaliev Davud Ali-ogly, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saransk, Russia)
Kuznecov Vjacheslav Aleksandrovich, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saransk, Russia)
Lukatkin Aleksandr Stepanovich, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saransk, Russia)
Silaeva Tat'jana Borisovna, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saransk, Russia)
Trofimov Vladimir Aleksandrovich, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saransk, Russia)
Shljahtin Gennadij Viktorovich, doktor nauk degree holder in biological sciences, professor (Saratov, Russia)

Mathematics

Andreev Aleksandr Sergeevich, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, professor (Ul'janovsk, Russia)
Smol'janov Andrej Grigor'evich, kandidat nauk (PhD) degree holder in physico-mathematical sciences, docent (Saransk, Russia)
Shennikov Vladimir Nikolaevich, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, professor (Saransk, Russia)

Physics and chemistry

Vasin Viktor Alekseevich, doktor nauk degree holder in chemical sciences, professor (Saransk, Russia)
Zjuzin Aleksandr Mihajlovich, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, professor (Saransk, Russia)
Kurkov Andrej Semenovich, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, professor (Moscow, Russia)
Logunov Mihail Vladimirovich, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, professor (Saransk, Russia)
Rjabochkina Polina Anatol'evna, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, docent (Saransk, Russia)
Tomilin Oleg Borisovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in chemical sciences, docent (Saransk, Russia)
Shorohov Aleksey Vladimirovich, doktor nauk degree holder in physico-mathematical sciences, docent (Saransk, Russia)

Engineering science

Amel'kina Svetlana Anatol'evna, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Ashrjатов Al'bert Abbjasovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Bogatov Andrej Dmitrievich, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Gorbunov Aleksey Alekseevich, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Zhivotovskij Grigorij Al'bertovich, doktor nauk degree holder in engineering sciences, docent (Nizhnij Novgorod, Russia)
Ivliev Sergey Nikolaevich, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Kovalenko Ol'ga Jur'evna, doktor nauk degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Kokinov Andrej Mihajlovich, doktor nauk degree holder in engineering sciences, professor (Saransk, Russia)
Kudaev Sergey Petrovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in physico-mathematical sciences, docent (Saransk, Russia)
Mitin Jeduard Valer'evich, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)
Panfilov Stepan Aleksandrovich, doktor nauk degree holder in engineering sciences, professor (Saransk, Russia)
Rimshin Vladimir Ivanovich, doktor nauk degree holder in engineering sciences, professor (Moscow, Russia)
Fedorenko Anatolij Stepanovich, doktor nauk degree holder in engineering sciences, professor (Saransk, Russia)
Chugunov Mihail Vladimirovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in engineering sciences, docent (Saransk, Russia)

Earth science

Kaverin Aleksandr Vladimirovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in geographical sciences, doktor nauk degree holder in agricultural sciences, professor (Saransk, Russia)
Masljaev Valerij Nikolaevich, kandidat geograficheskikh nauk, docent (Saransk, Russia)
Nosonov Artur Modestovich, doktor nauk degree holder in geographical sciences, docent (Saransk, Russia)

Agricultural science

Vel'matov Anatolij Pavlovich, doktor nauk degree holder in agricultural sciences, professor (Saransk, Russia)

Emel'janov Sergej Vladimirovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in agricultural sciences, docent (Saransk, Russia)
Erjashhev Aleksandr Pavlovich, doktor nauk degree holder in agricultural sciences, professor (Saransk, Russia)
Zenkin Sergej Aleksandrovich, doktor veterinarnykh nauk, professor (Saransk, Russia)
Ivojlov Aleksandr Vasil'evich, doktor nauk degree holder in agricultural sciences, professor (Saransk, Russia)
Matjaev Vladimir Ivanovich, doktor nauk degree holder in agricultural sciences, professor (Saransk, Russia)
Smolin Nikolaj Vasil'evich, doktor nauk degree holder in agricultural sciences, professor (Saransk, Russia)
Tel'cov Leonid Petrovich, doktor estestvennykh nauk, professor (Saransk, Russia)

«Humanitarian, Economic and Social Sciences» series

Economics

Anan'ev Mihail Aleksandrovich, doktor nauk degree holder in economic sciences, professor (Saransk, Russia)
Artem'eva Svetlana Stepanovna, doktor nauk degree holder in economic sciences, professor (Saransk, Russia)
Kormishkina Ljudmila Aleksandrovna, doktor nauk degree holder in economic sciences, professor (Saransk, Russia)
Krakovskaja Irina Nikolaevna, doktor nauk degree holder in economic sciences, docent (Saransk, Russia)
Neretina Evgenija Alekseevna, doktor nauk degree holder in economic sciences, professor (Saransk, Russia)
Osipov Vladimir Ivanovich, doktor nauk degree holder in economic sciences, professor (Saransk, Russia)
Polushkina Tat'jana Mihajlovna, doktor nauk degree holder in economic sciences, docent (Saransk, Russia)
Fedos'kina Ljudmila Aleksandrovna, kandidat nauk (PhD) degree holder in economic sciences, docent (Saransk, Russia)

Jurisprudence

Dudko Igor' Gennad'evich, doktor nauk degree holder in juridical sciences, professor (Saransk, Russia)
Emel'kina Irina Aleksandrovna, doktor nauk degree holder in juridical sciences, docent (Saransk, Russia)
Ereminev Aleksej Roal'dovich, doktor nauk degree holder in juridical sciences, professor (Saransk, Russia)
Kalinkina Ljubov' Danilovna, kandidat nauk (PhD) degree holder in juridical sciences, docent (Saransk, Russia)
Fomina Lilija Jur'evna, kandidat nauk (PhD) degree holder in juridical sciences (Saransk, Russia)
Hudojkina Tat'jana Viktorovna, doktor nauk degree holder in juridical sciences, professor (Saransk, Russia)

History, sociology and philosophy

Bogatova Ol'ga Anatol'evna, doktor nauk degree holder in sociological sciences (Saransk, Russia)
Bogatyrev Jeduard Dmitrievich, doktor nauk degree holder in historical sciences, docent (Saransk, Russia)
Gagaev Andrej Aleksandrovich, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Eldin Mihail Aleksandrovich, kandidat nauk (PhD) degree holder in philosophical sciences, docent (Saransk, Russia)
Emel'kina Irina Vladimirovna, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Izergina Nina Ivanovna, doktor nauk degree holder in political sciences, professor (Saransk, Russia)
Kistanov Sergej Vasil'evich, kandidat nauk (PhD) degree holder in historical sciences, docent (Saransk, Russia)
Kornishina Galina Al'bertovna, doktor nauk degree holder in historical sciences, professor (Saransk, Russia)
Mochalov Evgenij Vladimirovich, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Novikova Nadezhda L'vovna, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Sergeenkova Vera Vasil'evna, kandidat nauk (PhD) degree holder in historical sciences, docent (Minsk, Respublika Belarus')
Shaposhnikov Lev Evgen'evich, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Nizhnij Novgorod, Russia)

Pedagogics and psychology

Andronov Vladimir Petrovich, doktor nauk degree holder in psychological sciences, professor (Saransk, Russia)
Vintin Igor' Anatol'evich, doktor nauk degree holder in pedagogical sciences, kandidat nauk (PhD) degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Meshkov Nikolaj Ivanovich, doktor nauk degree holder in psychological sciences, professor (Saransk, Russia)
Romanov Konstantin Mihajlovich, doktor nauk degree holder in psychological sciences, professor (Saransk, Russia)

Philology

Akimova Jel'vira Nikolaevna, doktor nauk degree holder in philological sciences, docent (Saransk, Russia)
Anashkina Irina Aleksandrovna, doktor nauk degree holder in philological sciences, professor (Saransk, Russia)
Antonov Jurij Grigor'evich, doktor nauk degree holder in philological sciences, docent (Saransk, Russia)
Gudkova Svetlana Petrovna, doktor nauk degree holder in philological sciences, docent (Saransk, Russia)
Demin Vasilij Ivanovich, doktor nauk degree holder in philological sciences, professor (Saransk, Russia)
Ivleva Alina Jur'evna, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, docent (Saransk, Russia)
Kirzhaeva Vera Petrovna, doktor nauk degree holder in pedagogical sciences, docent (Saransk, Russia)
Klement'eva Elena Filippovna, kandidat nauk (PhD) degree holder in philological sciences, docent (Saransk, Russia)
Konkina Larisa Semenovna, doktor nauk degree holder in philological sciences, professor (Saransk, Russia)
Kudrjavceva Raisija Alekseevna, doktor nauk degree holder in philological sciences, professor (Joshkar-Ola, Russia)
Rakin Anatolij Nikolaevich, senior research associate of institute of language, literature and history of Komi of RAS
Svojkin Konstantin Bertol'dovich, doktor nauk degree holder in philological sciences, docent (Saransk, Russia)
Filippova Ol'ga Viktorovna, doktor nauk degree holder in pedagogical sciences, docent (Saransk, Russia)
Furmanova Valentina Pavlovna, doktor nauk degree holder in pedagogical sciences, professor (Saransk, Russia)

Art criticism and culturology

Voronina Natal'ja Ivanovna, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Loginova Marina Vasil'evna, doktor nauk degree holder in philosophical sciences, professor (Saransk, Russia)
Prokaeva Ol'ga Nikolaevna, kandidat nauk (PhD) degree holder in philosophical sciences (Saransk, Russia)

УДК 535.3

ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИНЕЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА ПРИ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ YAG:Nd-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,34 МКМ

**А. О. Щукина, Ю. С. Куракина, М. Н. Ершков,
С. А. Солохин, С. Н. Сметанин**

В статье представлены результаты исследования генерации излучения в синей области спектра при последовательном нелинейно-оптическом преобразовании излучения YAG:Nd³⁺-лазера на длине волны 1,34 мкм.

Ключевые слова: синее излучение, YAG:Nd³⁺-лазер, генерация суммарной частоты.

LASING IN THE BLUE SPECTRAL RANGE BY THE NONLINEAR FREQUENCY CONVERSION OF A ND:YAG LASER RADIATION AT A WAVELENGTH OF 1,34 MM

**A. O. Schukina, Y. S. Kurakina, M. N. Ershkov,
S. A. Solokhin, S. N. Smetanin**

In the paper we are presenting the experimental results of the blue-laser generation by nonlinear frequency conversion of Nd³⁺:YAG laser on the 1,34 μm wavelength. Blue radiation at the wavelength of 0,446 μm was realized by sum-frequency oscillation under nonlinear mixing of radiation at wavelengths of the main (1,34 μm) and the second (0,67 μm) harmonics in DKDP crystal. It is shown that pulse energy of the blue radiation achieved 2 mJ with pulse duration of 20 ns and conversion efficiency of 2 %.

Keywords: blue radiation, YAG:Nd³⁺-laser, sum-frequency oscillation.

Исследование и разработка твердотельных лазеров с длиной волны в сине-голубой области спектра представляют большой интерес для решения различных практических задач лазерной техники. Это связано с тем, что излучение с длиной волны около 450 нм попадает в минимум поглощения морской воды [6] и может эффективно использоваться для подводной лазерной локации, батиметрии и связи [1–2], а также когерентной накачки твердотельных лазеров на ионах празеодима Pr³⁺ для получения генерации в видимой области [8].

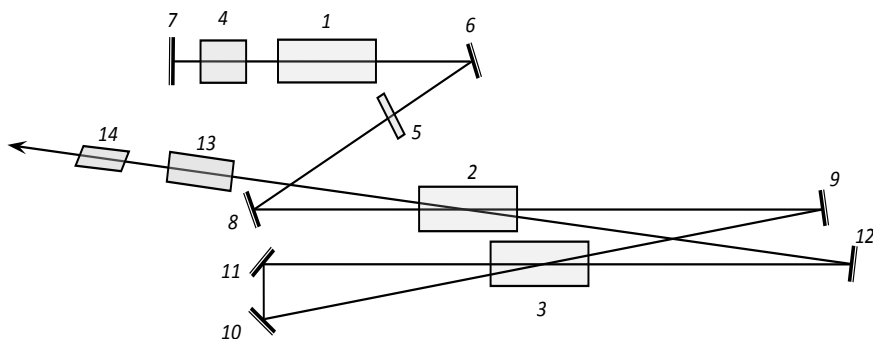
В настоящее время особый интерес представляют полностью твердотельные лазеры, которые позволяют реализовать генерацию синего излучения с высокой пиковой мощностью и малой длительностью отдельного импульса [3–5; 7], а также обладают достаточно высокой эффективностью, компактностью и надежностью. Применяется два основных метода для получения синего излучения: первый основан на методе генерации второй гармоники лазеров, работающих по квазитрехуровневой схеме, таких как Ti:Al₂O₃ [4] и Nd:GdVO₄ [3]; вто-

© Щукина А. О., Куракина Ю. С., Ершков М. Н., Солохин С. А., Сметанин С. Н., 2014

рой заключается в генерации суммарной частоты, в том числе третьей гармоники, лазеров, работающих по четырехуровневой схеме [5–7]. Данный метод представляется более перспективным, поскольку квазитрехуровневые лазеры менее эффективны, а в случае $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазера используется исключительно лазерная накачка (лазер на парах меди или вторая гармоника на длине волны 532 нм Nd:YAG-лазера).

В нашей работе представлены результаты генерации синего излучения при последовательном нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd - лазерного излучения на длине волны неосновного перехода 1,34 мкм во вторую (0,67 мкм) и третью гармоники (0,446 мкм). Оптическая схема экспериментальной лазерной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из трех основных элементов: задающего генератора, усилительного каскада и нелинейно-оптического преобразователя частоты. В задающем генераторе использовался активный YAG:Nd - элемент размером $\varnothing 6,3 \times 100$ мм, установленный в квантроне К-301 В. В схеме использовалась ламповая накачка активных элементов (энергия накачки на квантрон – до 60 Дж, длительность импульсов накачки – 250 мкс, частота следования импульсов – 2 Гц). Для исключения развития генерации на длине волны 1,064 мкм применили V – образную схему резонатора, используя плоское спектрально-селективное зеркало 6 (коэффициент отражения на длине волны 1,34 мкм $R_{1,34} > 99\%$, коэффициент отражения на длине волны

1,064 мкм $R_{1,064} < 1\%$). Коэффициент отражения выходного 5 и концевой 7 зеркал резонатора составил соответственно 50 % и 100 % на длине волны 1,34 мкм, длина резонатора – около 30 см. Для модуляции добротности использовали пассивный лазерный затвор (ПЛЗ) 4 на кристалле YAG:V размером $\varnothing 6,3 \times 4$ мм с начальным пропусканием 59 %. Усилительный каскад был составлен из двух YAG:Nd - активных элементов (АЭ) 2 и 3 размером $\varnothing 6,3 \times 130$ мм. Торцы активных элементов и ПЛЗ были просветлены на длине волны 1,064 мкм. Для исключения возможной завязки генерации, торцы активных элементов усилителей разводились друг относительно друга на угол около 1° к оптической оси. Параметры накачки усилителей устанавливались аналогично параметрам задающего генератора. Система зеркал 8–12 с коэффициентами отражения $R_{1,34} > 99\%$ и $R_{1,064} < 1\%$ обеспечивала двухпроходную схему усиления излучения. Нелинейно-оптический преобразователь состоял из двух последовательно установленных кристаллов. Для генерации второй гармоники на длине волны 0,67 мкм мы использовали кристалл LiNbO_3 размером $8 \times 10 \times 20$ мм. Генерация суммарной частоты в синей спектральной области на длине волны 0,446 наблюдалась в кристалле DKDP диаметром ~ 20 мм и длиной 60 мм, торцы которого были срезаны под углом 18° к оси для оптимального выполнения фазового синхронизма. Торцы нелинейных кристаллов не имели просветляющих покрытий.



Р и с. 1. Оптическая схема лазерной установки: 1, 2, 3 – YAG:Nd-активные элементы; 4 – ПЛЗ ($T_0 = 59\%$); 5–7 – зеркала резонатора; 8–12 – система зеркал усилителя; 13 – LiNbO_3 , 14 – DKDP

В нашей работе были исследованы параметры лазерной генерации на следующих длинах волн: накачки (1,34 мкм), второй гармоники (0,67 мкм) и суммарной частоты (0,446 мкм). Энергетические характеристики излучения регистрировались с помощью измерителя мощности и энергии Ophir. Временные параметры измерялись лавинным фотодиодом ЛФД-2А, подключенным к осциллографу Agilent 350 MGz.

Без использования дополнительных элементов излучение на выходе задающего генератора являлось близким к одномодовому и вертикально поляризованным. Порог генерации наблюдался при энергии накачки, близкой к 28 Дж. При изменении энергии накачки до 50 Дж генерировался один импульс длительностью около 20 нс с энергией до 16 мДж. При максимальной энергии накачки (60 Дж) излучались два импульса аналогичной длительности и периодом следования порядка 30 мкс. Энергия излучения при этом достигла 20 мДж. Для ее увеличения была использована двухпроходная схема усиления. При энергии накачки, равной 50 Дж, на выходе усилителя максимальное значение энергии импульса достигло 94 мДж, что соответствовало общему усилению на длине волны 1,34 мкм около 6. Зависимости энергии излучения на выходе генератора и усилителя от энергии накачки на квантрон представлены на рис. 2.

Излучение с выхода усилителя направлялось в нелинейный кристалл LiNbO_3 для генерации второй гармоники на длине волны 0,67 мкм. С увеличением энергии накачки энергия красного излучения варьировалась от 8,5 до 20,5 мДж (рис. 3). Эффективность преобразования при этом оставалась практически постоянной и превышала 21 % (рис. 4). В результате нелинейного смещения излучений на длинах волн 1,34 и 0,67 мкм в кристалле DKDP генерация излучения сум-

марной частоты наблюдалась в синей области спектра. Максимальное значение энергии излучения на длине волны 0,446 мкм составило почти 2 мДж (рис. 3), что соответствует пиковой мощности импульса 100 кВт. Зависимость энергетической эффективности преобразования от энергии излучения на длине волны 1,34 мкм представлена на рис. 4. Из графика видно, что по мере перехода в область насыщения наблюдается последовательный рост эффективности преобразования. При этом его максимальное значение являлось недостаточно высоким (около 2 %). Это связано с существенным различием интенсивностей импульсов складываемых излучений основной и второй гармоник на длинах волн 1,34 и 0,67 мкм: 16,6 и 3,6 МВт/см² соответственно. Следовательно, для повышения энергетических параметров излучения на длине волны 0,446 мкм необходимо повысить интенсивность красного излучения посредством дополнительной фокусировки излучения, а также повышения эффективности преобразования во вторую гармонику с помощью внутрирезонаторной схемы преобразования.

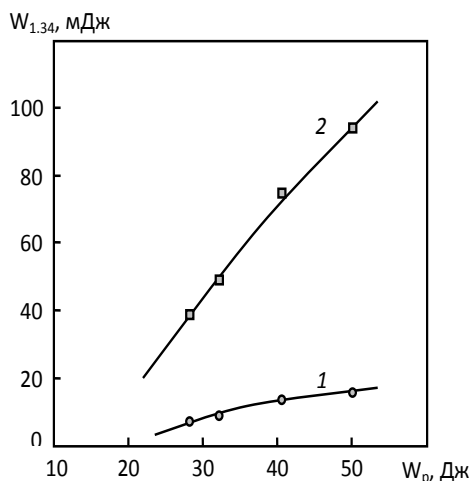


Рис. 2. Зависимость энергии излучения на длине волны 1,34 мкм от энергии накачки на квантрон: 1 — на выходе генератора, 2 — на выходе усилителя

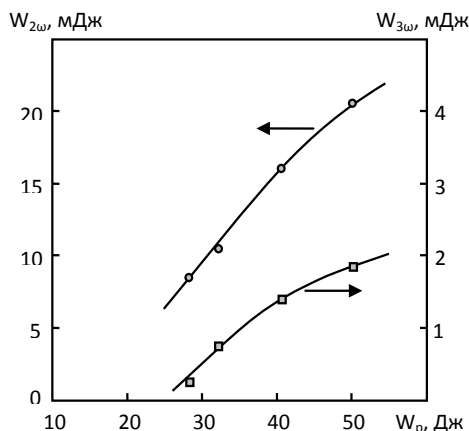


Рис. 3. Зависимость энергии излучения кратных гармоник от энергии накачки на квантрон

Таким образом, нами были проведены исследования генерации в синей области спектра при последовательном нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd-лазерного излучения на длине волны, рав-

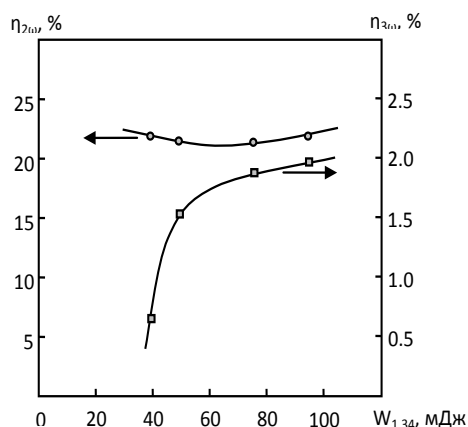


Рис. 4. Зависимость эффективности преобразования во вторую и третью гармоники от энергии импульса на длине волны 1,34 мкм

ной 1,34 мкм. В ходе исследований было установлено, что энергия излучения на длине волны 0,446 мкм достигает 2 мДж при длительности импульса 20 нс и эффективности преобразования 2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Борейшо, А. С.** Лазеры : Устройство и действие : учебное пособие / А. С. Борейшо. – Санкт-Петербург : Изд-во механ. ин-та, 1992. – 215 с.
2. **Карасик, В. Е.** Лазерные системы видения : учебное пособие / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
3. Квazitрехуровневый Nd:GdVO₄-лазер на $\lambda = 456$ нм с диодной накачкой / Ю. Д. Заварцев [и др.] // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – № 7. – С. 651–654.
4. Перестраиваемый импульсно-периодический конвертор в синей области спектра с накачкой лазером на парах меди / М. А. Казарян [и др.] // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 9. – С. 773–774.
5. Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals / Peng Haibo [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2006. – Vol. 14. – № 14. – P. 6543–6549.
6. **Hale, G. M.** Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region / G. M. Hale, M. R. Querry // Appl. Opt. – 1973. – № 12. – P. 555–563.
7. Pulsed blue laser at 491 nm by Nonlinear Cavity Dumping / E. Herault [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16. – № 24. – P. 19419–19426.
8. Visible cw laser emission of GaN-diode pumped Pr:YAlO₃ crystal / M. Fibrich [et al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – № 97. – P. 363–367.

Поступила 20.10.2013 г.

Об авторах:

Шукина Анна Олеговна, студент ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), anna_shukina92@mail.ru

Куракина Юлия Сергеевна, студент ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), anastill@gmail.com

Ершков Михаил Николаевич, доцент кафедры лазерной физики и технологии, ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), ershkovm@yandex.ru

Солохин Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и технологии, ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), SolokhinS@gmail.com

Сметанин Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики и технологии, ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева» (г. Ковров, Россия), ssmetanin@bk.ru

Для цитирования: Генерация излучения в синей области спектра при нелинейно-оптическом преобразовании YAG:Nd-излучения на длине волны 1,34 мкм / А. О. Щукина [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 12–16.

REFERENCES

1. Boreysho A. S. Lazery: Ustrojstvo i dejstvie [Lasers: arrangement and operation], textbook. St. Petersburg, Mechanical Institute Publ., 1992, 215 p.
2. Karasik V. E., Orlov V. M. Lazernye sistemy videnija [Laser vision systems], textbook. Moscow, Bauman Moscow State Technical Publ., 2001, 352 p.
3. Zavartsev Yu. D., Zagumennyi A. I., Zerrouk F., Kutovoi S. A., Mikhailov V. A., Podreshetnikov V. V., Sirotkin A. A., Shcherbakov I. A. Nd:GdVO₄-lazer na $\lambda = 456$ nm s diodnoj nakachkoj [Diode-pumped quasi-three-level 456-nm Nd:GdVO₄ laser]. *Kvantovaja elektronika* – Quantum Electronics. 2003, vol. 33, no. 7, pp. 651 – 654.
4. Kazaryan M. A., Kruzhlov S. V., Lyabin N. A., Mokrushin Yu. M., Parfenov V. A., Prokhorov A. M., Shakin O. V. Perestraivamyj impul'sno-periodicheskiy konvertor v sinej oblasti spektra s nakachkoj lazerom na parah medi [Tunable pulse-periodic converter operating in the blue part of the spectrum and pumped by a copper vapour laser]. *Kvantovaja elektronika* – Quantum Electronics. 1998, vol. 28, no. 9, pp. 751 – 752.
5. Haibo Peng, Wei Hou, Yahui Chen, Dafu Cui, Zuyan Xu. Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals. *Optics Express*. 2006, vol. 14, no. 14, pp. 6543 – 6549.
6. Hale G. M., Querry M. R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region. *Applied Optics*. 1973, no. 12, pp. 555 – 563.
7. Herault E., Lelek M., Balembois F., Georges P. Pulsed blue laser at 491 nm by Nonlinear Cavity Dumping. *Optics Express*. 2008, vol. 16, no. 24, pp. 19419 – 19426.
8. Haibo Peng, Wei Hou, Yahui Chen, Dafu Cui, Zuyan Xu. Generation of 7.6-W blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals. *Optics Express*. 2006, vol. 14, no. 14, pp. 6543 – 6549.

About the authors:

Shukina Anna Olegovna, student, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), anna_shukina92@mail.ru

Kurakina Yuliya Sergeyevna, student, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), anastill@gmail.com

Ershkov Mikhail Nikolayevich, associate professor (docent), Department of Laser Physics and Technology, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), ershkovm@yandex.ru

Solokhin Sergei Aleksandrovich, associate professor (docent), Department of Laser Physics and Technology chair, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, SolokhinS@gmail.com

Smetanin Sergei Nikolayevich, associate professor (docent), Department of Laser Physics and Technology, Degtyarev Kovrov State Technological Academy (Kovrov, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, ssmetanin@bk.ru

For citation: Shchukina A. O., Kurakina Ju. S., Ershkov M. N., Solokhin S. A., Smetanin S. N. Generacija izluchenija v sinej oblasti spektra pri nelinejno-opticheskom preobrazovanii YAG:Nd-izluchenija na dline volny 1,34 mkm [Lasing in the blue spectral range by the nonlinear frequency conversion of a Nd:YAG laser radiation at a wavelength of 1,34 μ m]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 12 – 16.

СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СЛАБОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В. В. Андреев

В статье представлены результаты исследования образования неоднородных пространственно-временных структур в адсорбционном слое на однородной поверхности диэлектрика, полупроводника или металла в результате нетеплового воздействия лазерного излучения относительно слабой интенсивности.

Ключевые слова: нетепловое воздействие, лазерное излучение, латеральное взаимодействие, наведенные диполи, адсорбированные частицы, однородная поверхность, диэлектрик, полупроводник, металл, неоднородные планарные структуры.

SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURES ON SOLID SURFACES IN THE FIELD OF WEAK LASER IRRADIATION

V. V. Andreev

Formation of non-uniform spatial and temporal structures in adsorption layer on the uniform surface of dielectric, semiconductor or metal is investigated. Such structures appear as result of non-thermal interaction with the laser irradiation of relatively weak intensity. The intensity of laser irradiation in cross section is distributed accordingly to the Gauss law. It is shown that spatial and temporal non-uniformities in the adsorption layer appear due to lateral interaction of dipoles, induced in adsorption particles under influence of laser irradiation.

Keywords: non-thermal interaction; laser irradiation; lateral interaction; induced dipoles; adsorption particles; uniform surface of dielectric, semiconductor and metal; non-uniform planar structures.

В последние годы значительный интерес исследователей вызывают поверхностные явления, протекающие под действием лазерного излучения. Такое внимание вызвано тем, что в поле действия лазера возможно создание наноструктур различных конфигураций на поверхности металлов, полупроводников и диэлектриков. Результаты исследований связаны с перспективами их широкого использования в микро-, опто- и акустоэлектронике. Однако при исследовании процессов в поле лазерного излучения часто речь идет о таких условиях, когда имеет место высокотемпературный нагрев материала, в резуль-

тате чего его поверхность становится гофрированной.

Так, один из возможных способов получения обратимых и необратимых «периодических» структур на поверхности твердых тел в результате лазерной абляции тонких пленок был исследован в работах [6; 11–12; 15]. В числе прочих был проведен эксперимент по образованию упорядоченных микроструктур при абляции твердых мишеней (медь, латунь, вольфрам, бронза) толщиной 1–2 мм, находящихся под слоем жидкости (дистиллированная вода, 95%-ный этанол) [12]. Плотность энергии на поверхности мишени достигала величины 30 Дж/см², а диа-

метр сфокусированного пятна составлял 10–60 мкм. При этом период возникающих микроструктур увеличивался в линейной зависимости от увеличения диаметра пятна лазерного излучения на поверхности мишени. Кроме того, в указанной работе предложено три различных механизма абляции:

1) испарение тонкой пленки при нагреве лазерным излучением;

2) взрывное удаление пленки вследствие резкого повышения давления газа, возникающего на ее границе с подложкой;

3) двухфазное удаление пленки при испарении материала с поверхности и вытеснения жидкости давлением паров.

Периодические структуры, описанные в работе [Там же], образуются в результате выноса вещества мишени в виде наночастиц в жидкость. В то же время в аналогичном исследовании [11] описаны наноструктуры, формирующиеся из первоначальной шероховатости поверхности мишени под действием давления паров жидкости, окружающей мишень. Пластика серебра, погруженная в воду или этанол, подвергалась облучению импульсным неодимовым лазером с длиной волны генерации 1,06 мкм, длительностью импульсов 350 пс и частотой их повторения 300 Гц. При этом на поверхности образовывался массив nanoострий высотой 50–70 нм и плотностью до $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

В работе [6] исследована генерация наночастиц благородных металлов (Ag и Au) при абляции металлических мишеней, изготовленных в виде пластины из золота и серебра толщиной 100 мкм с содержанием металлов 99,99 %, в дистиллированной воде и этаноле излучением лазера на парах меди с длиной волны генерации 510,6 нм, длительностью импульсов 20 нс и частотой следования 15 кГц. Полученный в результате абляции коллоидный раствор облучался без металлической мишени лазерным пучком диаметром 30 мкм.

В то же время интерес представляет исследование процессов, при которых ла-

зерное излучение не вызывает значительного разогрева вещества. В этом случае механизм воздействия лазерного излучения на вещество является нетепловым. Как правило, при этом механизм воздействия оптического поля на адсорбированные на твердой поверхности частицы объясняется безызлучательной релаксацией электронного взаимодействия атома с поверхностью, способной привести к его десорбции [2; 7–8; 10]. Другим возможным механизмом является поляризация световым полем адсорбированных частиц, в результате которой в некоторых случаях латеральное взаимодействие таких частиц является существенным [1; 3–5; 14]. В результате на твердой поверхности в области действия лазерного луча возникают неоднородные планарные структуры в виде «кратера» или «бугра» [1; 3–4]. Были подробно исследованы зависимости безразмерной поверхностной концентрации адсорбированных частиц P от безразмерного расстояния R при различных значениях, характеризующих процесс параметров как в установившемся, так и неустановившемся режимах [Там же].

Наше исследование посвящено образованию неоднородных пространственно-временных структур в адсорбционном слое на поверхности твердого тела под действием лазерного излучения относительно слабой интенсивности.

Математическая модель

Для одномерной задачи физической адсорбции частиц на однородной поверхности диэлектрика, полупроводника или металла ранее получено кинетическое уравнение, описывающее установление локального адсорбционного равновесия при неоднородном пространственном распределении интенсивности направленного на поверхность оптического излучения [14]. В случае двумерного поперечного распределения интенсивности падающего на поверхность светового излучения, обладающего осевой симметрией, уравнение записывается так [3]:

$$\frac{\partial N}{\partial t_1} = S_0 F(r) - \frac{N}{\tau} + \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(r N \frac{\partial U}{\partial r} \right) + D \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial N}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где r – текущее радиальное расстояние; t_1 – текущее время; N – поверхностная концентрация адсорбированных частиц (атомов, молекул и т. п.); $F(r)$ – интенсивность потока частиц из газовой фазы на поверхность; S_0 – коэффициент прилипания частиц к поверхности; τ – время пребывания частиц в адсорбированном состоянии; μ – подвижность; D – коэффициент поверхностной диффузии; U – потенциал фотоиндуцированного взаимодействия между адсорбированными частицами.

Следует отметить, что в данном случае величины μ и D предполагаются константами ввиду того, что взаимодействие лазерного излучения с веществом имеет нетепловой характер. Пусть функция $F(r)$ задается гауссовым распределением:

$$F(r) = F_0 \exp(-r^2/\Delta_1^2), \quad (2)$$

где Δ_1 – эффективный радиус потока частиц, направленных на поверхность твердого тела.

Согласно работе [3], мгновенное значение потенциальной энергии фотоиндуцированного диполя в локальном электрическом поле E_{loc} описывается следующим уравнением:

$$U = -dE_{\text{loc}} = -\varepsilon_0 \alpha E_{\text{loc}}^2 = -\varepsilon_0 \alpha E^2 / (1 - A\alpha)^2, \quad (3)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; α – поляризуемость отдельной адсорбированной частицы; $E = |E|$ – напряженность электрической компоненты в электромагнитном поле лазерного излучения.

Параметр A определяет, как показано в работе [14], зависимость локального

электрического поля от поверхностной концентрации адсорбированных атомов, а также от угла падения и поляризации внешнего электромагнитного поля:

$$E_{\text{loc}} = E / (1 - A\alpha).$$

Локальное электромагнитное поле $E_{\text{loc}} = E + E_1$ состоит из внешнего поля E и суммарного поля E_1 , создаваемого в точке расположения рассматриваемой частицы всеми другими фотоиндуцированными диполями.

Пусть направленное на поверхность твердого тела электромагнитное поле имеет амплитуду электрической компоненты E_0 и циклическую частоту ω :

$$E(t_1) = E_0 \cos(\omega t_1).$$

Если распределение амплитуды внешнего поля в направлении, перпендикулярном к распространению, обладает осевой симметрией, то величина E_0 является функцией только радиуса r . С учетом этого подставим последнюю формулу в выражение для мгновенной потенциальной энергии (3) и усредним ее по периоду внешнего электромагнитного излучения. В результате получим:

$$U(r) = -\varepsilon_0 \alpha E_0^2(r) / \{2(1 - A\alpha)^2\}. \quad (4)$$

Приближенно можно считать, что для усредненной по времени интенсивности I оптического излучения справедлива следующая зависимость:

$$I(r) = \varepsilon_0 c E_0^2(r).$$

Предположим, что распределение по поперечному сечению усредненной по времени интенсивности лазерного излучения имеет гауссову форму:

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/r_0^2),$$

где r_0 – эффективный радиус падающего лазерного луча; I_0 – интенсивность ла-

зерного излучения в точке $r = 0$.

С учетом двух последних соотношений запишем:

$$E_0^2(r) = \frac{I_0}{\varepsilon_0 c} \exp(-r^2/r_0^2). \quad (5)$$

Таким образом, из формул (4–5) получим следующее соотношение для определения эффективной потенциальной энергии частицы, имеющей координату r на поверхности твердого тела:

$$\begin{aligned} U(r) &= -\frac{\alpha I_0}{2c(1-A\alpha)^2} \exp(-r^2/r_0^2) = \\ &= A_0 \exp(-r^2/r_0^2). \end{aligned} \quad (6)$$

Входящий в выражение (6) коэффициент пропорциональности определяется так:

$$A_0 = -\frac{\alpha I_0}{2c(1-A\alpha)^2}. \quad (7)$$

Величина A , входящая в знаменатель формулы (7), согласно работе [14] вычисляется по формуле:

$$A \approx \frac{2\pi N}{\Delta r}, \quad (8)$$

где Δr – среднее расстояние между соседними ячейками, в которые могут перейти адсорбированные на твердой поверхности атомы.

Таким образом, из формул (7–8) для вычисления коэффициента пропорциональности A_0 получим следующее соотношение:

$$\begin{aligned} A_0 &= -\frac{\alpha I_0}{2c\left(1 - \frac{2\pi\alpha N}{\Delta r}\right)^2} = \\ &= \frac{A_1}{\left(1 - \frac{2\pi\alpha N}{\Delta r}\right)^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $A_1 = -\alpha I_0/(2c)$. С учетом соотношения (2), определяющего интенсивность потока частиц на поверхность твердого тела, и формулы (6), определяющей усредненную по времени потенциальную энергию частицы в электрическом поле, являющемся суперпозицией внешнего и фотоиндуцированного электрических полей, уравнение (1) в безразмерной форме примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= \exp(-R^2/\Delta^2) - n - \\ &- \xi \frac{\partial}{R \partial R} \left(\frac{n R^2 \exp(-R^2)}{(1-\eta n)^2} \right) + \\ &+ \phi \frac{\partial}{R \partial R} \left(R \frac{\partial n}{\partial R} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где $t = t_1/\tau$, $R = r/r_0$, $n = N/\beta$, $\beta = S_0 F_0 \tau$, $\xi = 2A_1 \mu \tau / r_0^2$, $\phi = D \tau / r_0^2$, $\eta = 2\pi\alpha\beta/\Delta r$, $\Delta = \Delta_1/r_0$. Дополним уравнение (10) начальным условием:

$$t = t_0: \quad n(R, t_0) = n_0(R). \quad (11)$$

В уравнение необходимо включить еще два граничных условия. Из симметрии задачи следует, что в точке $R = 0$ должно быть задано следующее граничное условие:

$$\frac{\partial n}{\partial R} = 0. \quad (12)$$

Оно физически означает отсутствие диффузионного потока в точку $R = 0$ или из нее. Кроме того, из уравнения (12) для функции $U(r)$ вида (6) также следует равенство нулю дрейфовой части потока при $R = 0$.

Аналогичное условие отсутствия диффузии и дрейфа адсорбированных частиц за пределы твердой поверхности зададим на внешней границе области радиуса R_F :

$$R = R_F : \frac{\xi R_F n(R_F, t) \exp(-R_F^2)}{(1 - \eta n(R_F, t))^2} - \left. -\phi \frac{\partial n(R, t)}{\partial R} \right|_{R=R_F} = 0. \quad (13)$$

Если $R_F \gg 1$ (т. е. линейный размер поверхности намного превышает эффективный радиус r_0 лазерного луча), то граничное условие (13) может быть записано в более простом виде:

$$\left. \phi \frac{\partial n(R, t)}{\partial R} \right|_{R=R_F} = 0.$$

Результаты и их обсуждение

Согласно работе [14], коэффициент поверхностной диффузии и подвижность адсорбированных частиц в поле внешнего оптического излучения определяются выражениями

$$D = W(\Delta r)^2, \mu = \frac{D}{kT}, \quad (14)$$

где $W = \nu \exp[-E_{\text{dif}}/(kT)]$ – вероятность перехода в единицу времени адсорбированного атома в соседнюю ячейку в радиальном направлении; k – постоянная Больцмана; E_{dif} – энергия активации диффузии; T – абсолютная температура.

Энергия активации диффузии, как правило, принадлежит интервалу $E_{\text{dif}} \approx 0,01 \div 0,1 \text{ eV}$. Предэкспоненциальный множитель ν в формуле для вероятности W определим из условия $h\nu \approx kT$ [3; 14]. Тогда, например, при температуре $T = 400 \text{ K}$ получим $\nu \approx 0,84 \times 10^{13} \text{ c}^{-1}$. В этом случае вероятность перехода адсорбированного атома в соседнюю ячейку составляет $W = (0,46 \div 6,3) \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$. Следовательно, в соответствии с формулами (14) при

$\Delta r \approx 0,6 \text{ нм}$ коэффициент поверхностной диффузии равен $D = (0,017 \div 0,23) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \text{ c}^{-1}$ а подвижность принимает следующее значение $\mu = (0,03 \div 0,4) \cdot 10^{15} \text{ м}^2 \text{ c}^{-1} \text{ J}^{-1}$. Следует отметить, что коэффициент поверхностной диффузии и подвижность, определяемые по формулам (14), сильно зависят от температуры. Представим их в виде следующих соотношений:

$$\frac{D}{D_0} = \theta \exp[\gamma(1 - 1/\theta)]; \quad (15)$$

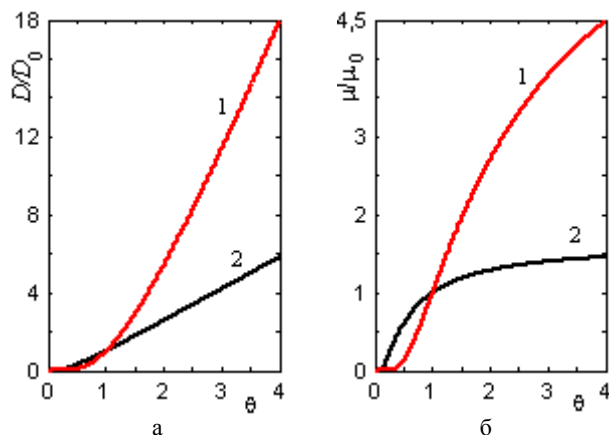
$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T_0 D}{T D_0} = \exp[\gamma(1 - 1/\theta)], \quad (16)$$

где $\gamma = E_{\text{dif}}/(kT_0)$, $\theta = T/T_0$. Величины D_0 и μ_0 определяются при температуре T_0 . При температуре $T_0 = 273 \text{ K}$ для параметра γ получим: $\gamma = 0,4247 \div 4,247$. На рис. 1 представлены зависимости отношений D/D_0 и μ/μ_0 , вычисляемых по формулам (15–16) соответственно, от безразмерной температуры θ . Из рис. 1 видно, что зависимость от температуры становится сильной при более высоких значениях безразмерного параметра γ .

Для безразмерных параметров ϕ и ξ , входящих в уравнение (10), при условии, что входящие в них параметры не зависят от температуры, за исключением коэффициента поверхностной диффузии D и подвижности μ , с учетом формул (15–16) получим:

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{D}{D_0}; \frac{\xi}{\xi_0} = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (17)$$

В данном случае величины ϕ_0 и ξ_0 определяются при температуре T_0 . Таким образом, зависимость от температуры отношений ϕ/ϕ_0 и ξ/ξ_0 также определяется по формулам (15–16) соответственно.



Р и с . 1. Зависимости отношений (а) и (б) от безразмерной температуры при (кривые 1) и (кривые 2)

Оценим характерные значения безразмерных параметров ϕ и ξ . В экспериментах, описанных в работах [2; 5], сине-зеленое излучение Ar^+ -лазера или He-Cd -лазера с интенсивностью соответственно 20 ВТ/см^3 или 10 ВТ/см^3 фокусировалось в пятно диаметром $\sim 2 \text{ мм}$ ($r_0 \approx 1 \text{ мм}$). В этом случае для температуры $T = 400 \text{ К}$ при $\tau \approx 10^{-4} \text{ с}$ получаем $\phi = (0,17 \div 2,3) \cdot 10^{-4}$. В то же время параметр τ сильно зависит от свойств поверхности конкретного твердого тела, а также от характеристик адсорбирующей на ней частицы. Например, в случае адсорбции атомов Na на стекле τ может быть порядка нескольких секунд [2; 5]. Если принять $\tau = 1 \text{ с}$, то при температуре $T = 400 \text{ К}$ получим $\phi = 0,17 \div 2,3$. С учетом сильной температурной зависимости, в соответствии с формулой (13), значение параметра ϕ в ходе экспериментов может варьироваться в достаточно широком диапазоне.

Поляризуемость α , как правило, составляет $\sim 10^{-30} \text{ м}^3$. Таким образом, для параметра A_1 , входящего в формулу (9), при использовании в экспериментах Ar^+ -лазера имеем $\approx -3,3 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}$, а при использовании He-Cd -лазера – $A_1 \approx -1,7 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}$. Тогда для приведенных выше значений параметров безразмер-

ная величина ξ принимает значения $\xi = -(0,2 \div 2,64) \cdot 10^{-13}$ в случае использования Ar^+ -лазера и $\xi \approx -(0,1 \div 1,32) \cdot 10^{-13}$ – He-Cd -лазера при $\tau = 1 \text{ с}$. Если $\tau = 10^{-4} \text{ с}$, то $\xi = -(0,2 \div 2,64) \cdot 10^{-17}$ и $\xi \approx -(0,1 \div 1,32) \cdot 10^{-17}$ в случае применения Ar^+ -лазера и He-Cd -лазера соответственно.

Оценим параметр η . Величина β при $\tau = (10^{-4} \div 1) \text{ с}$, $S_0 = 0,7$ и $F_0 = 10^{20} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ принимает значения $\beta = 7(10^{15} \div 10^{19}) \text{ м}^{-2}$. Тогда при $\Delta r \approx 0,6 \text{ нм}$ и $\alpha = 10^{-30} \text{ м}^3$ получим $\eta = 0,73(10^{-4} \div 1)$.

Очевидно, что если безразмерный параметр ϕ на несколько порядков превышает ξ (например, в приведенных выше оценочных вычислениях ϕ отличается от ξ на 13 порядков), то существенными будут эффекты, вызванные поверхностной диффузией. В то же время эффект, вызванный латеральным взаимодействием наведенных диполей, наблюдаться не будет.

При температуре $T = 100 \text{ К}$ для энергий активации диффузии $E_{\text{dif}} \approx 0,01 \div 0,1 \text{ эВ}$ получим следующие значения параметров модели: $\nu \approx 0,21 \times 10^{13} \text{ с}^{-1}$ и $W = (0,0002 \div 6,6) \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Тогда при $\Delta r \approx 0,6 \text{ нм}$, в соответствии с формулами (14), получим выражение

$D = (0,00007 \div 2,37) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ для коэффициента поверхностной диффузии и $\mu = (0,00005 \div 1,72) \cdot 10^{14} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ Дж}^{-1}$ для подвижности. Для безразмерного параметра ϕ при $r_0 \approx 1 \text{ мм}$ и $\tau \approx 10^{-4} \text{ с}$ получим $\phi = (0,00007 \div 2,37) \cdot 10^{-5}$. Для безразмерного параметра ξ в случае использования Ag^+ -лазера при $\tau = 10^{-4} \text{ с}$ имеем $\xi = -(0,000033 \div 1,14) \cdot 10^{-17}$, а в случае He-Cd -лазера – $\xi = -(0,000016 \div 0,57) \cdot 10^{-17}$.

Таким образом, по мере снижения температуры T с 400 до 100 К отношение безразмерных параметров ϕ и ξ уменьшается примерно в 10 раз. При температуре 100 К это отношение составляет $|\phi/\xi| \sim 10^{12}$. Следовательно, поверхностные диффузионные эффекты преобладают над дрейфом наведенных диполей в электрическом поле. Отношение параметров ϕ и ξ определяется формулой:

$$|\phi/\xi| = ckT/\alpha I_0. \quad (18)$$

Согласно формуле (18), безразмерные параметры ϕ и ξ сопоставимы, если:

$$T/I_0 \sim \alpha/ck = 2,42 \cdot 10^{14} \alpha.$$

Так, для характерных значений $\alpha \sim 10^{-30} \text{ м}^3$ поляризуемости молекул получим:

$$T/I_0 \sim 2,42 \cdot 10^{-16} \text{ К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Последнее соотношение, следовательно, может выполняться при больших величинах $I_0 \sim 0,41 \cdot 10^{18} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ при температуре $T = 100 \text{ К}$. Однако в этом случае существенными становятся процессы, имеющие тепловой характер, а это не соответствует условиям данного исследования.

Следует отметить, что существуют молекулы с аномально высокой поляризуемостью $\alpha \sim 10^{-27} \text{ м}^3$ [9; 13]. Однако даже для таких молекул при температу-

ре $T = 100 \text{ К}$ получаем $|\phi/\xi| \sim 10^9$, и эффект в адсорбционном слое на поверхности твердого тела, вызванный латеральным взаимодействием наведенных в адсорбированных молекулах диполей, практически не будет наблюдаться.

Однако, согласно уравнению (10), из-за наличия в знаменателе выражения $(1-\eta n)^2$ плотность дрейфового потока наведенных диполей в поле оптического излучения достигает очень больших величин при $\eta n \rightarrow 1$. В безразмерных величинах плотность потока, включающая диффузионную и дрейфовую части, равна:

$$J = -\phi \frac{\partial n}{\partial R} + \xi \frac{nR \exp(-R^2)}{(1-\eta n)^2}. \quad (19)$$

Неоднородные поверхностные структуры образуются в результате «конкуренции» между процессами диффузии и дрейфа, выражающейся в стремлении диффузии выронить неоднородности, возникающие из-за дрейфа наведенных диполей. Пусть при $\eta n \rightarrow 1$ в малой окрестности точки $R = R_0$ выполняется условие $J = 0$, т. е. суммарный поток отсутствует. Тогда, проинтегрировав уравнение

$$\phi \frac{\partial n}{\partial R} = \xi \frac{nR \exp(-R^2)}{(1-\eta n)^2},$$

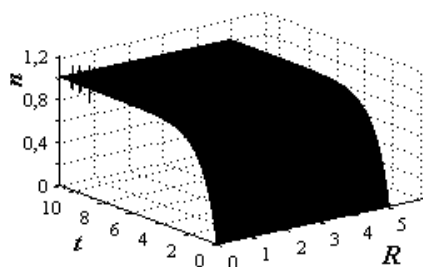
получим:

$$\begin{aligned} \phi \left(\ln x - 2x + \frac{x^2}{2} + \frac{3}{2} \right) = \\ = \xi \frac{\exp(-R_0^2) - \exp(-R^2)}{2}, \end{aligned} \quad (20)$$

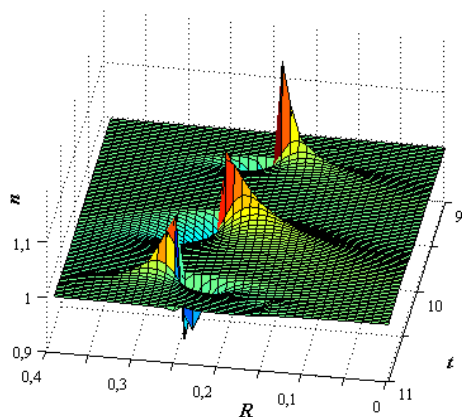
где $x = \eta n$, а соответствует точке, в которой $x = \eta n = 1$. Исследуем равенство (20) в окрестности точки R_0 . Разложим в ряд Тейлора левую часть неравенства (20) в окрестности $x = 1$, а правую – в окрестности $R = R_0$. В результате получим следующую формулу:

$$n = 1/\eta + \exp(-R_0^2/3) \{3\xi R_0(R-R_0)/\phi\}^{1/3}/\eta. \quad (21)$$

На рис. 2 представлены решения уравнения (10) с граничными условиями (12–13) и начальным условием (11) вида $n(R, t_0) = 0$ при $\xi = -10^{-11}$, $\phi = 10^{-2}$, $\eta = 0,999872$, $\Delta \rightarrow \infty$. Из рис. 2 (а) видно, что при заданном соотношении параметров $|\phi/\xi| = 10^9$ с течением времени за счет диффузии на поверхности твердого тела происходит выравнивание концентрации адсорбированных частиц, которая стремится к равновесному значению $n=1$ по мере увеличения времени t . При условии $\eta n \rightarrow 1$ и $\partial n/\partial R \rightarrow 0$ дрейфовый поток становится сравнимым с диффузионным потоком частиц и даже начинает превосходить его (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Зависимость безразмерной поверхностной концентрации адсорбированных частиц n от радиальной координаты R и времени t (а); профиль концентрации в области пространственно-временной неоднородности (б)

Таким образом, характер проявления латерального взаимодействия введенных диполей в адсорбционном слое на поверхности твердого тела сильно зависит от вида адсорбированных частиц, а также свойств поверхности, на которую происходит адсорбция. Существенное влияние должна оказывать также частота из-

лучения используемого лазера, поскольку поляризуемость α в общем случае является именно ее функцией. Знак безразмерного параметра ξ определяется направлением усредненного локального электрического поля. Если оно направлено по радиусу к центру, то знак ξ должен быть положительным.

Результаты проведенного анализа могут быть использованы при создании планарных структур различных конфигураций с помощью оптического излучения, например, в микроэлектронике. Их применение возможно при производстве печатных схем с высокой плотностью монтажа, а также масок для фотолитографии. Например, один из

способов получения планарных структур определенной конфигурации на поверхности твердого тела заключается в изменении времени освещения лазером поверхности материала. Варьируя время действия оптического излучения, можно контролировать распределение концентрации адсорбированных на поверхности твердого тела частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Andreev, V. V.** Surface Migration of Adatoms under Optical Irradiation / V. V. Andreev, G. N. Ostryakov, G. G. Telegin // *Chem. Phys. Reports.* – 1997. – Vol. 16. – № 1. – P. 159–162.
2. Фотостимулированная десорбция атомов металлов с поверхности прозрачных диэлектриков / И. Н. Абрамова [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – 1984. – Т. 39. – № 4. – С. 172.
3. Андреев, В.В. Коллективная миграция адсорбированных атомов на поверхности твердого тела в поле лазерного излучения / В. В. Андреев, Д. В. Игнатьев, Г. Г. Телегин // *Квантовая электроника.* – 2004. – Т. 34. – № 2. – С. 125–128.
4. **Андреев, В. В.** Влияние поля лазерного излучения на зависимость времени установления равновесного распределения адсорбированных на поверхности твердого тела частиц от их начальной концентрации / В. В. Андреев, Ю. И. Прилуцкий // *Доклады НАН Украины.* – 2004. – № 12. – С. 73–77.
5. Влияние лазерного излучения на взаимодействие атомов с поверхностью и процессы абсорбции / А. Н. Артюшин [и др.] // *Химическая физика.* – 1999. – Т. 18. – № 6. – С. 100.
6. Образование наночастиц при лазерной абляции металлов в жидкостях / Ф. Бозон-Вердюр [и др.] // *Квантовая электроника.* – 2003. – Т. 33. – № 8. – С. 714–720.
7. Фотоотрыв атомов от сплошной поверхности металла / А. М. Бонч-Бруевич [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – 1990. – Т. 97. – № 6. – С. 1761.
8. Фотоэмиссия нейтральных атомов с поверхности металла / А. М. Бонч-Бруевич [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – 1987. – Т. 92. – № 1. – С. 285.
9. **Борисов, Ю. А.** Особенности влияния трифторметильной и алкоксикарбонильной групп на строение и реакционную способность соединений акрилового ряда / Ю. А. Борисов, А. Ф. Коломиец, А. В. Фокин // *Журнал структурной химии.* – 2003. – Т. 44. – № 4. – С. 615–623.
10. **Жданов, В. П.** Элементарные физико-химические процессы на поверхности. / В. П. Жданов. – Новосибирск : Наука, 1988. – 320 с.
11. Образование наноструктур при лазерной абляции серебра в жидкостях / Е. В. Завидев [и др.] // *Квантовая электроника.* – 2006. – Т. 36. – № 10. – С. 978–980.
12. **Казакевич, П. В.** Образование периодических структур при лазерной абляции металлических мишеней в жидкости / П. В. Казакевич, А. В. Симакин, Г. А. Шафеев // *Квантовая электроника.* – 2005. – Т. 35. – № 9. – С. 831–834.
13. Поляризуемость фуллерена / В. А. Мальцев [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – Т. 57. – Вып. 10. – С. 634–637.
14. **Полякова, В. И.** Кинетика поверхностных явлений при фотоиндуцированном латеральном взаимодействии между частицами / В. И. Полякова, Г. Г. Телегин // *Химическая физика.* – 1991. – Т. 10. – № 2. – С. 273.
15. Нарушение адгезии при абляции тонких пленок импульсным лазерным излучением / А. В. Феденев [и др.] // *Квантовая электроника.* – 2004. – Т. 34. – № 4. – С. 375–380.

Поступила 20.10.2013 г.

Об авторе:

Андреев Всеволод Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем и технологий ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова» (г. Чебоксары, Россия), andreev_vsevolod@mail.ru

Для цитирования: Андреев, В. В. Синтез наноструктур на поверхности твердых тел в поле лазерного излучения слабой интенсивности / В. В. Андреев // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 17–27.

REFERENCES

1. Andreev V. V., Ostryakov G. N., Telegin G. G. Surface Migration of Adatoms under Optical Irradiation. *Chem. Phys. Reports*. 1997, vol. 16, no. 1, pp. 159 – 162.
2. Abramova, I. N., Aleksandrov E. B., Bonch-Bruevich A. M., Khromov V. V. Fotostimulirovannaja desorbciya atomov metallov s poverhnosti prozrachnyh dijelektrikov [Photostimulated desorption of metal atoms from surfaces of transparent insulators]. *Pis'ma v ZhJeTF - JETP Letters*. 1984, vol. 39, no. 4, pp. 203 – 205.
3. Andreev V. V., Ignat'ev D. V., Telegin G. G. Kollektivnaja migracija adsorbirovannyh atomov na poverhnosti tverdogo tela v pole lazernogo izluchenija [Collective migration of adsorbed atoms on a solid surface in the laser radiation field]. *Kvantovaja jelektronika – Quantum Electronics*. 2004, vol. 34, no. 2, pp. 125 – 128.
4. Andreev V. V., Prilutsky Y. I., Priluckij Ju. I. Vlijanie polja lazernogo izluchenija na zavisimost' vremeni ustanovlenija rovnovesnogo raspredelenija adsorbirovannyh na poverhnosti tverdogo tela chastic ot ih nachal'noj koncentracii [Influence of laser radiation field on the dependence of equilibrium distribution of adsorbed on solid surface particles from their initial concentration]. *Doklady NAN Ukrainy – Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2004, no. 12, pp. 73 – 77.
5. Artyushin A. N., Plekhanov A. I., Safonov V. P., Telegin G. G. Vlijanie lazernogo izluchenija na vzaimodejstvie atomov s poverhnost'ju i processy absorbcii [Effect of laser radiation on atoms interaction with surface and absorption processes]. *Him. Fizika – Chemical Physics Reports*, 1999, vol.18, no. 6, pp.100 – 103.
6. Bozon-Verduraz F., Brayner R., Voronov V. V., Kirichenko N. A., Simakin A. V., Shafeev G. A. Obrazovanie nanochastic pri lazernoj abl'jacii metallov v zhidkostjah [Production of nanoparticles by laser-induced ablation of metals in liquids]. *Kvantovaja jelektronika – Quantum Electronics*. 2003, vol. 33, no. 8, pp. 714 – 720.
7. Bonch-Bruevich A. M., Vartanyan T. A., Maksimov Yu. N., Przhibel'skii S. G., Khromov V. V. Fotootryv atomov ot sploshnoj poverhnosti metalla [Photodetachment of atoms from solid metal surface]. *ZhJeTF – Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1990, vol. 97, no. 6, pp. 1761 – 1766.
8. Bonch-Bruevich A. M., Maksimov Yu. N., Przhibel'skii S. G., Khromov V. V. Fotojemijsija nejtral'nyh atomov s poverhnosti metalla [Photoemission of neutral atoms from the surface of a metal]. *ZhJeTF – Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1987, vol. 92, no. 1, pp.161 – 164.
9. Borisov Yu. A., Kolomiets A. F., Fokin A. V. Osobennosti vlijanija trifortmetil'noj i alkoksikarbonil'noj grupp na stroenie i reakcionnuju sposobnost' soedinenij akrilovogo rjada – Effects of Trifluoromethyl and Alkoxy carbonyl Groups on the Structure and Reactivity of Acrylates. *Zhurnal strukturnoj himii – Journal of Structural Chemistry*. 2003, vol.44, no. 4, pp. 559 – 566.
10. Zhdanov V. P. Jelementarnye fiziko-himicheskie processy na poverhnosti [Elementary physico-chemical processes at the surface]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988, 320 p.
11. Zavedeev E. V., Petrovskaya A. V., Simakin A. V., Shafeev G. A. Obrazovanie nanostruktur pri lazernoj abl'jacii serebra v zhidkostjah [Formation of nanostructures upon laser ablation of silver in liquids]. *Kvantovaja jelektronika – Quantum Electronics*. 2006, vol.36, no. 10, pp. 978 – 980.
12. Kazakevich P. V., Simakin A. V., Shafeev G. A. Obrazovanie periodicheskikh struktur pri lazernoj abl'jacii metallicheskih mishenej v zhidkosti [Formation of periodic structures upon laser ablation of metal targets in liquids]. *Kvantovaja jelektronika – Quantum Electronics*. 2005, vol.35, no. 9, pp. 831 – 834.
13. Mal'tsev V. A., Nerushev O. A., Novopashin S. A., Selivanov B. A. Poljarizuemost' fullerena [Polarizability of fullerenes]. *Pis'ma v ZhJeTF – JETP Letters*. 1993, vol. 57, no. 10, pp. 653 – 657.

14. Polyakova V. I., Telegin G. G. Kinetika poverhnostnyh javlenij pri fotoinducirovannom lateral'nom vzaimodejstvii mezhdru chasticami [Kinetics of surface phenomena in the photo-induced lateral interaction between the particles]. *Him. fizika* – Soviet Journal of Chemical Physics. 1991, vol. 10, no. 2, pp. 273 – 280.

15. Fedenev A. V., Lipatov E. I., Tarasenko V. F., Orlovskii V. M., Shulepov M. A., Koval' N. N., Goncharenko I. M. Narushenie adgezii pri abljacii tonkih plenok impul'snym lazernym izlucheniem [Disturbance of adhesion upon ablation of thin films by laser pulses]. *Kvantovaja jelektronika* – Quantum Electronics. 2004, vol. 34, no. 4, pp. 375 – 380.

About the author:

Andreev Vsevolod Vladimirovich, associate professor (docent) of Telecommunication Systems and Technologies chair of Chuvash State University (Cheboksary, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, andreev_vsevolod@mail.ru

For citation: Andreev V. V. Sintez nanostruktur na poverhnosti tvjordyh tel v pole lazernogo izluchenija slaboj intensivnosti [Synthesis of nanostructures on solid surfaces in the field of weak intensity laser irradiation]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 17 – 27.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В Si-ФАЗЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С SiC-ФАЗОЙ, СФОРМИРОВАННОЙ МЕТОДОМ ЭНДОТАКСИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В. И. Чепурнов

В статье исследуется твердофазный процесс эндотаксии карбида кремния, который сопровождается химическим превращением Si-фазы в SiC-фазу в среде водорода и его производных с углеродом при $t = 1360\text{--}1380^\circ\text{C}$ и нормальном давлении; излагаются факторы и природа трудностей управляемого легирования карбида кремния, сформированного на подложке кремния, и его особенности; предлагаются модели механизмов влияния типа проводимости подложки на гетерогенные процессы формирования монокристаллической пленки карбида кремния; определяется концентрационное распределение точечных дефектов в рамках фазовых границ по толщине гетероструктуры, а также роль факторов, от которых оно зависит.

Ключевые слова: точечный дефект, гетероструктура, гетероэндотаксия, карбид кремния на кремнии, легирующая примесь.

CONCENTRATION OF SINGLE DEFECTS IN THE Si-PHASE INCLUDING SiC-PHASE, FORMATION OF ENDOTAXE METHOD OF SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURE

V. I. Tchepurnov

Heteroepitaxy layers of silicone carbide on silicone substrate is one of the most perspective material for the high-temperature- and nuclear-proof electronics. Solidphase process of endotaxy of silicon carbide is supported by Si-phase turning into SiC-phase chemically taking place in the atmosphere of hydrogen and hydrocarbon under the temperature range of 1360 to 1380 °C and under normal atmospheric pressure. All the system of solidphase process assumes single defect formation, caused by natural growth processes, affected by processes of another origin, caused by doped, for example. The aim of this research is to analyse all the opportunities of the guidance and the forecasting of this system behaviour. Besides, the concentration of thermal point defects of various origin on silicone substrate depending on the type of its current under the circumstances of isovalent doped of carbon has been theoretically studied in this article.

Keywords: point (local) defect, heterostructure, heteroendotaxe, silicon carbide on silicon substrate.

Гетероструктуры β -SiC-Si имеют перспективу использования в активных элементах полупроводниковых приборов, особенно микро-, опто- и СВЧ-устройствах, работающих при повышенных температурах и уровнях радиационного фона [1–3]. Эндотаксия гетероструктур карбида кремния на монокристаллической подложке кремния – известный процесс [4–8]. Целенаправленное изменение типа

проводимости и поддержание контролируемой концентрации носителей в активных областях гетероструктуры является актуальным вопросом прикладных исследований в технологии твердофазных процессов эндотаксии.

Особенность изучаемой гетеросистемы обусловлена тем, что она может включать гомопереход в SiC-фазе, модифицированной акцепторной или донорной приме-

© Чепурнов В. И., 2014

сью [10–11], гетеропереход [12], как правило, изотипный и гомопереход в Si-фазе.

Кроме того, SiC-фаза может быть использована как буфер между Si-фазой подложки и AlN-фазой. Как правило, трудно подобрать близкие к идеальным гетеропары из-за существенного различия периодов решетки и коэффициентов температурного расширения сопрягаемых материалов. Это обстоятельство вызывает появление значительных механических напряжений несоответствия, релаксирующих до остаточных посредством генерации сетки дислокаций, причем последняя выполняет еще и положительную роль скрытого геттера, движущегося перед фронтом роста фазы карбида кремния как буферный слой. Различие физико-химических свойств сопрягаемых материалов проявляется в асимметричном распределении сетки дислокаций, в частности, это экспериментально подтверждено распределением плотности дислокаций несоответствия между фазами (рис. 1).

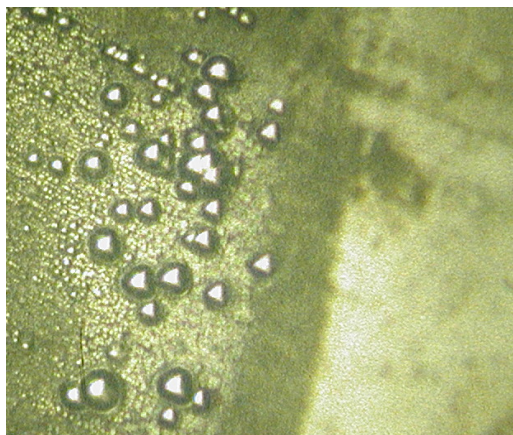


Рис. 1. Оптическая фотография ямок травления шарового шлифа гетероструктуры карбид кремния на подложке кремния (слева – кремниевая фаза, справа – карбидокремниевая)

К особенностям рассматриваемой гетеросистемы также следует отнести тип проводимости исходной подложки и уровень ее легирования, влияющие на процесс точечного дефектообразования как в монокристаллической подложке кремния, так и в сопряженной с ней

фазе. Кроме того, природа дефектообразования в сопряженных фазах связана с изовалентным легированием или его сочетанием с легированием посторонней примесью подложки. Отклонение от стехиометрии обусловлено генерацией дефектов тепловой и ростовой природы в соответствующих подрешетках карбида кремния.

Чем больше ширина запрещенной зоны полупроводника, тем энергетически более выгодны процессы самокомпенсации. Физический принцип ее проявления состоит в том, что заряженные точечные дефекты различной природы генерируются в полупроводнике при температуре эндотаксии и, при достаточной их концентрации, образуют уровни в запрещенной зоне. Легирование посторонней примесью в достаточной концентрации также сопровождается появлением соответствующего уровня в запрещенной зоне. Если система находится в состоянии термодинамического равновесия с минимумом энергии, то выгодна рекомбинация, сопровождающаяся занятием электронами уровней в валентной зоне. Энергетический выигрыш от этого процесса приводит к генерации собственных дефектов того типа, с теми зарядами и уровнями ионизации, которые способны компенсировать заряды, вносимыми посторонней примесью. Данное физическое явление обуславливает трудности управляемого легирования при эндотаксии гетероструктуры β -SiC//Si.

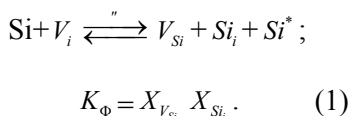
Таким образом, важно установить концентрацию обратимых точечных дефектов в зависимости от термодинамических факторов в фазовых областях гетероструктуры, поскольку они влияют на механизм массопереноса, кинетику роста пленки в процессе эндотаксии и условия управляемого легирования до требуемых концентраций носителей.

1. Тепловое разупорядочение монокристаллической подложки кремния

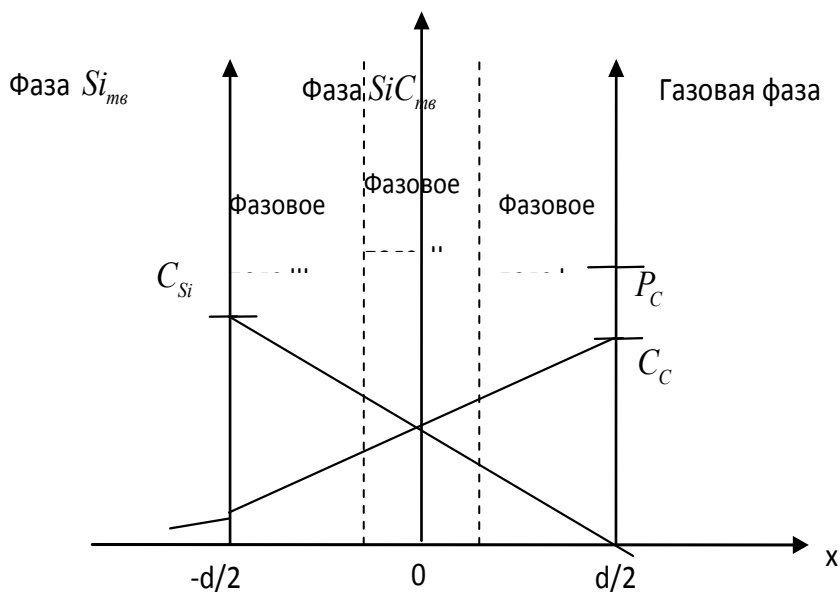
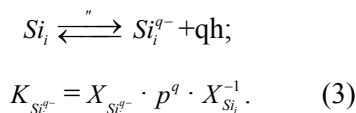
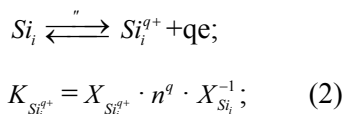
Исследуемая гетероструктура представлена на рис. 2, где обозначены гра-

ницы области гомогенности SiC-фазы, Si-фазы подложки и газовой фазы, пересыщенной по гипотетическому давлению углерода ($\Delta \bar{P}_C$) в кассете. При температуре эндотаксии концентрации точечных дефектов тепловой природы по модели Шоттки и Френкеля сопоставимы [13–14; 18–19], поэтому исследуются обе модели дефектообразования в Si-фазе.

Рассмотрим тепловое точечное дефектообразование по модели Френкеля и константу равновесия этого процесса в подложке кремния с позиций квазихимического описания процесса, как это представлено выражениями:



Процесс ионизации междоузельных дефектов зависит от вида посторонней легирующей примеси, модифицирующей тип проводимости Si-подложки. Приводим возможные варианты ионизации междоузельного кремния, описываемые квазихимическими выражениями с соответствующими константами равновесия:



Р и с . 2. Схематическое представление твердофазного процесса по диффузионному массопереносу элементов в градиенте их концентраций, приводящего к образованию карбида кремния, согласно реакции $\text{C} + \text{Si} = \text{SiC}$

При температуре эндотаксии процессы ионизации вакансий на месте атомов кремния в матрице кремния и константы их равновесия представим квазихимическими выражениями:

$$\begin{aligned} V_{Si} &\xrightleftharpoons{T} V_{Si}^{q-} + qh; \\ K_{V_{Si}^{q-}} &= X_{V_{Si}^{q-}} \cdot p^q \cdot X_{V_{Si}}^{-1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} V_{Si} &\xrightleftharpoons{T} V_{Si}^{q+} + qe; \\ K_{V_{Si}^{q+}} &= X_{V_{Si}^{q+}} \cdot n^q \cdot X_{V_{Si}}^{-1}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Мы принимаем во внимание результаты ЭПР исследований, согласно которым в p-кремнии установлено наличие нейтральной и положительно заряженной вакансии, в n-кремнии вакансии существуют в состояниях однократно ионизованных отрицательно заряженных, а в сильнолегированных – двукратно ионизованных.

Процесс теплового разупорядочения по модели Шоттки и константу равновесия этого процесса в матрице кремния представим квазихимическим выражением:

$$\begin{aligned} Si + V_s &\xrightleftharpoons{T} V_{Si} + Si_{V_s}; \\ K_{sh} &= X_{V_{Si}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В соответствии с моделью собственного теплового разупорядочения по Шоттки процесс ионизации вакансий на месте атомов кремния в матрице кремния и константу равновесия процесса представим квазихимическими выражениями для случаев ионизации донорного и акцепторного типа:

$$\begin{aligned} V_{Si} &\xrightleftharpoons{T} V_{Si}^{q+} + qe; \\ K_{V_{Si}^{q+}} &= X_{V_{Si}^{q+}} \cdot n^q \cdot X_{V_{Si}}^{-1}; \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$V_{Si} \xrightleftharpoons{T} V_{Si}^{q-} + qh;$$

$$K_{V_{Si}^{q-}} = X_{V_{Si}^{q-}} \cdot p^q \cdot X_{V_{Si}}^{-1}. \quad (6.2)$$

К тепловым дефектам в матрице кремния относят переходы электрона «валентная зона – зона проводимости», которые отображают квазихимическим уравнением и константой равновесия процесса:

$$\begin{aligned} Si + 0 &\xrightleftharpoons{T} e + h + Si^*; \\ K_i &= n \cdot p. \end{aligned} \quad (7)$$

При повышении температуры активируются процессы перехода «зона – зона», согласно уравнению (7), и уравнение электронейтральности принимает вид:

$$n = p \quad (8)$$

Дальнейшее повышение температуры с целью финишного химического травления перед эндотаксией активируются процессы по моделям Френкеля (1–4) и Шоттки (5–6). Устанавливается равновесие, которому соответствует новое уравнение электронейтральности для кремния донорного (6.1) и акцепторного (6.2) типа проводимости соответственно:

$$qX_{V_{Si}^{q+}} = n; \quad (9)$$

$$qX_{V_{Si}^{q-}} = p; \quad (10)$$

Последующее повышение температуры до температуры процесса эндотаксии при условии пересыщения по гипотетическому давлению атомов углерода активируются процессы изовалентного замещения [16; 21], однако уравнение электронейтральности не меняет вид. Концентрацию заряженных вакансий на месте атомов кремния для дефектообразования по модели Шоттки определим, решая совместно уравнения (5–6), (9–10):

$$X_{V_{Si}^{q-}} = q^{\frac{-q}{q+1}} K_{V_{Si}^{q-}}^{\frac{1}{q+1}} K_{sh}^{\frac{1}{q+1}}; \quad (11)$$

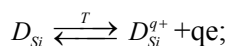
$$X_{V_{Si}^{q+}} = q^{\frac{-q}{q+1}} K_{V_{Si}^{q+}}^{\frac{1}{q+1}} K_{sh}^{\frac{1}{q+1}}. \quad (12)$$

Концентрацию дырок и электронов определяют из совместного решения уравнений для концентраций вакансий (11–12) и уравнений электронейтральности (9–10). Вклад дефектообразования по модели Френкеля при температуре эндотаксии соизмерим с дефектообразованием по модели Шоттки [12–13].

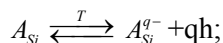
В формуле (1) концентрация вакансий на месте атомов кремния и междоузельных дефектов взаимообусловлены, а уравнения для ионизации дефектов представлены выражениями (2) или (3) и (4). Применимость выражения (2) или (3) обусловлена типом проводимости исходной подложки кремния. Выполним анализ зависимости дефектообразования по модели Френкеля от условий эндотаксии, а именно типа проводимости используемой подложки кремния.

2. Влияние основных носителей заряда в подложке кремния на равновесное распределение точечных дефектов

Изменение типа проводимости полупроводниковой подложки кремния связано с процессом ее легирования донорной или акцепторной примесью [12]. Квазихимическое представление данного процесса и его константу равновесия можно записать в следующем виде:



$$K_{D_{Si}^{q+}} = X_{D_{Si}^{q+}} \cdot n^q \cdot X_{D_{Si}}^{-1}; \quad (13)$$



$$K_{A_{Si}^{q-}} = X_{A_{Si}^{q-}} \cdot p^q \cdot X_{A_{Si}}^{-1}. \quad (14)$$

При температуре процесса эндотаксии и повышении уровня легирования

подложки роль процессов (13–14) возрастает, и условие электронейтральности приобретает вид:

$$q \cdot X_{D_{Si}^{q+}} = n; \quad (15)$$

$$q \cdot X_{A_{Si}^{q-}} = p. \quad (16)$$

При использовании монокристаллической подложки кремния, легированной донорной примесью, концентрация электронов или дырок определяется совместным решением уравнений (7; 13; 15).

$$n = q^{\frac{1}{q+1}} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{1}{q+1}} \cdot X_{D_{Si}}^{\frac{1}{q+1}}; \quad (17)$$

$$p = q^{\frac{-1}{q+1}} \cdot K_i \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{-1}{q+1}} \cdot X_{D_{Si}}^{\frac{-1}{q+1}}. \quad (18)$$

При использовании подложки, легированной акцепторной примесью, концентрация электронов или дырок определяется совместным решением уравнений (7; 14; 16):

$$p = q^{\frac{1}{q+1}} \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{1}{q+1}} \cdot X_{A_{Si}}^{\frac{1}{q+1}}; \quad (19)$$

$$n = q^{\frac{-1}{q+1}} \cdot K_i \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{-1}{q+1}} \cdot X_{A_{Si}}^{\frac{-1}{q+1}}. \quad (20)$$

В уравнениях (13–14) продукты реакции аналогичны тепловому разупорядочению по моделям Шоттки, Френкеля и междонного перехода. Это сказывается на общем равновесии процессов дефектообразования в кристалле.

2.1. Влияние дырок, как основных носителей заряда подложки, на общее равновесие процессов дефектообразования в Si-фазе

При использовании подложки р-типа проводимости равновесие (2) сдвигается вправо, поскольку протекают процессы (14; 19–20), что предполагает аннигиляцию электронов и дырок, а также увеличение концентрации поло-

жительно заряженных атомов кремния в положении междоузлия (Si_i^{q+}) в монокристаллической решетке

Рассмотрим равновесное распределение дефектов по модели Френкеля в подложке кремния р-типа проводимости, опосредованно сопряженной (через β -SiC фазу) с газовой фазой, пересыщенной по гипотетическому давлению атомов углерода. Точечные дефекты, вызванные легирующей примесью (14), сдвигают равновесие процесса, описываемого уравнениями (2; 4) вправо. При возрастающем уровне легирования используемых подложек применяют уравнение электронейтральности (16), а концентрация дырок соответствует выражению (19). Концентрация положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния при дефектообразовании по модели Френкеля, согласно выражению (4), увеличивается пропорционально уровню легирования используемых подложек кремния. Решая совместно уравнения (1; 4.2; 20) получим значение концентрации вакансий на месте атомов кремния:

$$X_{V_{Si}^{q+}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{V_{Si}^{q+}}^{-q} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{\Phi}^{\frac{1}{2}} \cdot X_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{q}{q+1}}. \quad (21)$$

Согласно полученному выражению, концентрация положительно ионизованных вакансий на месте атомов кремния, участвующих в массопереносе и растворении атомарного углерода, зависит от типа используемой подложки и уровня ее легирования.

Определим концентрацию положительно ионизованных междоузельных атомов кремния путем совместного решения уравнений (1–2; 20)

$$X_{Si_i^{q+}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{Si_i^{q+}}^{-q} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{\Phi}^{\frac{1}{2}} \cdot X_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{q}{q+1}}. \quad (22)$$

Видно, что концентрация положительно заряженных междоузельных атомов кремния увеличивается, если использовать подложки с большим значе-

нием концентрации легирующей акцепторной примеси.

Концентрацию отрицательно ионизованных междоузельных атомов кремния представим в виде:

$$X_{Si_i^{q-}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{Si_i^{q-}}^{-q} \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{\Phi}^{\frac{1}{2}} \cdot X_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{-q}{q+1}}. \quad (23)$$

Таким образом, концентрация отрицательно заряженных междоузельных атомов кремния уменьшается, если использовать подложки с большим значением концентрации легирующей акцепторной примеси.

2.2. Влияние электронов как основных носителей заряда подложки на общее равновесие процессов дефектообразования в Si-фазе

Рассмотрим равновесную концентрацию дефектов в подложках кремния n-типа проводимости, сопряженных через β -SiC-фазу с газовой. Точечные дефекты, обусловленные донорной легирующей примесью (13), сдвигают равновесие процесса дефектообразования вправо. При возрастающем уровне легирования используемых подложек применяют уравнение электронейтральности (15); концентрация электронов соответствует выражению (17), а дырок – (18). Концентрация положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния при дефектообразовании по модели Френкеля, согласно выражению (4), уменьшается пропорционально уровню легирования используемых подложек кремния, а отрицательно заряженных – увеличивается. Решая совместно уравнения (1; 4; 17–18) получим значение концентрации вакансий на месте атомов кремния в монокристаллической подложке:

$$X_{V_{Si}^{q+}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{V_{Si}^{q+}}^{-q} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{\Phi}^{\frac{1}{2}} \cdot X_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{-q}{q+1}}; \quad (24.1)$$

$$X_{V_{Si}^{q-}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{V_{Si}^{q-}}^{-q} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_i^{-q} \cdot X_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{q}{q+1}}; \quad (24.2)$$

Из полученных выражений следует, что использование сильно легированных подложек n-типа проводимости приводит к существенному снижению концентрации положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния и росту концентрации отрицательно заряженных вакансий. Логично предположить, что процесс растворения атомов углерода протекает по механизму замещения вакансий на месте атома кремния в матрице кремния.

Концентрацию междоузельных атомов кремния в подложках n-типа проводимости определим исходя из совместного решения уравнений (1; 3; 18), получим:

$$X_{Si^{q-}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{Si^{q-}} \cdot K_{\Phi}^{\frac{1}{2}} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot X_{D_{Si}}^{\frac{q}{q+1}}. \quad (25)$$

Из этого следует, что концентрация отрицательно ионизованных междоузельных атомов кремния растет с увеличением уровня легирования подложки кремния донорной примесью.

Концентрацию положительно заряженных междоузельных атомов кремния определим следующим образом:

$$X_{Si^{q+}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{Si^{q+}} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{\Phi}^{\frac{1}{2}} \cdot X_{D_{Si}}^{\frac{-q}{q+1}}. \quad (26)$$

Из выражения (26) следует, что концентрация положительно ионизованных междоузельных атомов кремния падает с увеличением уровня легирования подложки кремния донорной примесью. Развитие данного процесса более благоприятно в сопоставлении со знаком механических напряжений в системе SiC//Si.

2.3. Влияние основных носителей заряда в подложке кремния на равновесное распределение тепловых точечных дефектов по модели Шоттки

Тепловое дефектообразование по модели Шоттки для специально не легированной подложки кремния представлено выражениями: (5–6; 10–12), продуктами разупорядочения структу-

ры являются дефекты, аналогичные точечному дефектообразованию.

Рассмотрим случай использования подложек n-типа проводимости. Повышение концентрации электронов, обусловленное основными носителями в монокристаллической подложке сдвигает равновесие процесса ионизации вакансий по модели Шоттки (6) для положительно заряженной вакансии на месте атома кремния влево, для отрицательно заряженной – вправо. Определим их концентрации:

$$X_{V_{Si}^{q+}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{Si^{q+}} \cdot K_{sh} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot X_{D_{Si}}^{\frac{-q}{q+1}}; \quad (27.1)$$

$$X_{V_{Si}^{q-}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{Si^{q-}} \cdot K_{sh} \cdot K_{D_{Si}^{q+}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot X_{D_{Si}}^{\frac{q}{q+1}}. \quad (27.2)$$

Из полученных выражений следует, что при дефектообразовании по модели Шоттки увеличение концентрации донорной примеси в подложке приводит к снижению концентрации уровня положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния. Последнее отражается на кинетике процесса массопереноса и растворимости углерода и, следовательно, влияет на кинетику роста пленок карбида кремния.

Использование подложек p-типа проводимости сдвигает равновесие процесса (6) вправо для положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния и влево – для отрицательно заряженных, их концентрацию можно определить совместным решением уравнений (5–6; 19–20):

$$X_{V_{Si}^{q+}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{V_{Si}^{q+}} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{sh} \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot X_{A_{Si}}^{\frac{q}{q+1}}; \quad (28.1)$$

$$X_{V_{Si}^{q-}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{V_{Si}^{q-}} \cdot K_{sh} \cdot K_{A_{Si}^{q-}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot X_{A_{Si}}^{\frac{-q}{q+1}}. \quad (28.2)$$

Выражения (27–28) отражают влияние посторонней примеси в кремнии на механизм растворения изoeлектронной посторонней примеси углерода в кремнии, что означает возможность протекания различных механизмов массопереноса в его матрице (в градиенте химического и электрохимического потенциала соответственно).

2.4. Влияние основных носителей в подложке кремния на равновесие процессов дефектообразования при изовалентном легировании углеродом

На гетерогранице Si – SiC в Si-фазе со стороны сопряжения с карбидокремниевой фазой имеет место процесс диффузии атомов углерода (21) в градиенте химического потенциала по его атомам, которые, растворенные в кремнии, можно рассматривать как изовалентную постороннюю примесь замещения атомов кремния в монокристаллической подложке вследствие схожести их атомов.

Рассмотрим общее условие равновесия дефектов в кремнии при наличии изовалентной примеси замещения. Атомы углерода, переходящие на поверхность монокристаллической фазы кремния из газовой фазы или посредством массопереноса из сопряженной, во-первых, растворяются в кристаллической решетке кремния, а во-вторых, образуют преципитаты самостоятельной фазы, которые преобразуются в фазу карбида кремния. Преципитация фазы наступает, когда нарушается гомогенность α -фазы кремния вследствие достижения предела растворимости углерода ($3,5 \cdot 10^{-3}$ % ат.) [17; 22].

Рассмотрим неизбежность растворения углерода в матрице кремния при температуре эндотаксии с термодинамических позиций. Энергию смешения Гиббса, связанную с образованием раствора можно представить уравнением:

$$\Delta G_{CM} = X_{Si} \cdot \Delta \mu_{Si} + X_C \Delta \mu_C. \quad (29)$$

Выразив изменение химических потенциалов через стандартные парциальные энтальпии и энтропии, приведем уравнение к следующему виду:

$$\begin{aligned} \Delta G_{CM} = & X_{Si} \Delta \overline{H}_{Si}^0 - X_{Si} T \Delta \overline{S}_{Si}^0 + \\ & + X_{Si} RT \ln X_{Si} + X_C \Delta \overline{H}_C^0 - \\ & - X_C T \Delta \overline{S}_C^0 + X_C RT \ln X_C. \end{aligned} \quad (30)$$

Исходя из того, что $X_{Si} + X_C = 1$ и $X_{Si} = (1 - X_C)$, получим:

$$\begin{aligned} \Delta G_{AC} = & (1 - X_C) \Delta \overline{H}_{Si}^0 + X_C \Delta \overline{H}_C^0 + \\ & + RT[(1 - X_C) \ln(1 - X_C) + X_C \ln X_C] - \\ & - (1 - X_C) T \Delta \overline{S}_{Si}^0 - X_C T \Delta \overline{S}_C^0. \end{aligned} \quad (31)$$

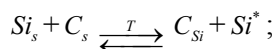
Продифференцировав полученное выражение по X_C , при условии, что T , $\Delta \overline{H}^0$, $\Delta \overline{S}^0$ постоянны, запишем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta G_{CM}}{\partial X_C} = & - \Delta \overline{H}_{Si}^0 + \Delta \overline{H}_C^0 + \\ & + RT \cdot \ln \left[\frac{X_C}{(1 - X_C)} \right] + T \Delta \overline{S}_{Si}^0 - T. \end{aligned} \quad (32)$$

Принимая во внимание, что для сильно разбавленного раствора $\Delta \overline{H}_{Si}^0 \ll \Delta \overline{H}_C^0$ и $\Delta \overline{S}_{Si}^0 \ll \Delta \overline{S}_C^0$, а $X_C \ll 1$, упростим выражение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta G_{CM}}{\partial X_C} = & - \Delta \overline{H}_C^0 - T \Delta \overline{S}_C^0 + \\ & + RT \cdot \ln X_C, \end{aligned} \quad (33)$$

согласно чему можно заключить, что в процессе эндотаксии при малых концентрациях углерода его растворение в кремнии протекает с термодинамической точки зрения самопроизвольно. Квазихимическое представление процесса растворения углерода и константу его равновесия можно записать так:



$$K_{C_{Si}} = X_{C_{Si}} \cdot X_{C_S}^{-1} \quad (34)$$

Принимая во внимание, что X_{C_S} пропорциональна пересыщению по гипотетическому давлению углерода, константу равновесия растворения углерода в позиции замещения атомов кремния (34) можно представить уравнением:

$$K_{C_{Si}} = X_{C_{Si}} \cdot (\Delta \widetilde{P}_C)^{-1} \quad (35)$$

Концентрация атомов углерода в позиции замещения атома кремния при температуре эндотаксии пропорциональна пересыщению газовой фазы по гипотетической концентрации углерода на границе Si-фазы.

$$X_{C_{Si}} = K_{C_{Si}} \cdot \Delta \widetilde{P}_C \quad (36)$$

Атом углерода способен поляризовать связь Si – C в силу полярности ковалентной связи ~12 % [18; 23], но не меняет зарядового состояния системы.

Таким образом, повышение температуры до эндотаксии (при условии пересыщения по гипотетическому давлению атомов углерода) активизирует процессы изовалентного замещения (34), причем нет необходимости говорить об уравнении электронейтральности. Природа растворяющейся посторонней примеси в монокристаллической подложке кремния не только определяет природу дефектов, сопровождающих данный процесс, но и изменяет характер равновесия собственного точечного беспорядка в кристалле.

Выражение (21) позволяет предположить иной механизм растворения углерода в кристаллической решетке кремния, чем рассмотренный (34). При эндотаксии пленок карбида кремния с использованием подложек кремния, легированных акцепторной примесью, согласно выражению (21), заряженная вакансия на месте атома кремния участвует в процессе растворения углерода по квазихимическому уравнению реакции:

$$(V_{Si}^{q+} + qe) + C_s = C_{Si};$$

$$K_{C_{Si}}^* = X_{C_{Si}} \cdot X_{C_S}^{-1} \cdot X_{V_{Si}^{q+}}^{-1} \cdot n^{-q} \quad (37)$$

Перепишем константу равновесия в виде:

$$K_{C_{Si}}^* = X_{C_{Si}} \cdot (\Delta \widetilde{P}_C)^{-1} \cdot X_{V_{Si}^{q+}}^{-1} \cdot n^{-q} \quad (38)$$

Решая совместно (20–21; 38) определим концентрацию растворенного углерода:

$$X_{C_{Si}} = K_{C_{Si}}^* \cdot K_{V_{Si}^{q+}} \cdot K_s^{\frac{1}{2}} \cdot (\Delta \widetilde{P}_C) \quad (39)$$

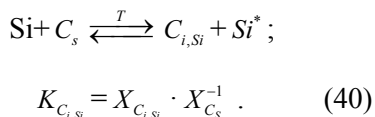
Из полученного выражения следует, что заселенность кристалла кремния растворенным углеродом в позициях замещения атомов кремния зависит от пересыщения по гипотетической концентрации атомов углерода в газовой фазе или градиента его концентрации в SiC-фазе. Таким образом, сохраняется характер закономерности, полученной в выражении (36).

3. Влияние основных носителей в подложке на равновесие процесса дефектообразования по механизму внедрения

Природа растворяющейся изовалентной примеси углерода в кремнии не только определяет природу дефектов, создаваемых ей самой в кристаллической решетке, но и коренным образом изменяет фазовое гомогенное состояние системы. Например, при преципитации углерода формируется фазовая граница β -SiC – Si, так как углерод и кремний при температуре эндотаксии вместе не сосуществуют [22], полученный полупроводниковый гетеропереход, изменяет электрофизические свойства системы. Данный процесс предворяет процесс растворения углерода по механизму смещения атомов углерода в междоузлия кремния, процесс ионизации междоузельных атомов углерода при температуре эндотаксии изменяет разноеобразие, соотношение и распределение концентрации тепловых, ростовых дефек-

тов, при этом надо принимать во внимание дефектообразование, обусловленное активными примесями выступающими в роли генераторов основных носителей в монокристаллической подложке.

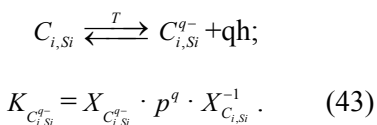
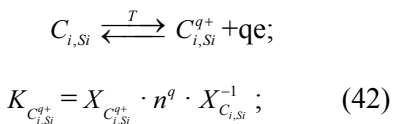
Процесс растворения атомов углерода занимающих положения междоузлий в монокристаллической подложке кремния можно представить квазихимическим уравнением и уравнением константы равновесия:



Константу равновесия растворения углерода в позиции междоузельного положения в матрице кремния представим уравнением, учитывающим его концентрационное пересыщение:

$$K_{C_{i,\text{Si}}} = X_{C_{i,\text{Si}}} \cdot (\Delta \widetilde{P}_C)^{-1} . \quad (41)$$

Междоузельные атомы углерода в кристаллической решетке кремния способны к ионизации с образованием положительно или отрицательно заряженного иона по схеме реакций ионизации и их констант равновесия:



Рассмотрим случай использования для эндотаксии монокристаллической подложки, легированной акцепторной примесью. Основные носители смещают равновесие реакции (42) вправо, в сторону образования положительно ионизованных междоузельных атомов углерода в матрице кремния.

Определим концентрацию растворенного и ионизованного в междоузлии углерода:

$$X_{C_{i,\text{Si}}^{q+}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}^{q+}} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot X_{A_{\text{Si}}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot \Delta \widetilde{P}_C ; \quad (44)$$

$$X_{C_{i,\text{Si}}^{q-}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}^{q-}} \cdot K_{A_{\text{Si}}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}} \cdot X_{A_{\text{Si}}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot \Delta \widetilde{P}_C . \quad (45)$$

Рассмотрим случай использования для эндотаксии монокристаллической подложки, легированной донорной примесью. Основные носители смещают равновесие реакции (43) вправо. Концентрации растворенного и ионизованного в междоузлии углерода определим следующим образом:

$$X_{C_{i,\text{Si}}^{q-}} = q^{\frac{q}{q+1}} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}^{q-}} \cdot K_i^{-q} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot X_{D_{\text{Si}}}^{\frac{q}{q+1}} \cdot \Delta \widetilde{P}_C ; \quad (46)$$

$$X_{C_{i,\text{Si}}^{q+}} = q^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}^{q+}} \cdot K_{D_{\text{Si}}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot K_{C_{i,\text{Si}}} \cdot X_{D_{\text{Si}}}^{\frac{-q}{q+1}} \cdot \Delta \widetilde{P}_C . \quad (47)$$

Из полученных выражений растворения атомов углерода по междоузлиям кремниевой матрицы (44–47) сделаем следующие выводы:

– междоузельные атомы углерода (в условиях пересыщения газовой фазы по гипотетическому давлению углерода) приобретают положительный заряд в подложках легированных акцепторной примесью, в которых основными носителями являются дырки (причем

концентрация междоузельных атомов растет с увеличением уровня легирования подложек кремния) и отрицательный заряд – в подложках легированных донорной примесью, в которых основными носителями являются электроны, а концентрация междоузельных атомов растет с увеличением уровня легирования подложек кремния;

– механические напряжения сжатия кристаллической решетки кремния в гетеросопряженной системе с карбидом кремния не благоприятствует растворению изовалентного углерода согласно механизму внедрения в решетку матрицы кремния.

При температуре эндотаксии междоузельный атом может быть однократно или двукратно ионизованным, что гипотетически может объяснить кинетические экспериментальные результаты эндотаксии карбида кремния.

Обсуждение результатов

Для обсуждения результатов целесообразно представить приведенные закономерности распределения собственно дефектообразования во взаимосвязи с дефектами, обусловленными посторонними примесями в кремниевой подложке в логарифмических координатах ($\ln X_{def} - \ln X_{pr}$), введя для упрощения, обобщенную константу равновесия (K).

При использовании подложек р-типа проводимости для процесса эндотаксии концентрация дефектов различной природы:

– концентрация вакансий на месте атомов кремния по модели Шоттки и Френкеля (28), (21)

$$\ln X_{V_{Si}^{q+}} = \ln K + \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}}; \quad (48)$$

– концентрация междоузельных атомов кремния по модели Френкеля (22), (23)

$$\ln X_{Si_i^{q+}} = \ln K + \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}}; \quad (49)$$

$$\ln X_{Si_i^{q-}} = \ln K - \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}}; \quad (50)$$

– концентрация растворенного углерода по механизму замещения заряженных вакансий на месте атомов кремния (39)

$$\ln X_{C_{Si}} = \ln K + \ln \Delta \widetilde{P}_C; \quad (51)$$

– концентрация растворенного углерода в позициях внедрения в междоузлия кремния (44), (45)

$$\ln X_{C_{i,Si}^{q+}} = \ln K + \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}} + \ln \Delta \widetilde{P}_C; \quad (52)$$

$$\ln X_{C_{i,Si}^{q-}} = \ln K - \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}} + \ln \Delta \widetilde{P}_C. \quad (53)$$

При использовании подложек n-типа проводимости для процесса эндотаксии концентрация дефектов различной природы:

– концентрация вакансий на месте атомов кремния по модели Шоттки (27) и Френкеля (24)

$$\ln X_{V_{Si}^{q+}} = \ln K - \frac{q}{q+1} \ln X_{D_{Si}}; \quad (54)$$

– концентрация междоузельных атомов кремния по модели Френкеля (25–26)

$$\ln X_{Si_i^{q+}} = \ln K - \frac{q}{q+1} \ln X_{D_{Si}}; \quad (55)$$

$$\ln X_{Si_i^{q-}} = \ln K + \frac{q}{q+1} \ln X_{D_{Si}}; \quad (56)$$

– концентрация растворенного углерода в позициях внедрения в междоузлия кремния (46–47)

$$\ln X_{C_{i,Si}^{q+}} = \ln K - \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}} + \ln \Delta \widetilde{P}_C; \quad (57)$$

$$\ln X_{C_{i,Si}^{q-}} = \ln K + \frac{q}{q+1} \ln X_{A_{Si}} + \ln \Delta \widetilde{P}_C. \quad (58)$$

Таким образом, согласно выражениям (48–53), увеличение уровня легирования исходных подложек кремния акцепторной примесью в процессе эндотаксии гетероструктур SiC/Si оказывает следующее влияние:

- увеличивает концентрацию положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния по моделям Шоттки и Френкеля;

- увеличивает концентрацию междоузельных положительно ионизованных атомов углерода в матрице кремния;

- увеличивает концентрацию положительно ионизованных междоузельных атомов углерода растворенного по механизму внедрения.

Концентрация вышеприведенных положительно заряженных точечных дефектов может оказывать влияние на механизм самокомпенсации при легировании SiC-пленки донорной примесью из газовой фазы. Увеличение концентрации вакансий на месте атомов кремния в монокристаллической подложке влияет на вакансионный механизм массопереноса углерода и кинетику роста SiC-пленки.

Кроме того, показано, что увеличение уровня легирования исходных подложек кремния донорной примесью в процессе эндотаксии гетероструктур SiC/Si оказывает следующее влияние, в соответствии с выражениями (54–58):

- уменьшает концентрацию положительно заряженных вакансий на месте атомов кремния, что не исключает увеличение концентрации отрицательно заряженных вакансий;

- увеличивает концентрацию отрицательно заряженных междоузельных атомов кремния в матрице кремния;

- увеличивает концентрацию отрицательно заряженных растворенных атомов углерода по механизму внедрения.

Вышеприведенные отрицательно заряженные точечные дефекты различной природы могут оказывать влияние на механизм самокомпенсации при легиро-

вании SiC-фазы акцепторной примесью из газовой фазы.

Таким образом, природа трудностей управляемого легирования обусловлена следующими причинами:

- явлением взаимного автолегирования сопряженных фаз посторонними примесями как из подложки, так и из формирующейся пленки;

- явлением скрытого геттерирования дислокационной сеткой движущейся в Si-фазе перед фронтом роста SiC-фазы;

- явлением самокомпенсации в процессе взаимодействия собственных дефектов различной природы и генерируемых посторонней примесью как из подложки, так и из газовой фазы.

Результаты анализа исследования влияния исходной Si-фазы монокристаллической подложки, используемой для эндотаксии по механизму твердофазного превращения ее в карбид кремния, показали следующее:

- от выбора концентрационного уровня легирования исходной подложки кремния зависит уровень генерации заряженных точечных дефектов различной природы;

- тип проводимости исходной Si-подложки влияет на вид и заряд точечных дефектов различной природы;

- знак заряда, степень ионизации и концентрация точечных дефектов различной природы влияют на управление уровнем легирования карбида кремния из газовой фазы посторонней примесью акцепторного или донорного типа в процессе формирования гетероструктур;

- знак заряда и природа точечных дефектов и их концентрация влияют на массоперенос и кинетику процесса эндотаксии, а также явление самокомпенсации при легировании карбида кремния посторонней примесью акцепторного или донорного типа в процессе роста пленки из газовой фазы.

Вышеизложенный материал позволяет на данном этапе формировать методом эндотаксии гомопереходы в SiC-фазе, обеспечивая практическую реализацию разработки приборов высокотемпературной электроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Casady, J. B.** Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review / J. B. Casady, R. W. Jonson // *Solid-State Electronics* – 1996. – Vol. 39. – № 10. – P. 1409–1422.
2. Мощные биполярные приборы на основе карбида кремния : Обзор / П. А. Иванов [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2005. – Т. 39. – Вып. 8. – С. 897–912.
3. **Иванов, А. М.** Радиационная стойкость широкозонного материала на примере SiC-детекторов ядерного излучения / А. М. Иванов, Н. Б. Строкан, А. А. Лебедев // *Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 82. – Вып. 4. – С. 137–141.
4. **Палатник, Л. С.** Ориентированная кристаллизация / Л. С. Палатник, И. И. Папилов. – Москва : Металлургия, 1964. – 408 с.
5. **Mogab, C. J.** Conversion of Si to epitaxial SiC by reaction with C_2H_2 / C. J. Mogab, H. J. Leamy // *Journal of Applied Physics*. – 1974. – Vol. 45. – № 3. – P. 1075–1084.
6. **Kim, B. C.** Heteroepitaxial 3C-SiC on Si with Various Carbonization Process Conditions / B. C. Kim, J. Coy // *Journal of Electronic Materials*. – 2009. – Vol. 38. – № 4. – P. 581–585.
7. **Орлов, Л. К.** Морфология гетероэпитаксиальных пленок β -SiC, выращенных на Si(111) методом химической конверсии в вакууме из паров гексана / Л. К. Орлов, В. И. Вдовин // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49. – Вып. 4. – С. 596–601.
8. **Кукушкин, С. А.** Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии : модель и эксперимент / С. А. Кукушкин, А. Б. Осипов // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 50. – Вып. 7. – С. 1188–1195.
9. **Кайданов, В. И.** Самокомпенсация электрически активных примесей собственными дефектами в полупроводниках типа A^+B^6 / В. И. Кайданов, С. А. Немов, Ю. И. Равич // *Физика и техника полупроводников*. – 1994. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 369–393.
10. **Лебедев, А. А.** Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния : Обзор / А. А. Лебедев // *Физика и техника полупроводников*. – 1999. – Т. 33. – Вып. 2. – С. 129–155.
11. **Медведев, Н. И.** Электронная структура кубического карбида кремния с 3d-примесями в Si- и C-позициях замещения / Н. И. Медведев, Н. И. Юрьева, А. Л. Ивановский // *Физика и техника полупроводников*. – 2003. – Т. 37. – Вып. 11. – С. 1281–1284.
12. **Зубрилов, А. С.** Электрические свойства гетеропереходов 3C-SiC/Si / А. С. Зубрилов // *Физика и техника полупроводников*. – 1994. – Т. 28. – Вып. 10. – С. 1742–1748.
13. **Чепурнов, В. И.** Анализ точечного дефектообразования в гомогенной фазе SiC формирующейся в процессе эндотаксии гетероструктуры SiC – Si / В. И. Чепурнов // *Вестник Самар. гос. техн. ун-та (Естественнонаучная серия)*. – 2006. – № 9 (49). – С. 72–91.
14. Влияние легирующей примеси на распределение точечных дефектов в гетероструктуре SiC – Si / В. И. Чепурнов [и др.] // *Вестник Самар. гос. техн. ун-та (Естественнонаучная серия)*. – 2008. – № 6 (65). – С. 352–366.
15. Особенности наноточечного дефектообразования в структуре rog-SiC/Si , полученной по диффузионной технологии для химических датчиков / В. И. Чепурнов [и др.] // *Вестник Самар. гос. техн. ун-та (Серия «Физико-математические науки»)*. – 2009. – № 2 (19). – С. 99–106.
16. Модель явлений переноса в системе (Si – C – H) при гетероэндотаксии структур SiC – Si / В. И. Чепурнов [и др.] // *Вестник Самар. гос. техн. ун-та (Естественнонаучная серия)*. – 2008. – № 6 (65). – С. 367–378.
17. Физико-химические основы технологии полупроводниковых материалов : учебник для вузов / В. В. Крапухин [и др.]. – Москва : Металлургия, 1982. – С. 228.
18. **Ковтуненко, П. В.** Физическая химия твердого тела : Кристаллы с дефектами / П. В. Ковтуненко. – Москва : Высшая школа, 1993. – 352 с.
19. **Мильвидский, М. Г.** Структурные дефекты в монокристаллических полупроводниках / М. Г. Мильвидский, В. Б. Освенский. – Москва : Металлургия, 1984. – 255 с.
20. **Колобов, Н. А.** Диффузия и окисление полупроводников / Н. А. Колобов, М. М. Самохвалов. – Москва : Металлургия, 1975. – С. 178.
21. **Verner, P.** Carbon diffusion in silicon. / P. Verner // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol. 73. – № 17. – P. 2465–2467.

22. Карбид кремния / Под ред. Г. Хениш, Р. Рой. – Москва : Мир, 1972. – С. 43.
 23. **Полинг, Л.** Общая химия / Л. М. Полинг. – Москва : Мир, 1974. – 846 с.

Поступила 09.12.2013 г.

Об авторе:

Чепурнов Виктор Иванович, доцент кафедры радиофизики и полупроводниковой микронано-электроники Самарского государственного университета (г. Самара, Россия), chvi44@yandex.ru

Для цитирования: Чепурнов, В. И. Кинетические особенности формирования гетероструктур β -SiC/Si методом эндотаксии / В. И. Чепурнов // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 28–42.

REFERENCES

1. Casady J. B., Jonson R. W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review. *Solid-State Electronics*. 1996, vol. 39, no. 10, pp. 1409 – 1422.
2. Ivanov P. A., Levinshstein M. E. Moshhnye bipolarnyye pribory na osnove karbida kremniya. Obzor [Strong bipolar semiconductors on the base of the silicon carbide. Overview]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* – The semiconductors physics and technique. 2005, vol. 8, no. 39, pp. 897 – 912.
3. Ivanov A. M., Strocen N. B., Lebedev A. A. Radiatsionnaya stojkost' shirokopolosnogo materiala na primere SiS-detektorov jadernogo izlucheniya [Radiation-tolerance of the wide-band gap materials on the example of SiC-detector nucleus emission]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* – Journal of Technical Physics. 2012, vol. 4, no. 82, pp. 137 – 141.
4. Palatnic L. S., Papirov I. I. Orientirovannaya kristallizatsiya [Oriented crystallization]. Moscow, Metallurgy Publ., 1964. 408 с.
5. Mogab C. J., Leamy H. J. Conversion of Si to epitaxial SiC by reaction with C_2H_2 . *Journal of Applied Physics*. 1974, vol. 45, no. 3, pp. 1075 – 1084.
6. Kim B. C., Coy J. Heteroepitaxial 3C-SiC on Si with Various Carbonization Process Conditions. *Journal of Electronic Materials*. 2009, vol. 38, no. 4, pp. 581–585.
7. Orlov L. K., Vdovin V. I. Morfologiya geterojepitaksial'nykh plenok β -SiS, vyrashhennykh na Si(111) metodom himicheskoy konversii v vakuume iz parov geksana [The morphology of a surface heteroepitaxial films β -SiC on Si(111) phase formation by chemical conversion method out of the vapor of hexane in vacuum]. *Fizika tverdogo tela* – Solid state physics. 2007, vol. 4, no. 49, pp. 596 – 601.
8. Kukushkin S. A., Osipov A. B. Novyy metod tverdogofaznoj jepitaksii karbida kremniya na kremnii: model' i jeksperiment [The new method of solid-phase epitaxial silicon carbide on silicon: model and experiment]. *Fizika tverdogo tela* – Solid state physics. 2008, vol. 7, no. 50, pp. 1188 – 1195.
9. Kaidanov V. I., Nemov S. A., Ravich Y. I. Samokompensatsiya jelektricheskii aktivnykh primesej sobstvennymi defektami v poluprovodnikah tipa [The self-compensation of the electrically-active impurities with the help of their own defects in semiconductors type]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* – The semiconductors physics and technique. 1994, vol. 3, no. 28, pp. 369 – 393.
10. Lebedev A. A. Centry s glubokimi urovnjami v karbide kremniya. Obzor. [The centers with deep levels in silicon carbide. Overview]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* – The semiconductors physics and technique. 1999, vol. 2, no. 33, pp. 129 – 155.
11. Medvedev N. I., Yurieva N. I., Ivanovsky A. L. Jelektronnaya struktura kubicheskogo karbida kremniya s 3d – primesjami v Si – i C – pozitsijah zameshheniya [The electric structure of the cubicsilicone carbide with 3d impurities in Si- and C- position replacement]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* – The semiconductors physics and technique. 2003, vol. 11, no. 37, pp. 1281 – 1284.
12. Zubrilov A. S. Jelektricheskie svojstva geteroperehodov 3S-SiC/Si [The electric property of hetero-transitions 3C-SiC/Si]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* – The semiconductors physics and technique. 1994, vol. 10, no. 28, pp. 1742 – 1748.
13. Chepurnov V. I. Analiz tochechnogo defektoobrazovniya v gomogennoj faze SiC formirujushhejsja v processe jendotaksii geterostrukturny SiC – Si [Single defects formation during homogenous phase of SiC forming in a process of endotaxial hetero-structure of SiC – Si]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo*

tehnicheskogo universiteta (Estestvennonauchnaja serija) – Samara state technical university bulletin (Natural sciences series). 2006, no. 9, vol. 49, pp. 72 – 91.

14. Chepurinov V. I. Vlijanie legirujushhej primesi na raspredelenie tochechnyh defektov v geterostrukture SiC – Si [Impact of doping agents on single defects distribution in SiC-Si hetero-structure]. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universitetata* (Estestvennonauchnaja serija) – Samara state technical university bulletin (Natural sciences series). 2008, no. 6, vol. 65, pp. 352 – 366.

15. Chepurinov V. I. Osobennosti nanotochechnogo defektoobrazovanija v strukture por-SiC/Si, poluchennoj po diffuzionnoj tehnologii dlja himičeskikh datchikov [Peculiarities of nanopoint single defects formation in por-SiC/Si structure acquired by applying diffusion technology for chemical sensor]. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universitetata* (Estestvennonauchnaja serija) – Samara state technical university bulletin (Physical and mathematical sciences series). 2009, no. 2, vol. 19, pp. 99 – 106.

16. Chepurinov V. I. Model' javlenij perenosa v sisteme (Si – C – H) pri geterojendotaksii struktur SiC – Si [System (Si – C – H) transfer phenomena model for hetero-endotaxe of SiC – Si structures]. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universitetata* (Estestvennonauchnaja serija) – Samara state technical university bulletin (Natural sciences series). 2008, no. 6, vol. 65, pp. 367 – 378.

17. Krapuhin V. V. Fiziko-himicheskie osnovy tehnologii poluprovodnikovyh materialov : uchebnik dlja vuzov [Physical and chemical basis of semiconductor materials: university textbook]. Moscow, Metallurgija Publ., 1982, 228 p.

18. Kovtunen P. V. Kristally s defektami [Crystals with defects]. *Fizicheskaja himija tverdogo tela* [Physical solid state chemistry]. Moscow, High school Publ., 1993, 352 p.

19. Milvidsky M. G., Osvensky V. B. Strukturnye defekty v monokristallicheskih poluprovodnikah [The structural defects in the monocrystalline semiconductors]. Moscow, Metallurgy Publ., 1984, 255 p.

20. Kolobov N. A., Samoshvalov M. M. Diffuzija i okislenie poluprovodnikov [Diffusion and oxidation of semiconductors]. Moscow, Metallurgy Publ., 1975, 178 p.

21. Verner P. Carbon diffusion in silicon. *Applied Physics Letters*. 1998, vol. 73, no. 17, pp. 2465 – 2467.

22. Karbid kremnija [Silicon Carbide]. Under ed. by Henish G., Roy R.. Moscow, Mir Publ., 1972, 43 p.

23. Poling L. Obshhaja himija [General Chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1974, 846 p.

About the author:

Chepurinov Viktor Ivanovich, associate professor (docent) of department of Radiophysics and Computer Modeling of Radio Systems of Samara State University (Samara, Russia), chvi44@yandex.ru

For citation: Chepurinov V. I. Kineticheskie osobennosti formirovanija geterostruktur β -SiC/Si metodom jendotaksii [Concentration of single defects in the Si-phase including SiC-phase, formation of endotaxe method of semiconductor heterostructure]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 28 – 42.

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ПОРОШКАХ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ

Г. В. Шилова, П. Г. Зверев, Л. И. Ивлева

В статье исследуется генерация второй гармоники (ГВГ) в порошках твердых растворов ниобата бария-стронция (SBN); устанавливается, что с повышением температуры в твердых растворах SBN наблюдается уменьшение эффективности ГВГ, связанное с фазовым переходом из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую фазу; определяются характерные температуры фазовых переходов для чистых и легированных кристаллов SBN.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, нелинейные среды, ниобат бария-стронция, сегнетоэлектрики, фазовый переход.

SECOND HARMONIC GENERATION IN POWDERED STRONTIUM BARIUM NIOBATE CRYSTALS

G. V. Shilova, P. G. Zverev, L. I. Ivleva

The work is devoted to the investigation of phase transitions using second harmonic generation (SHG) in strontium barium niobate (SBN) powders. In the bulk SBN crystals the phase matching conditions for SHG of 1064 nm radiation cannot be satisfied. Powders of SBN crystals with average size equaled to coherence length were investigated in the paper. The obtained experimental energy dependencies are described by the quadratic law that corresponded to the second order nonlinear process. It was found that the increase of crystal temperature resulted in the reduction of SHG efficiency is caused by phase transition of the crystal from ferroelectric to paraelectric phase. The phase transition temperatures for pure and doped SBN crystals were determined.

Keywords: second harmonic generation, nonlinear crystals, strontium barium niobate, phase transition.

Генерация второй гармоники (ГВГ) широко используется для получения лазерного излучения в новых спектральных диапазонах. Поиск новых нелинейных кристаллов, исследование их нелинейно-оптических характеристик является актуальной задачей современной лазерной физики. Среди твердотельных нелинейно-оптических материалов особое место занимают сегнетоэлектрические твердые растворы ниобата бария-стронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN-x), которые относятся к классу «активных диэлектриков» – диэлектриков, проявляющих качественно новые свойства под влиянием внешних воздействий.

Кристаллы ниобата бария-стронция обладают высокими значениями диэлектрической проницаемости, высокими пиро-, пьезо- и электрооптическими коэффициентами. SBN характеризуется высокими нелинейно-оптическими параметрами, поэтому может рассматриваться в качестве перспективного материала для создания эффективных удвоителей частоты [1; 5–6; 10]. Легирование кристаллов SBN ионами редкоземельных и переходных металлов приводит к появлению примесных дефектов в кристаллах, изменению их фазового состояния, приводящего к изменению оптических и нелинейных характеристик [1; 5].

Из-за малого двулучепреломления SBN условия фазового синхронизма для удвоения частоты лазерного излучения в видимой и ближней ИК области спектра не реализуются. Однако на основе сегнетоэлектрических кристаллов SBN можно создать элементы с периодической модуляцией доменной структуры, которые могут быть интересны для разработки компактных эффективных ГВГ. Целью данной работы было получение ГВГ в номинально чистых и легированных кристаллах SBN, а также исследование зависимостей эффективности ГВГ от состава и температуры нелинейной среды.

Известно, что в оптической среде вектор поляризуемости связан с вектором электрической напряженности электромагнитного поля нелинейным материальным уравнением:

$$P_i = \sum_k \alpha_{ik}(E) E_k, \quad (1)$$

где $\alpha_{ik}(E)$ можно разложить в ряд по степеням напряженности электромагнитного поля E как:

$$\alpha_{ik}(E) = \alpha_{ik} + \sum_{j=1}^3 \chi_{ikj} E_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{m=1}^3 \theta_{ikjm} E_j E_m + \dots, \quad (2)$$

где α_{ik} – линейная восприимчивость; χ_{ikj} – квадратичная нелинейная восприимчивость; θ_{ikjm} – кубическая нелинейная восприимчивость.

За процесс ГВГ отвечает коэффициент χ_{ikj} , который отличен от нуля в среде с нецентросимметричной структурой и обращается в ноль в центросимметричной среде. В изотропной нелинейной среде при коллинеарном взаимодействии волн интенсивность излучения на удвоенной частоте $I(2\omega)$ будет квадратично расти до тех пор, пока излучение идет синфазно с основным излучением $I(\omega)$. Из-за дисперсии на длине порядка

длины когерентности $l_{\text{ког}} = \pi / \Delta k$, где $\Delta k = (k(\omega) - k(2\omega))$, возникает волновая расстройка, которая приводит к уменьшению $I(2\omega)$ [4]. Поэтому для эффективной ГВГ обычно выбирают кристаллы с двулучепреломлением, в которых существуют направления распространения, вдоль которых выполняются условия фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах основная волна $I(\omega)$ будет обыкновенной, а волна второй гармоники $I(2\omega)$ – необыкновенной и тогда условие фазового синхронизма можно записать в виде $n_o(\omega) = n^e(2\omega)$.

Схема экспериментальной установки для исследования ГВГ в порошках SBN представлена на рис. 1. Одномодовый одночастотный YAG:Nd-лазер, работающий на длине волны 1,064 мкм с частотой следования импульсов 5 Гц, давал лазерные импульсы с энергией около 10 мДж и длительностью 12 нс. Фазовая пластинка $\lambda/2$ и призма Глана позволяли плавно изменять энергию импульсов лазерного излучения при сохранении его остальных характеристик: направления, расходимости, длительности импульса, когерентности.

Часть излучения лазера отводилась плоскопараллельной пластинкой на измеритель энергии лазерного излучения Ophir Nova-II (ФП), что давало амплитуду опорного луча, пропорциональную энергии возбуждающего излучения. После коллимации излучение на основной частоте ω направлялось на образец. Порошок исследуемого образца помещался на стеклянную подложку, находящуюся на медном блоке, температура которого менялась в диапазоне от 5 до 90 °C и контролировалась термопарой. Температура изменялась путем прокачки воды помпой терморегулятором, которая поддерживала температуру постоянной с точностью $\pm 3^\circ$.

При облучении возбуждающим излучением в порошке исследуемого вещества визуально наблюдалась генерация второй гармоники, излуче-

ние зеленого света. Это излучение собиралось короткофокусной линзой и коллиматором в волоконный световод и направлялось на вход спектрометра USB4000-UV-VIS, Ocean Optics. Спектр рассеянного излучения анализировался

при помощи программы SpectraSuite. В спектре наблюдался интенсивный пик ГВГ на длине волны 532 нм, амплитуда которого была пропорциональна энергии импульса излучения на удвоенной частоте.

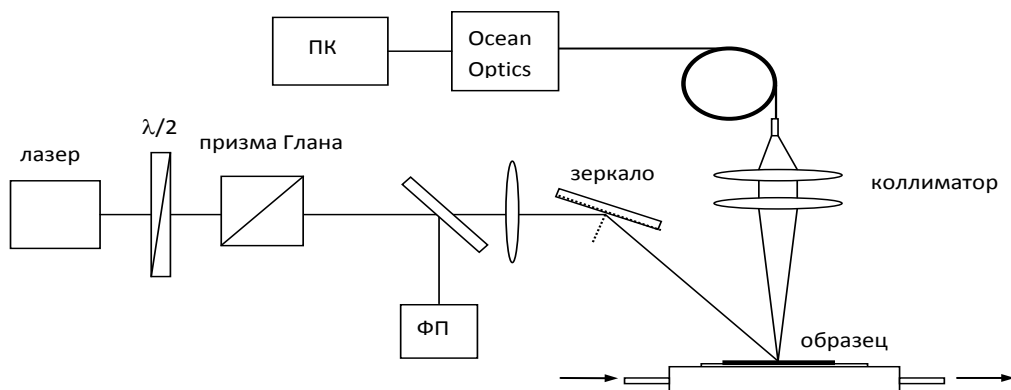


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования ГВГ в порошках кристаллов SBN

Из-за низкого двулучепреломления в кристаллах SBN отсутствуют направления, удовлетворяющие условию фазового синхронизма для ГВГ излучения с длиной волны 1,064 мкм. Поэтому в объемных образцах SBN ГВГ неэффективна. В работе были исследованы порошки кристалла SBN с размером зерен порядка длины когерентности. В табл. 1 представлены литературные данные по величине показателя преломления для обыкновенного и необыкновенного луча на длине волны

1 064 нм и 532 нм, а также расчетные значения длины когерентности для ГВГ в направлении, перпендикулярном оптической оси кристалла. Для этого использовалось выражение [9]:

$$l_{\text{ког}} = \frac{\lambda}{4(n^e(2\omega) - n_o(\omega))}. \quad (3)$$

Видно, что в кристаллах SBN длина когерентности для ГВГ излучения с длиной волны 1 064 нм равна 3–5 мкм.

Таблица 1
Рассчитанные длины когерентности для ГВГ излучения с длиной волны 1 064 нм в кристаллах SBN и данные по показателям преломления [8]

Кристалл	$n_o(\omega)$	$n^e(2\omega)$	$n^e(2\omega) - n_o(\omega)$	$l_{\text{ког}}$, мкм
SBN-61	2.25	2.326	0,076	3,487
SBN-75	2.25	2,341	0,091	2,912

Экспериментальные образцы исследуемых порошков изготавливались из номинально чистых кристаллов SBN-61, SBN-75 и SBN-61, выращенных из расплавов, легированных 0,5 вес.% Nd_2O_3 , 0,5 вес.% Ni_2O_3 , 0,01 вес.% Cr_2O_3 и 0,01

вес.% Co_3O_4 . В качестве образца сравнения использовался порошок из кристалла LiIO_3 . Образцы кристаллов объемом около 10 мм³ перетирались в яшмовой ступке. Измерение размера частиц порошка проводилось с помощью оптического ми-

кроскопа, сопряженного с фотокамерой и персональным компьютером и показали, что основную часть порошка составляют частицы SBN размером <5 мкм, то есть порядка длины когерентности для ГВГ излучения с длиной волны 1 064 нм.

Нами была измерена интенсивность излучения второй гармоники при ГВГ в порошках кристаллов SBN и LiIO_3 в зависимости от энергии падающего на образец излучения. Полученные экспериментальные зависимости представлены на рис. 2. Видно, что полу-

ченные экспериментальные кривые хорошо описываются квадратичной зависимостью (рис. 2 б). Крутизна энергетической зависимости определяется величиной квадратичной нелинейной восприимчивости (рис. 2 а). Согласно рис. 2, в номинально чистом кристалле SBN-61 (2), кристалле SBN-61, легированном Co (1) нелинейность несколько выше, чем в кристалле SBN-61:Cr (3) и LiIO_3 (4). В кристаллах SBN-61:Ni (5), и SBN-75 (6) нелинейность значительно ниже, чем в других кристаллах.

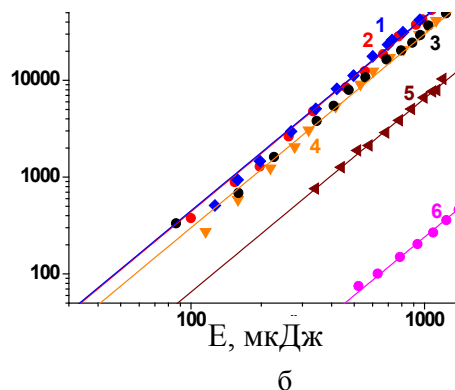
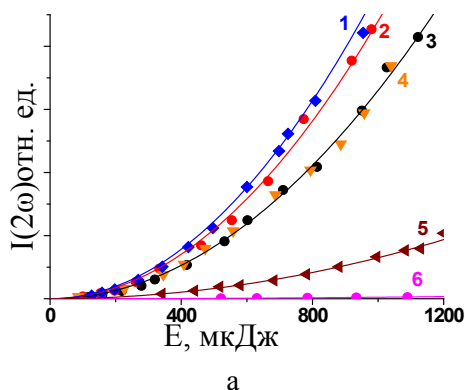


Рис. 2. Зависимости интенсивности второй гармоники при ГВГ излучения с длиной волны 1,064 мкм от энергии падающего на образец излучения в линейном (а) и двойном логарифмическом (б) масштабе, 1 – SBN-61:Co; 2 – SBN-61; 3 – SBN-61:Cr; 4 – LiIO_3 ; 5 – SBN 61:Ni; 6 – SBN-75

Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы квадратичными зависимостями вида $Y = A \cdot X^2$ (сплошные линии на рис. 2). Коэффициент A пропорционален квадрату квадратичной нелинейной восприимчивости χ в среде. Значения χ для

кристаллов SBN были рассчитаны относительно известного значения χ для кристалла LiIO_3 (табл. 2). Видно, что величина χ варьируется в широком диапазоне от $16,3 \cdot 10^{-12}$ до $1,2 \cdot 10^{-12}$ м/В в зависимости от собственного и примесного состава кристалла SBN.

Таблица 2

Коэффициенты (A) и расчетные относительные значения квадратичной нелинейной восприимчивости в исследованных кристаллах при T=300 К

Кристалл	A, отн. ед.	χ , 10^{-12} м/В
SBN-61:Co	0,04500	16,3
SBN-61	0,04400	16,1
SBN-61:Cr	0,03300	14,0
LiIO_3	0,03300	14,0
SBN-61:Ni	0,00650	6,2
SBN-75	0,00024	1,2

На рис. 3 представлены температурные зависимости интенсивности ГВГ в порошках исследованных кристаллов. Энергия излучения основной гармоники, длительность импульсов генерации и условия фокусировки в течение эксперимента оставались постоянными. Из рисунка видно, что в кристалле LiIO_3 интенсивность ГВГ в данном температурном интервале остается практически постоянной. В кристаллах SBN с ростом температуры наблюдается уменьшение эффективности ГВГ, причем зависимости имеют характерный излом. Кристаллы SBN характеризуются размытым фазовым переходом из сегнетоэлектрической полярной фазы в параэлектрическую неполярную фазу. Температура фазового перехода зависит от собственного и примесного состава кристалла SBN. На рис. 3 показано, что в кристаллах SBN-61 и SBN-61:Cr излом наблюдается при температурах 77 и

72 °C. В образцах SBN-61:Nd, SBN-61:Ni и SBN-75 он наблюдается при более низких температурах: 50, 45 и 35 °C соответственно.

Наблюдаемый изгиб в температурной зависимости, видимо, определяется температурой фазового перехода. Дальнейшее повышение температуры образцов приводит к плавному снижению интенсивности второй гармоники вплоть до ее полного исчезновения. Отметим, что при последующем охлаждении всех исследуемых образцов происходило восстановление нелинейных свойств, что свидетельствовало об отсутствии эффекта гистерезиса в данном температурном диапазоне. В табл. 3 показано, что полученные экспериментальные значения температуры фазового перехода согласуются с литературными данными, полученными другими экспериментальными методами [2; 7].

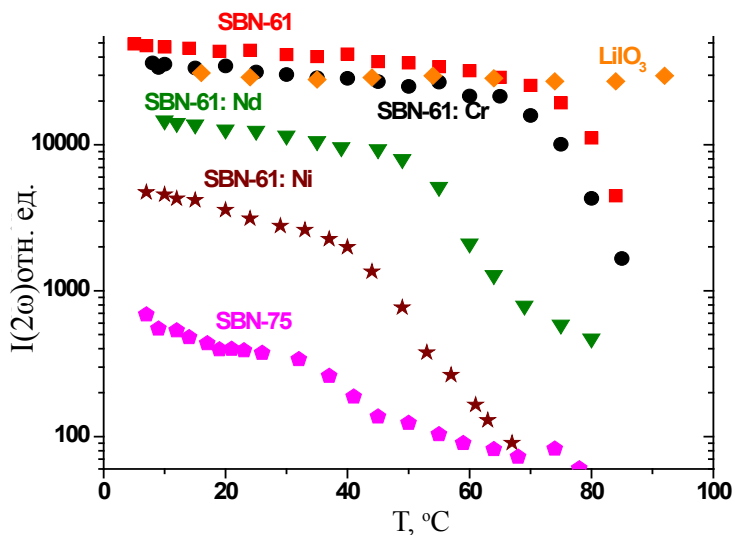


Рис. 3. Зависимость интенсивности второй гармоники при ГВГ от температуры образца

Заметим, что вторая группа образцов также характеризуется более низкой эффективностью ГВГ при комнатной температуре, причем в SBN-75 она была приблизительно в 200 раз ниже, чем в SBN-61.

Это свидетельствует о том, что образцы SBN разного состава при комнатной температуре находятся в различных фазовых состояниях, для которых характерно уменьшение величины квадратичной не-

линейной восприимчивости. Полученные данные могут дать информацию о степени нецентросимметричности фазового

состояния кристаллов SBN в зависимости от их собственного и примесного состава и температуры.

Т а б л и ц а 3

Зависимость температуры фазовых переходов в SBN от состава

Кристалл	T _{фп} , °C	
	Настоящая работа	Литературные данные
SBN-61	77	81 [2]
SBN-61:Cr	72	77 [7]
SBN-61:Ni	50	54 [Там же]
SBN-61:Nd	45	61 [2]
SBN-75	32	40–50 [Там же]

Итак, впервые при помощи ГВГ был исследован фазовый переход в твердых растворах SBN из сегнетоэлектрической полярной фазы в паразлектрическую неполярную. Нами было показано, что фазовый переход характеризуется плавной зависимостью от температуры с характерным изломом, определяемым температурой фазового перехода в среде. В ходе работы было установлено, что в ряде кристаллов SBN, для которых характерна низкая температура фазового перехода, при комнатной температуре наблюдается низкая эффективность ГВГ.

Проведенные исследования показали, что твердые растворы SBN-61, SBN-61:Cr обладают высокой квадратичной нелинейностью при комнатной температуре и могут быть перспективными для создания удвоителей частоты, нелинейных элементов с регулярной периодически модулированной доменной структурой для реализации условий квазисинхронизма. Зависимость величины квадратичной нелинейной восприимчивости в SBN от температуры может быть использована для изготовления нелинейных оптических элементов для ГВГ с эффективностью преобразования, контролируемой температурой среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние примесей редкоземельных элементов на фазовый переход и пьезоэлектрические свойства кристаллов ниобата бария-стронция / Т. Р. Волк [и др.] // Известия РАН (Физическая серия). – № 64. – 1154 (2000).
2. Волк, Т. Р. Процессы поляризации кристаллов ниобата бария-стронция в импульсных полях / Т. Р. Волк, Д. В. Исаков, Л. И. Ивлева // Физика твердого тела. – № 45. – 1463 (2003).
3. Особенности сегнетоэлектрических свойств кристаллов $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ / В. В. Гладкий [и др.] // Физика твердого тела. – № 45. – 2067 (2003).
4. Дмитриев, В. Г. Прикладная нелинейная оптика / В. Г. Дмитриев. – Москва: Радио и связь, 1982. – 512 с.
5. Двухфотонное межзонное поглощение в кристаллах ниобата бария стронция / П. Г. Зверев [и др.] // Квантовая электроника. – № 42. – 595 (2012).
6. Кузьминов, Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением / Ю. С. Кузьминов. – Москва: Наука, 1982. – 400 с.
7. Пилипенко, А. С. Температурная эволюция диэлектрических и акустических параметров монокристаллов SBN, легированных хромом / А. С. Пилипенко, А. И. Бурханов, Л. И. Ивлева // Физика твердого тела. – № 51. – 543 (2009).
8. Compositional dependence of optical and vibrational properties of strontium barium niobate ($\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$) / David C. [et al.] // Phys. Stat. Sol. (b) 244. 2137 (2007).

9. Kurtz, S. K. A powder technique for the evaluation of nonlinear optical materials / S. K. Kurtz, T. T. Perry // J. Appl. Phys. №39, 3798 (1968).

10. Prokhorov A.M. Ferroelectric crystals for laser radiation control / A. M. Prokhorov, Yu. S. Kuz'minov // Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New-York, (1990).

Поступила 13.01.2014 г.

Об авторах:

Шилова Галина Валерьевна, студент ФГПОУ ВПО НИУ «Московский энергетический институт» (г. Москва, Россия), 9valgal@mail.ru

Зверев Петр Георгиевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН (г. Москва, Россия), zverev@lst.gpi.ru

Ивлева Людмила Ивановна, доктор технических наук, заведующий лабораторией Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН (г. Москва, Россия), ivleva@lst.gpi.ru

Для цитирования: Шилова, Г. В. Генерация второй гармоники в порошках кристаллов ниобата бария стронция / Г. В. Шилова, П. Г. Зверев, Л. И. Ивлева // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 43–49.

REFERENCES

1. Volk T. R., Ivleva L. I., Ivanov V. V., Ped'ko B. B., Salobutin V. Y. Vlijanie primesej redkozemel'nyh jelementov na fazovyj perehod i p'ezojelektricheskie svoystva kristallov niobata barija-stroncija. [Influence of impurities of rare earth elements on the phase transition and piezoelectric properties of crystals of strontium barium niobate]. *Izvestija RAN, serija fizicheskaja* – Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics Series. 2000, vol. 64, no. 6, pp.1154 – 1158.

2. Isakov D. V., Volk T. R., Ivleva L. I. Processy poljarizacii kristallov niobata barija-stroncija v impul'snyh poljah [Investigation of the ferroelectric properties of crystals of strontium barium niobate by second harmonic generation]. *Fizika tverdogo tela* – Physics of the Solid State. 2009, vol. 51, no. 11, pp. 2199 – 2206.

3. Gladkiy V. V., Kirikov V. A., Volk T. R., Isakov D. V., Ivanova E. S. Osobennosti segnetoelektricheskikh svoystv kristallov $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ [Peculiarities of the ferroelectric properties of crystals $\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$]. *Fizika Tverdogo Tela* – Solid State Physics. 2003, vol. 45, no. 11, pp. 2067 – 2073.

4. Dmitriev V. G. Prikladnaja nelinejnaja optika [Applied Nonlinear Optics]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1982, 512 p.

5. Zverev P. G., Ivleva L. I., Karasik A. Y., Lukanin V. I., Chunaev D. S. Dvuhfotonnoe mezhzonnnoe pogloshhenie v kristallah niobata barija stroncija [Two-photon interband absorption in strontium barium niobate crystals]. *Kvantovaya elektronika* – Quantum Electronics. 2012, vol. 42, no. 7, pp. 595 – 598.

6. Kuz'minov Y. S. Segnetoelektricheskie kristally dlja upravlenija lazernym izlucheniem [Ferroelectric Crystals for Laser Radiation Control]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 400 p.

7. Pilipenko A. S., Burhanov A. I., Ivleva L. I., Temperaturnaja jevoljucija dijelektricheskikh i akusticheskikh parametrov monokristallov SBN, legirovannyh hromom [Temperature evolution of dielectric and acoustic properties of SBN doped with chrome]. *Fizika Tverdogo Tela* – Physics of the Solid State. 2009, vol. 51, no. 3.

8. Compositional dependence of optical and vibrational properties of strontium barium niobate ($\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$) / David C. [et al.] // Phys. Stat. Sol. (b) 244. 2137 (2007).

9. Kurtz S. K., Perry T. T. A powder technique for the evaluation of nonlinear optical materials. *Journal of Applied Physics*. 1968, vol. 39, pp. 3798 – 3813.

10. Prokhorov A. M., Kuz'minov Yu. S. Ferroelectric crystals for laser radiation control. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New-York, 1990.

About the authors:

Shilova Galina Valer'evna, student of Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russia), 9valgal@mail.ru

Zverev Petr Georgievich, head of Laboratory, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), Doktor Nauk degree holder in Physical and Mathematical sciences, zverev@lst.gpi.ru

Ivleva Lyudmila Ivanovna, head of Laboratory, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), Doktor Nauk degree holder in Technical sciences, ivleva@lst.gpi.ru

For citation: Shilova G. V., Zverev P. G., Ivleva L. I. Generacija vtoroj harmoniki v poroshkah kristallov niobata barija stroncija [Second harmonic generation in powdered strontium barium niobate crystals]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 43 – 49.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ

Н. Е. Фомин, В. И. Ивлев, В. А. Юдин

В статье рассматривается влияние примесей и температуры на электросопротивление алюминия и меди с позиций электронной теории металлов и упорядоченности их атомной структуры; делается вывод о том, что основной фактор влияния примесей на электропроводность алюминия и меди – эффективное сечение рассеяния; на основе двухзонной модели электронной структуры делается предположение о том, что примеси по-разному влияют на сечения рассеяния электронов и дырок в поливалентных металлах, что может привести к достаточно сложным температурным и концентрационным зависимостям этих свойств.

Ключевые слова: электросопротивление, электронная теория, алюминий, медь, влияние примесей.

EFFECT OF IMPURITIES ON THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF COPPER AND ALUMINUM

N. E. Fomin, V. I. Ivlev, V. A. Yudin

The influence of impurities and temperature on the resistance of aluminum and copper was considered from the position of the electron theory of metals and order of their atomic structure. It was concluded that the main factor of influence of impurities on the electrical conductivity of copper and aluminum is cross-section for scattering. On the basis of the two-band model of the electronic structure it was suggested that the impurities have a different effect on the cross-section for scattering of electrons and holes in the polyvalent metals and this may lead to a rather complex temperature and concentration dependence of these properties.

Keywords: electrical resistance, electronic theory, aluminum, copper, the influence of impurities.

В качестве дисперсных и волоконных наполнителей композиционных материалов довольно часто используют металлы и сплавы. Такие добавки могут существенно изменить электрофизические свойства материала. Естественно, степень и характер этого влияния зависят от свойств самих металлов. К числу наиболее часто применяемых в качестве металлических наполнителей относятся медь и алюминий.

Основной физической характеристикой проводящих материалов является электропроводность, однако к этим материалам предъявляются и дополнительные требования по механическим

свойствам, прежде всего прочности. Повышение прочности обычно достигается введением примесных элементов, но они, как правило, приводят к увеличению электросопротивления. Двойное противоположно направленное действие примесей заставляет искать пути оптимального их использования. Для этого необходимо детально исследовать механизмы влияния примесных атомов на комплекс физических свойств. В этом направлении на настоящий момент нет полной ясности.

В настоящей работе проведен анализ влияния температуры и примесей на основные электропроводящие материалы

© Фомин Н. Е., Ивлев В. И., Юдин В. А., 2014

кабельного производства – алюминий и медь – с использованием литературных данных о термических и электрических свойствах этих металлов.

В приближении времени релаксации [1] электросопротивление изотропного металла вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{m^*}{ne^2\tau(\eta)}, \quad (1)$$

где $\tau(\eta)$ – время релаксации при энергии электрона, равной энергии Ферми η ; n – концентрация электронов в металле; e – заряд электрона; m^* – эффективная масса электрона, или

$$\rho = \frac{12\pi^3\hbar Nq}{e^2 A}, \quad (2)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка; e – заряд электрона; N – число атомов в единице объема; q – сечение рассеяния при столкновении электронов проводимости с атомами; A – площадь поверхности Ферми [2].

$$A = \frac{8\pi m}{\hbar^2} \eta = 4\pi^3 \left(\frac{3n_0}{\pi} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

где m – масса электрона; n_0 – плотность электронов проводимости, равная произведению числа валентных электронов в атоме на число атомов в единице объема.

В уравнения (1–2) входят параметры, характеризующие кристаллическую (N) и электронную (A , η) структуру металла в целом, и параметр q , который, согласно своим свойствам, может быть отнесен к единичному конкретному атому, например, атому примеси. По этой причине в дальнейшем анализе мы опирались на формулу (2). В чистом металле все атомы одинаковы (неразличимы) и величина q имеет единственное (в статистическом понимании) значение. В металлических растворах

ситуация осложняется за счет наличия рассеивающих центров двух или более видов. Тогда в (1) под параметром q необходимо понимать некоторое эффективное сечение рассеяния, которое вычисляется по следующей формуле:

$$q^* = \frac{e^2 A}{12\pi^3 \hbar N} \rho. \quad (4)$$

Определение эффективного сечения рассеяния, согласно выражению (3), имеет смысл только в том случае, если проводимость металла или сплава носит чисто электронный характер, а также в случае, когда электронная структура описывается моделью одной зоны со сферической (или почти сферической) поверхностью Ферми [3]. Такая модель, как известно, приемлема для описания электрических свойств металлов первой группы периодической системы элементов, а также для большинства металлических расплавов [4]. В твердых поливалентных металлах, к которым относится алюминий, поверхность Ферми располагается в двух и более зонах, поэтому проводимость этих металлов носит смешанный электронно-дырочный характер. Следовательно, для описания электрических свойств таких, даже чистых, металлов необходимо вводить по крайней мере два параметра, характеризующих рассеяние электронов и дырок: q и q_+ .

Большинство примесей в алюминии и меди, используемых при производстве кабелей, находятся в состоянии твердого раствора. В этом случае для описания взаимодействия электронов проводимости с атомами необходимо четыре парциальных параметра рассеяния, что крайне затрудняет анализ экспериментальных данных с использованием даже простейших моделей. Однако использование представления об эффективном сечении рассеяния может дать некоторую информацию по интересующему нас вопросу.

В работе [5] получено соотношение для расчета энтропии однокомпонентного вещества в виде:

$$S = Nk \ln(1 + \chi_0 T^{3/2} \sigma^3), \quad (5)$$

где N – число атомов; k – постоянная Больцмана; χ_0 – постоянная, определяемая сортом вещества и независящая от температуры.

Величина σ , названная автором [5] параметром беспорядка, для кристаллов практически равна среднеквадратичной амплитуде тепловых колебаний. Практика показала, что параметр χ_0 следует рассматривать как подгоночный и рассчитывать его на основе экспериментальных данных. Чтобы исключить χ_0 , преобразуем (5):

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \frac{T_0}{T} \left[\frac{\exp(S/R) - 1}{\exp(S_0/R) - 1} \right]^{2/3}, \quad (6)$$

где T_0 – некоторая реперная температура, а S_0 и s_0 – значения энтропии и параметра σ при этой температуре.

Формула (6) была применена нами для расчета значений амплитуды тепловых колебаний атомов алюминия и меди в диапазоне температур от 0 К до температуры плавления. Для расчетов использовались данные по теплоемкости [6]. В качестве реперной была взята температура $T_0 = 250$ К. Энтропия вычислялась по стандартной формуле:

$$S(T) = \int_0^T \frac{C(T)}{T} dT, \quad (7)$$

где $C(T)$ – теплоемкость.

На рис. 1–2 показаны температурные зависимости параметра $\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$ и относительного электросопротивления $\frac{\rho}{\rho_0}$ меди и алюминия, ρ – электросопротивление при температуре T , ρ_0 – электросопротивление при реперной температуре T_0 .

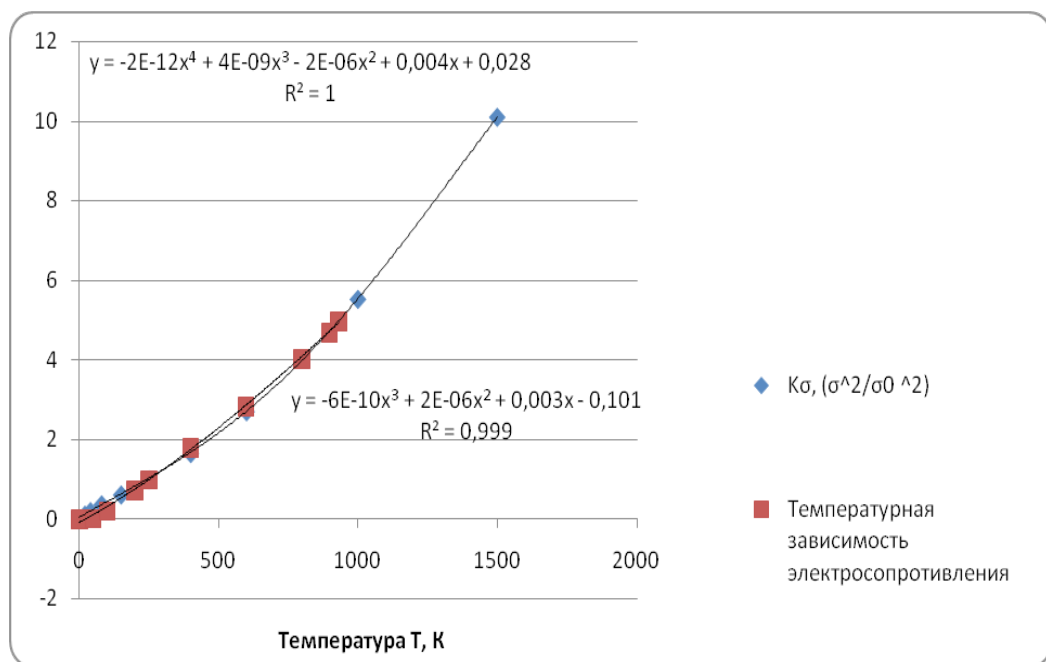


Рис. 1. Зависимость $\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$ и электросопротивления от температуры для Al

Согласно рисунку, зависимости $\sigma^2(T)$ и $\rho(T)$ для обоих исследованных металлов имеют общий характер: значения этого параметра нелинейно возрастают с увеличением температуры. Следовательно, электросопротивление чистых металлов практически полностью определяется смещением атомов из положений равновесия при тепловых колебаниях, и пропорционально квадрату амплитуды колебаний.

На рис. 3 приведены данные по влиянию примесей на электросопротивление меди, взятые из работы [7]. Из графика видно, что даже при добавлении к меди 0,1 % серебра, металла с меньшим удельным электрическим сопротивлением, общее сопротивление сплава возрастает на несколько процентов. Особенно резко снижают электропроводность меди такие примеси, как фосфор, железо, кобальт и мышьяк.

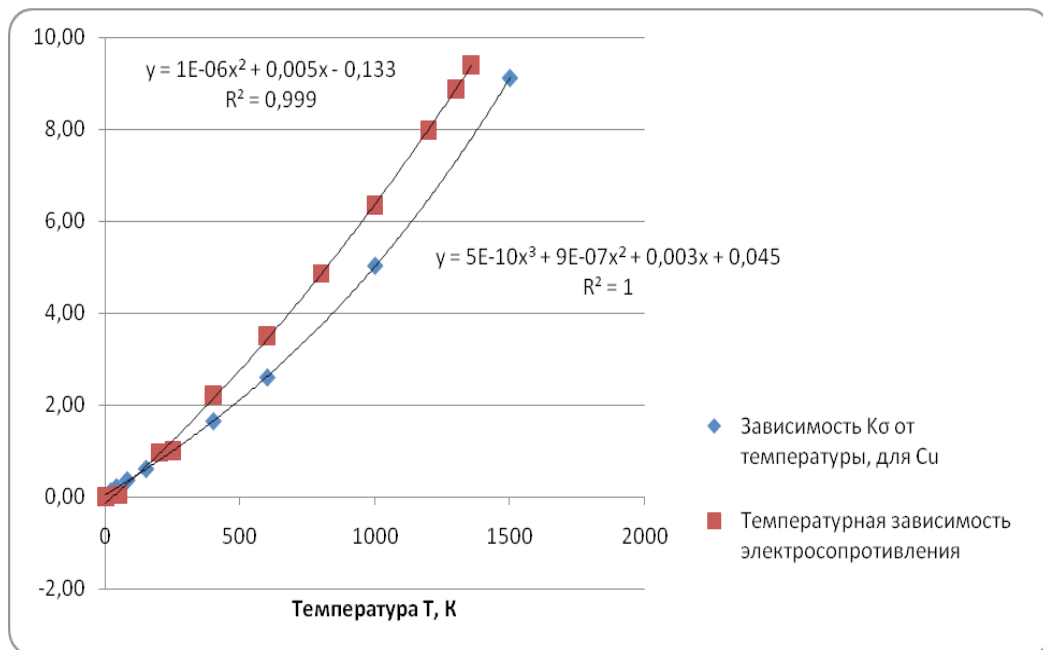
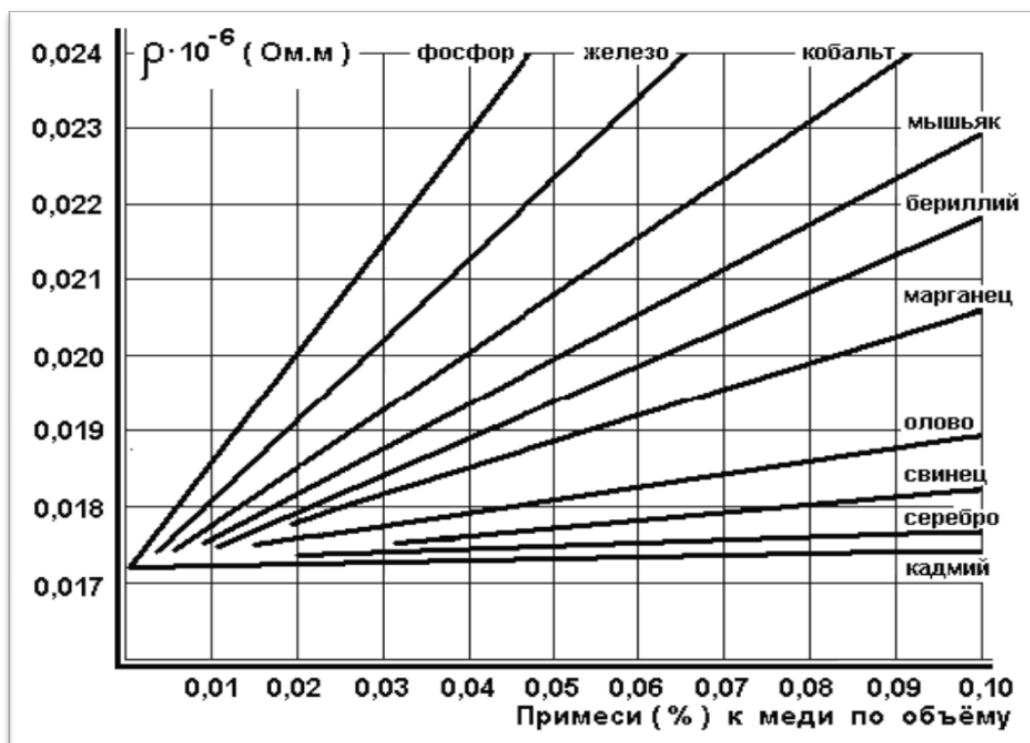


Рис. 2. Зависимость σ^2/σ_0^2 и электросопротивления от температуры для Cu

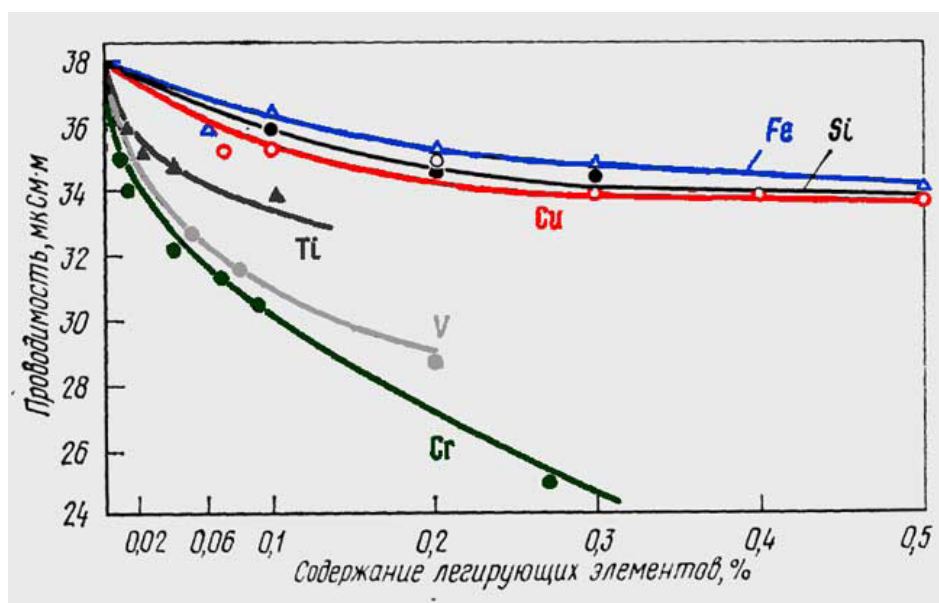
На рис. 4 приведены данные по влиянию примесей на электропроводность алюминия [8]. Как видно, наиболее сильное отрицательное влияние на электросопротивление алюминия оказывают примеси Cr, V, Mn и Ti.

Влияние примесей на электросопротивление металлов может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, размеры атомов растворителя и растворенного элемента раз-

личаются, что приводит к смещению атомов растворителя из их положений равновесия пропорционально разности атомных радиусов. Следовательно, чем сильнее отличаются атомные радиусы, тем большего увеличения электросопротивления можно ожидать. В таблице приведены значения атомных радиусов алюминия, меди и некоторых элементов, часто являющихся примесями в них.



Р и с . 3. Влияние примесей на электросопротивление меди [8]



Р и с . 4. Влияние примесей на электросопротивление алюминия [9]

Сопоставляя данные таблицы и рис. 3–4, мы сделали вывод, что разность атомных радиусов основного ме-талла и легирующего элемента не является основной причиной увеличения электросопротивления.

Т а б л и ц а

Характеристики атомов основного и примесных элементов

Элемент	Атомный радиус				Электронная конфигурация
	[7]	[10]	Ср.	Δr	
B	0,725	0,910	0,818	0,613	$2s^2 2p^1$
Be	1,140	1,130	1,135	0,295	$2s^2$
Ni	1,243	1,240	1,242	0,189	$3d^8 4s^2$
Fe	1,239	1,260	1,250	0,181	$3d^6 4s^2$
Cr	1,246	1,270	1,258	0,172	$3d^5 4s^1$
Cu	1,275	1,280	1,278	0,153	$3d^{10} 4s^1$
V	1,314	1,340	1,327	0,103	$3d^3 4s^2$
Mn	1,365	1,300	1,333	0,097	$3d^5 4s^2$
Zn	1,330	1,390	1,360	0,070	$3d^{10} 4s^2$
Al	1,430	1,430	1,430	0,000	$3s^2 3p^1$
Nb	1,426	1,450	1,438	-0,010	$4d^4 5s^1$
Ti	1,475	1,460	1,468	-0,050	$3d^2 4s^2$
Si	1,654	1,340	1,497	-0,070	$3s^2 3p^2$
Mg	1,593	1,600	1,597	-0,170	$3s^2$
Zr	1,616	1,600	1,608	-0,180	$4d^2 5s^2$
Tl	1,700	1,710	1,705	-0,280	$6s^2 6p^1$
Bi	1,600	1,820	1,710	-0,280	$6s^2 6p^3$
Pb	1,747	1,750	1,749	-0,320	$6s^2 6p^2$
Ca	1,970	1,970	1,970	-0,540	$4s^2$

Следовательно, примеси могут оказывать влияние на электропроводность посредством влияния на концентрацию электронов проводимости n (а через нее – на площадь поверхности Ферми) или на эффективное сечение рассеяния.

Согласно приведенным в последнем столбце табл. электронным конфигурациям атомов, введение большинства примесей должно привести к увеличению концентрации электронов проводимости как в алюминии, так и в меди. Следовательно, изменение концентрации электронов проводимости не является непосредственным решающим фактором при объяснении

влияния примесей на электросопротивление меди и алюминия.

Таким образом, основной фактор влияния примесей на электропроводность алюминия и меди – эффективное сечение рассеяния. В работах [9; 10] при анализе данных по электросопротивлению и термо-эдс было выяснено, что примеси по-разному влияют на сечения рассеяния электронов и дырок в поливалентных металлах. Это может привести к достаточно сложной температурной и концентрационной зависимостям этих свойств. Возможно, именно с этим фактором связано и влияние примесей на электросопротивление алюминия и меди.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блатт, Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах / Ф. Блатт. – Москва : Мир, 1971. – 470 с.
2. Власов, В. С. Металловедение / В. С. Власов – Москва : Наука, 2010. – 430 с.
3. Займан, Дж. Электроны и фононы / Дж. Займан. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1962. – 488 с.
4. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – Москва : Металлургия, 1989. – 383 с.
5. Ивлев, В. И. Абсолютная термо-эдс твердых и жидких металлических растворов на основе свинца / В. И. Ивлев, В. А. Юдин // Изв. АН СССР : Металлы. – 1983. – № 2. – С. 40–45.
6. Ивлев, В. И. К определению энтропии твердых тел и их расплавов // В. И. Ивлев. – Журнал физической химии. – 1987. – Вып. 4. – Т. 61. – С. 1122–1124.
7. Ивлев, В. И. Термо-эдс твердых и жидких металлических растворов на основе индия / В. И. Ивлев, В. А. Юдин // Изв. АН СССР : Металлы. – 1982. – № 3. – С. 36–39.
8. Кишкин, С. Т. Металловедение алюминиевых сплавов / С. Т. Кишкин. – Москва : Наука, 1985. – 342 с.
9. Крэкнелл, А. Поверхность Ферми / А. Крэкнелл, К. Уонг. – Москва : Атомиздат, 1978. – 352 с.
10. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – Москва : Мир, 1974. – 658 с.

Поступила 11.10.2013 г.

Об авторах:

Фомин Николай Егорович, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), uva201@mail.ru.

Ивлев Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), uva201@mail.ru.

Юдин Вячеслав Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), uva201@mail.ru.

Для цитирования: Фомин, Н. Е. Влияние примесей на электросопротивление меди и алюминия / Н. Е. Фомин, В. И. Ивлев, В. А. Юдин // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 50–57.

REFERENCES

1. Blatt F. Fizika jelektronnoj provodimosti v tverdyh telah [Physics of electronic conduction in solids]. Moscow, Mir Publ., 1971.
2. Vlasov V. S. Metallovedenie [Metal science]. Moscow, Nauka Publ., 2010, 430 p.
3. J. Ziman Jelektrony i fonony [Electrons and Phonons]. Moscow, Izdatel'stvo Inostrannoy Literatury Publ., 1962.
4. Zinoviev V. E. Teplofizicheskie svojstva metallov pri vysokih temperaturah [Thermal properties of metals at high temperatures]. Moscow, Metallurgy Publ., 1989, 383 p.
5. Ivlev V. I., Yudin V. A. Absoljutnaja termo-jeds tverdyh i zhidkih metallicheskih rastvorov na osnove svinca [Absolute thermopower of solid and liquid metal solutions based on lead]. *Izv. AN SSSR. Metally* – USSR Academy of Sciences Journal. Metals. 1983, no. 2, pp. 40 – 45.
6. Ivlev V. I. K opredeleniju jentropii tverdyh tel i ih rasplavov [About determination of entropy of solids and their melts]. *Zhurnal fizicheskoy himii* – Journal of Physical Chemistry. 1987, vol. 61, no. 4, pp. 1122 – 1124.
7. Ivlev V. I. Yudin V. A. . Termo-jeds tverdyh i zhidkih metalliche-skih rastvorov na osnove indija [Thermo-EMF of solid and liquid metallic solutions based on indium]. *Izv. AN SSSR. Metally* – USSR Academy of Sciences Journal. Metals. 1982, no. 3, pp. 36 – 39.
8. Kishkin S. T. Metallovedenie aljuminievych splavov [Aluminum alloys Metallurgical]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 342 p.
9. Cracknell A., Wong K. Poverhnost' Fermi [Fermi surface]. Moscow, Atomizdat, 1978.
10. Mott N. F, Davis E. Jelektronnye processy v nekrystallicheskih veshhestvah [Electronic Processes in Non-Crystalline Materials]. Moscow, Mir Publ., 1974.

About the authors:

Fomin Nikolai Egorovich, professor, head of Solid State Physics chair of Physics and Chemistry Institute of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, uva201@mail.ru.

Ivlev Viktor Ivanovich, professor of Solid State Physics chair of Physics and Chemistry Institute of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, uva201@mail.ru.

Judin Vjacheslav Alexandrovich, associate professor (docent) of Solid State Physics chair of Physics and Chemistry Institute of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, uva201@mail.ru.

For citation: Fomin N. E., Ivlev V. I., Judin V. A. Vlijanie primesej na jelektrisosprotivlenie medi i aljuminija [Effect Of Impurities On The Electrical Resistivity Of Copper And Aluminum]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 50 – 57.

УДК 547.569

О ДЕГИДРИРУЮЩИХ СВОЙСТВАХ 2,2'-(АНТРАЦЕН-9,10-ДИИЛИДЕН) БИС(4,5-ДИФЕНИЛ-2Н-ИМИДАЗОЛА)

**Л. А. Живечкова, А. А. Самсонкин, Е. Е. Мурюмин,
М. К. Пряничникова, Е. П. Коновалова, Б. С. Танасейчук**

В статье представлены результаты изучения дегидрирующих свойств 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазола), а также кинетики взаимодействия фенотиазина с 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазолом); высказывается предположение о строении продукта присоединения фенотиазина к 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазолу).

Ключевые слова: 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазол, бисимидазол, фенотиазин, кинетика, скорость реакции, дегидрирование, строение, свойства.

ON THE DEHYDRATING PROPERTIES OF 2,2'-(ANTHRACENE-9,10- DIYLIDENE) BIS(4,5-DIPHENYL-2H-IMIDAZOLE)

**L. A. Zhivechkova, A. A. Samsonkin , E. E. Muryumin,
M. K. Pryanichnikova, E. P. Konovalova, B. S. Tanaseichuk**

Has been studied dehydrating properties 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole). It was found that in the reaction with diphenylamine, hydroquinone, diphenylpicrylhydrazine, acetic acid is formed by source bisimidazole. It was found that in the reaction with phenotiazine – product attaching phenotiazine with 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole). Was the reaction kinetics of phenotiazine with 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole). Found that the rate of this reaction is described by the equation of the second order (the first for each of the participating in the reaction components). Suggested the structure of product attaching of phenotiazine to 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole).

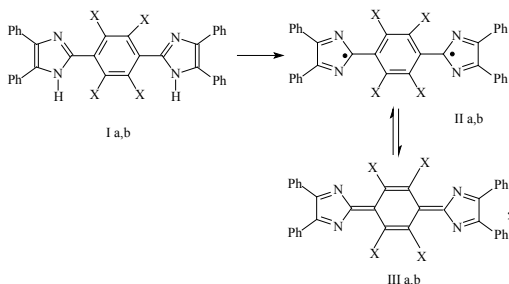
Keywords: imidazole, 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole), bisimidazole, phenotiazine, kinetics, the rate of reaction, structure, dehydrogenation, properties.

Ди- и полирадикалы представляют интерес в качестве строительных блоков для создания органических магнитов [3]. Радикалы триарилимидазолильного ряда в этом отношении являются весьма перспективными, поскольку устойчивы на воздухе и не реагируют с кислородом.

Простейшими системами, способными при окислении образовывать бирадикал, могли бы быть 1,4-бис(4,5-дифенилимидазолил-2)бензолы (I а–б). Однако при их окислении образуются хиноны (III а–б) [6]. Существование бирадикального состояния (II б) наблюдается только в случае X=F, что

подтверждается образованием соответствующего димера (схема 1). Роль атомов фтора в стабилизации бирадикального состояния объясняется влиянием, как их электронных, так и стерических эффектов [4]. На схеме 1 представлены возможные превращения структур (I), где в качестве заместителей в бензольном кольце могут быть атомы H и F.

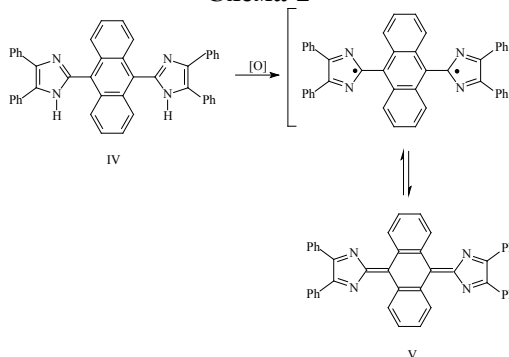
Схема 1



где а – Н; b – F. Нам представилось, что аналогичное равновесие должно существовать и в том случае, когда два имидазольных остатка связаны через фрагмент, создающий определенные пространственные затруднения к образованию хиноидной системы.

В качестве такого затрудняющего фрагмента был использован антрацен, и осуществлен синтез (2,2'-антрацен-9,10-диил)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазола) (IV), который при окислении гексацианоферратом (III) калия в щелочной среде образует хиноидное соединение 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазол) (V) [1].

Схема 2



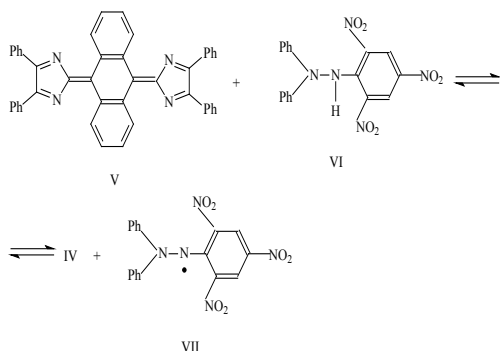
Хинон (V) представляет собой черные с красноватым блеском кристаллы, растворы которого в органических растворителях имеют ярко-красную окраску, но не дают сигнала ЭПР. Соединение (V) обладает дегидрирующими свойствами, его растворы обесцвечиваются при добавлении дифениламина, уксусной кислоты и гидрохинона. При этом в реакционной смеси был обнаружен исходный бисимидазол (IV).

Дегидрирующие свойства хинона (V) достаточно слабы. Так, если хинон (III b) способен дегидрировать спирт, то у хинона (V) эта способность практически отсутствует. Дегидрирующая способность хинона (V) ниже и по сравнению с аналогичной способностью 2,4,5-трифенилимидазола. Это подтверждается отсутствием обесцвечивания (V) в реакции хинона (V) с 2,4,5-трифенилимидазолом.

Низкие дегидрирующие свойства хинона (V) связаны с тем, что в бисимидазоле (IV) оба имидазольных цикла «вывернуты» из плоскости сопряжения с антраценовым циклом на $\sim 82^\circ$, а в хиноидной системе (V) имидазольные кольца сопряжены с антраценовым фрагментом. Квантово-химический расчет, выполненный неэмпирическим методом Хартри-Фока в базе 6–31 G из пакета прикладных программ GAMESS [5] показал, что более стабильной системой является бисимидазол (IV). Относительная стабильность (IV) составляет $-9427,52$ ккал/моль, а хинона (V) – $-9261,92$ ккал/моль. Разность энергий этих соединений равна $165,6$ ккал/моль, что составляет $\sim 2\%$ от относительной стабильности (IV) и (V).

Очень интересным является то, что хинон (V) реагирует с ДФПГ·Н (VI) с образованием в результате ДФПГ (VII) и бисимидазола (IV). Реакция является обратимой, и при взаимодействии бисимидазола (IV) с ДФПГ (VII) образуются соответственно хинон (V) и ДФПГ·Н (VI) (схема 3). Однако, протекание обратной реакции с образованием соединений (V) и (VI) происходит несколько труднее, что подтверждается квантово-химическими расчетами.

Схема 3



В случае реакции хинона (V) с фенотиразином (VIII) красная окраска первого постепенно ослабевает, и через некоторое время раствор становится зеленым. В реакционной смеси по данным ТСХ (элюент хлороформ) нет бисимидазола (IV), но присутствует новое соединение (XI), которое, скорее всего, является продуктом взаимодействия фенотиазинильного радикала (X) с хиноном (V).

При ЭПР исследованиях зеленого раствора не было обнаружено сигнала, т. е. образующийся продукт (XI) не имеет радикальной формы, а также не может являться комплексом с переносом заряда, поскольку обладающий более сильными электронодонорными свойствами N-метилфенотиазин с хиноном (V) не реагирует. Об этом свидетельствует отсутствие изменения окраски реакционной смеси.

Взаимодействие хинона (V) с фенотиразином (VIII) протекает достаточно медленно, что позволило изучить кинетику данной реакции.

Для этого на спектрофотометре «Specord UV VIS» были предварительно сняты электронные спектры поглощения хинона (V) и фенотиазина (VIII) в дихлорметане в видимой области. Фенотиазин (VIII) в данном растворителе не имеет максимумов поглощения, а для хинона (V) зафиксированы два: при длине волны 400–410 нм и – очень интенсивный – в области 513–518 нм. Изучение электронных спектров поглощения хинона (V) в дихлорметане (рис. 1) и бензоле при разных концентрациях показало подчинение оптической плотности растворов закону Бугера-Ламберта-Бера.

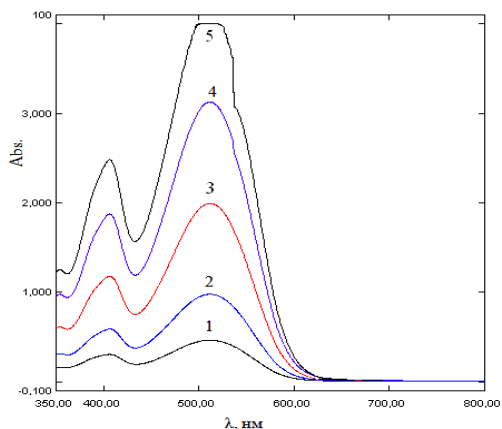


Рис. 1. Электронные спектры поглощения растворов хинона (V) различной концентрации в дихлорметане (1 – $1 \cdot 10^{-5}$ М, 2 – $2 \cdot 10^{-5}$ М, 3 – $4 \cdot 10^{-5}$ М, 4 – $6 \cdot 10^{-5}$ М, 5 – $8 \cdot 10^{-5}$ М)

Изучение кинетики реакции хинона (V) с фенотиразином (VIII) проводилось в дихлорметане на максимуме поглощения хинона (V) (513 нм) и соотношении компонентов 1:1 при исходных концентрациях реагентов $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Спектрофотометрические измерения проводили на спектрометре «UV-1800» в режиме спектрофотометрических и кинетических исследований. При этом интенсивность максимума поглощения при длине волны 513 нм с течением времени уменьшалась и появлялся новый максимум в области 650–660 нм (рис. 2).

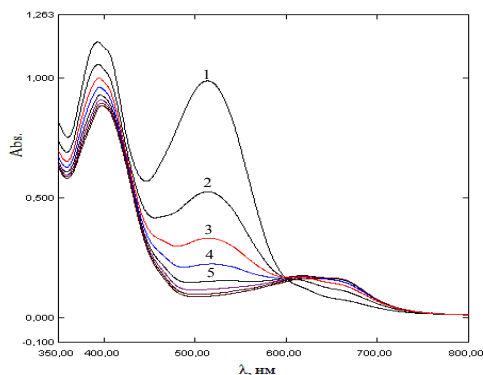


Рис. 2. Изменение электронных спектров поглощения системы хинон (V) + фенотиазин (1:1) в дихлорметане во времени (1 – начало реакции; 2–5 мин; 3–10 мин; 4–15 мин; 5–20 мин и т. д. через 5 мин)

Полученные экспериментальные данные были использованы для определения порядка реакции графическим способом. Наличие линейной зависимости в координатах $1/C = f(t)$ в пределах превращения хинона (V) до 70–75 % свидетельствует об общем втором порядке реакции (первом по каждому из реагентов). Расчет экспериментальных данных с помощью программы Microsoft Office Excel представлен уравнением:

$$y = 35,7x + 2,33 \cdot 10^4; \quad R = 0,9978.$$

Коэффициент корреляции подтверждает наличие линейной зависимости. Константа скорости реакции равна 35,7 л/моль·с. Отложенный на оси ординат отрезок, равный $2,33 \cdot 10^4$, соответствует величине $1/C_0$.

При попытке изучения кинетики данной реакции в менее полярном растворителе (бензоле) при тех же концентрациях, что и в дихлорметане, было обнаружено, что она протекает очень медленно. В связи с этим исходную концентрацию хинона (V) мы оставили прежней, а фенотиазина (VIII) – увеличили в 10 раз и реакционную смесь готовили в соотношении компонентов хинон

(V) : фенотиазин (VIII) = 1:20. Использование такого соотношения привело к тому, что реакция стала реакцией псевдопервого порядка по отношению к хинону (V).

Проведенные кинетические исследования при длине волны 513 нм показали, что реакция протекает на 90 % за 35 мин. Построение графиков в координатах $\ln C_0/C = f(t)$ и расчет с помощью программы Excel указывает на наличие линейной зависимости, проходящей через начало координат, что соответствует реакции первого порядка.

$$y = 0,0015x; \quad R = 0,9959$$

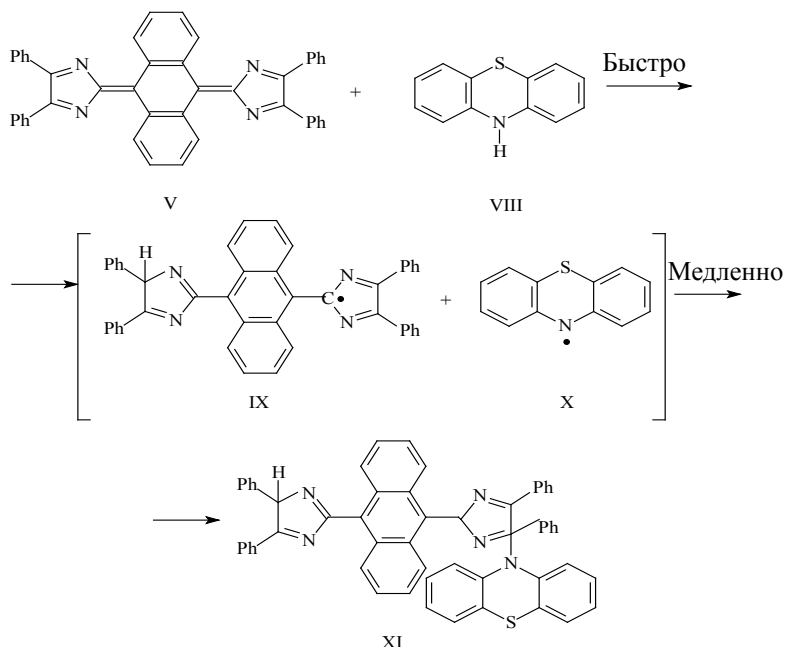
Константа скорости реакции при данных условиях равна $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Методом наименьших квадратов были рассчитаны среднее значение константы и доверительный интервал:

$$K_{cp} = (1,55 \pm 0,16) \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

Полученные кинетические данные позволяют предложить возможный механизм реакции (схема 4).

Схема 4



На медленной первой стадии происходит отрыв атома водорода из положения 10 (N–H-связи) фенотиазина (VIII) с промежуточной стадией образования двух радикалов (IX–X), которые затем быстро реагируют друг с другом. При этом из-за стерических затруднений, создаваемых антраценовым кольцом, присоединение атома водорода и фенотиазинильного радикала (X) происходит по положениям 4(5) имидазольного цикла.

Экспериментальная часть

Анализ продуктов проводили методом ТСХ на пластинках Silufol UV-254 (элюент – хлороформ), проявляли при УФ-облучении.

Синтез 2,2'-(антрацен-9,10-диилден)-бис(4,5-дифенил-2Н-имидазола) (IV) был осуществлен согласно литературной методике [2].

Электронные спектры поглощения в видимой области в бензоле и дихлорметане регистрировались на приборах «Specord UV VIS» и «UV-1800» при толщине поглощающего слоя 10 мм. За скоростью реакции хинона (V) с фенотиразином (VIII) следили по изменению оптической плотности раствора с течением времени при длине волны 513 нм. Исходные концентрации реагентов варьировали в пределах 10^{-4} – 10^{-3} моль/л. Константы скорости реакции рассчитывали графически, используя зависимость $1/C = f(t)$, где C – текущая концентрация хинона (V), и с помощью программы «Microsoft Office Excel». Порядок реакции определяли в соответствии с [1].

Квантово-химический расчет был выполнен неэмпирическим методом Хартри-Фока в базисе 6–31 G из пакета прикладных программ GAMESS [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы физической химии : Теория и задачи : учебное пособие для вузов / В. В. Еремин [и др.]. – Москва : Экзамен, 2005. – 480 с.
2. Редокс-индуцированная обратимая трансформация системы хинон – дианион на основе 2,2'-антрацент-9,10-диилденбис(4,5-дифенил-2Н-имидазола) / Б. С. Танасейчук [и др.] // Журнал органической химии. – 2013. – Т. 4. – № 5. – С. 756–759.
3. Allinson, G. Organic molecular magnets – the search for stable building blocks / G. Allinson, R. J. Bushby, J.-L. Paillaud // Journal Materials Science: Materials in Electronics. – 1994. – Vol. 5. – P. 67–74.
4. Kikuchi, A. Definitive evidence for the contribution of biradical character in α -closed-shell molecule, derivative of 1,4-bis-(4,5-diphenylimidazol-2-ylidene)cyclohexa-2,5-diene / A. Kikuchi, F. Iwahori, J. Abe // Journal American Chemical Society. – 2004. – Vol. 126. – P. 6526–6527.
5. General atomic and molecular electronic structure system / M.W. Schmidt [et al.] // J. Comput. Chem. – 1993. – Vol. 14. – P. 1347–1363.
6. Structures and chromotropic properties of 1,4-bis-(4,5-diphenylimidazol-2-yl)benzene derivatives / Y. Sakaino [et al.] // Journal American Chemical Society. – 1979. – Vol. 5. – № 8. – P. 1241–1244.
7. Veciana, J. Organic Magnets / J. Veciana, H. Iwamura // MRS Bulletin. – 2000. – P. 41–45.

Поступила 11.01.2014 г.

Об авторах:

Живечкова Лариса Александровна, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Самсонкин Александр Александрович, студент химического отделения Института физики и химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Мурюмин Евгений Евгеньевич, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), mur_ee@mail.ru

Коновалова Евгения Петровна, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Пряничникова Маргарита Константиновна, ведущий инженер кафедры органической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Танасейчук Борис Сергеевич, доктор химических наук, профессор кафедры органической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), профессор, orgchem@mrsu.ru

Для цитирования: О дегидрирующих свойствах 2,2'-(антрацен-9,10-диилиден)бис(4,5-дифенил-2Н-имидазола) / Л. А. Живечкова [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014 – № 1. – С. 58–63.

REFERENCES

1. Eremin V. V., Kargov S. I., Uspenskaya I. A., Kuzmenko N. E., Lunin V. V. Osnovi fizicheskoi khimii. Teoriya i zadachi: uchebnoe posobie dlya vuzov [Basics of physical chemistry. Theory and objectives: universities guidebook]. Moscow, Examen Publ., 2005, 480 p.
2. Tanaseichuk B. S., Samsonkin A. A., Pryanichnikova M. K., Dolganov A. V. Redoks-inducirovannaja obratimaja transformacija sistemy hinon – dianion na osnove 2,2'-antracene-9,10-diilidenbis(4,5-difenil-2N-imidazola) [Redox-induced reversible transformation of a system quinone–dianion based on 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2N-imidazole)]. *Zhurnal organicheskoy himii* – Russian Journal of Organic Chemistry. 2013, vol. 49, no. 5, pp. 739–742.
3. Allinson G., Bushby R. J., Pailland J.-L. Organic molecular magnets – the search for stable building blocks. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 1994, vol. 5, pp. 67 – 74.
4. Kikushi A., Iwahori F., Abe J. Definitive evidence for the contribution of biradical character in o-closedshell molecule, derivative of 1,4-bis-(4,5-diphenylimidazol-2-ylidene)cyclohexa-2,5-diene. *Journal of American Chemical Society*. 2004, vol. 126, pp. 6526 – 6527.
5. Schmidt M. W., Balduvige K. K., Boats J. A., Elbert S. T., Gordon M. S., Jensen J. J., Kosei S., Matsunaga N., Ngugen K. A., Su S., Windus T. L., Dupuis M., Montgomery J. A. General atomic and molecular electronic structure system. *Journal of Computational Chemistry*. 1993, vol. 14, pp. 1347 – 1363.
6. Sakaino Y., Kakisawa H., Kusumi T., Maeda K. Structures and chromotropic properties of 1,4-bis-(4,5-diphenylimidazol-2-yl)benzene derivatives. *Journal of American Chemical Society*. 1979, vol. 44, no. 8, pp. 1241 – 1244.
7. Veciana J., Ivamura H. Organic Magnets. *MRS Bulletin*. 2000, pp. 41 – 45.

About the authors:

Zhivechcova Larisa Aleksandrovna, associate professor of chair of Physical Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Chemical sciences, orgchem@mrsu.ru.

Samsonkin Aleksandr Aleksandrovich, student of Chemical Department of Physical and Chemical Institute of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), orgchem@mrsu.ru.

Muryumin Evgeny Evgenievich, associate professor of chair of Physical Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Chemical sciences, mur_ee@mail.ru.

Pryanichnikova Margarita Konstantinovna, engineer of chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), orgchem@mrsu.ru.

Konovvalova Evgeniya Petrovna, associate professor of chair of Physical Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Chemical sciences, orgchem@mrsu.ru.

Tanaseichuk Boris Sergeevich, professor of chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Doctor Nauk degree holder in Chemical sciences, orgchem@mrsu.ru.

For citation: Zhivechcova L. A., Samsonkin A. A., Muryumin E. E., Pryanichnikova M. K., Konovvalova E. P., Tanaseichuk B. S. O degidriruyuchih svoistvah 2,2'-(antracene-9,10-diyliden)bis(4,5-difenil-2H-imidazola) [On the dehydrating properties of 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole)]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 58 – 63.

КОНСТАНТЫ ДИССОЦИАЦИИ ДИМЕРОВ 2-(*n*-АЛЛИЛОКСИФЕНИЛ)- И 2-(*n*-ПРОПАРГИЛОКСИФЕНИЛ)- 4,5-ДИФЕНИЛИМИДАЗОЛИЛОВ

**А. А. Буртасов, М. К. Пряничникова, Е. В. Безрукова,
Л. Г. Тихонова, Б. С. Танасейчук**

В статье представлены результаты определения констант диссоциации димеров 2-(*n*-аллилоксифенил)- и 2-(*n*-пропаргилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолилов; показано, что равновесие процесса диссоциации во многом определяется стерическим фактором.

Ключевые слова: имидазол, 2-(*n*-аллилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолил, 2-(*n*-пропаргилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолил, димер, диссоциация, химическое равновесие.

THE CONSTANTS OF DISSOCIATION OF DIMERS 2-(*p*-ALLYLOXYPHENYL)- AND 2-(*p*-PROPARGYLOXYPHENYL)- 4,5-DIPHENYLIMIDAZOLYLS

**A. A. Burtasov, M. K. Pryanichnikova, E. V. Bezrukova,
L. G. Tichonova, B. S. Tanaseichuk**

The constants of dissociation of dimers 2-(*p*-allyloxyphenyl)- and 2-(*p*-propargyloxyphenyl)-4,5-diphenylimidazolyls was defined. It was shown that the equilibrium of dissociations process is largely determined by a steric factor.

Keywords: imidazole, 2-(*p*-allyloxyphenyl)-4,5-diphenylimidazolyl, 2-(*p*-propargyloxyphenyl)-4,5-diphenylimidazolyl, dimer, dissociation, chemical equilibrium.

Исследование влияния заместителей на относительную стабильность триарилимидазолильных радикалов, обладающее термодинамическими характеристиками (энтальпия, энтропия и изменение свободных энергий), показало, что наличие электронодонорных заместителей в фенильных кольцах триарилимидазолилов увеличивает относительную стабильность радикалов [1; 4–5].

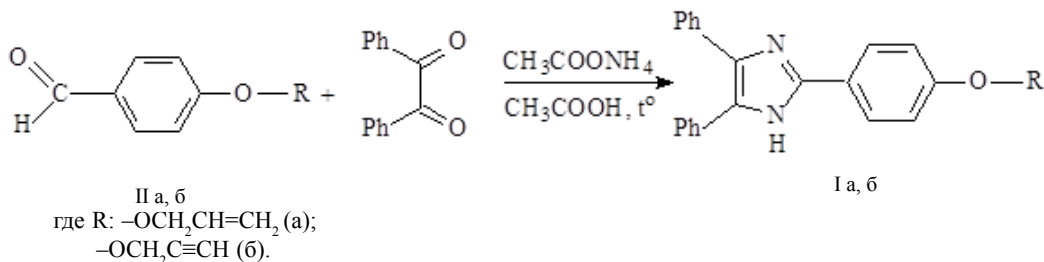
Нам представилось интересным исследовать роль и влияние заместителей, содержащих алкинильный или алкинильный фрагмент, таких как –OCH₂CH=CH₂ и –OCH₂C≡CH, на стабильность имидазолильных радикалов. В этом случае ненасыщенная связь не вступает в пря-

мое сопряжение с фенильным кольцом, проявляет только электроноакцепторные свойства и должна, по сравнению с метоксигруппой, затруднять диссоциацию димеров на радикалы. Кроме того, такие радикалы могут представлять интерес, в связи с наличием у них двойной или тройной связи, в качестве строительных блоков при синтезе органических магнитоактивных материалов [3; 7].

Синтез необходимых для данного исследования имидазолов (I а–б) был осуществлен взаимодействием соответствующих *n*-гидроксibenзальдегидов (II а–б) с бензилом и ацетатом аммония в уксусной кислоте при нагревании по методу Давидсона [6].

© Буртасов А. А., Пряничникова М. К., Безрукова Е. В., Тихонова Л. Г., Танасейчук Б. С., 2014

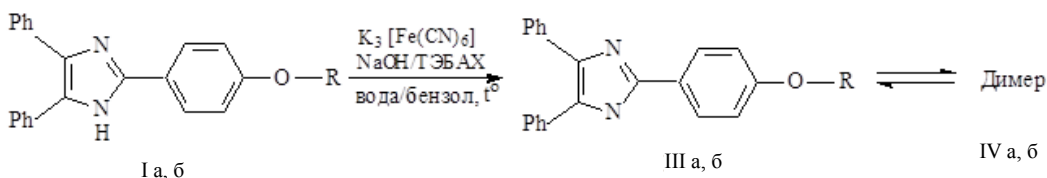
Схема 1



Димеры радикалов (IV а–б) были получены окислением соответствующих имидазолов (III а–б) феррициани-

дом (III) калия в щелочной среде в двух-фазной системе бензол/вода и выделены в кристаллическом виде.

Схема 2



При растворении димеров (IV а–б) бензол приобретает зеленую окраску. Это свидетельствует об их легкой диссоциации на радикалы (III а–б), что является характерным для большинства имидазолильных радикалов.

Спектр ЭПР радикалов (III а–б) представляет собой синглет, что указывает на четко центрированный на атоме углерода C_2 радикальный центр.

Зеленая окраска растворов (III а–б) сохраняется на воздухе в течение длительного времени и усиливается при освещении. Это свидетельствует о том, что димеры (IV а–б) проявляют фотохромные свойства

и радикалы (III а–б) устойчивы по отношению к кислороду воздуха.

Для оценки роли заместителей и их влияния на константу диссоциации димеров радикалов (IV а–б) спектрофотометрически в бензоле на максимуме поглощения соответствующего радикала были изучены равновесия димер радикал и рассчитаны термодинамические параметры этого процесса для 70°C .

Полученные результаты приведены в таблице, наряду с аналогичными величинами, рассчитанными как для димера 2,4,6-трифенилимидазолила (V), так и для димера 4,5-дифенил-2-(*n*-метоксифенил) имидазолила (VI) [2].

Т а б л и ц а

Термодинамические параметры для диссоциации димеров радикалов (IVa) и (IVб) в бензоле (70°C)

Название димера	λ , нм	$\Delta H^\ddagger$, кДж/моль	$\Delta S^\ddagger$, Дж/(моль · К)	$\Delta G^\ddagger$, кДж/моль
Димер 2-(<i>n</i> -аллилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолила (IVa)	455	62,3	87,4	32,3
Димер 2-(<i>n</i> -пропаргилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолила (IVб)	430	71,9	138,1	24,5
Димер 2,4,5-трифенилимидазолила (V)	440	64,9	95,9	32,0
Димер 2-(<i>n</i> -метоксифенил)-4,5-дифенилимидазолила (VI)	440	53,6	72,4	28,8

Согласно полученным результатам, значение энтальпии процесса диссоциации димеров (IV а–б, V, VI) является наименьшим в случае наличия в качестве заместителя в положении 2 имидазольного цикла метокси- (VI), а наибольшим – пропаргилоксигруппы (IV б). Это может быть объяснено только тем, что как тройная, так и двойная связь проявляют акцепторные свойства.

Изменение свободной энергии для всех исследованных димеров (IV а–б, V, VI) существенно только для пропаргильного производного (IV б), где оно является наименьшим. В то же время значение энтропии процесса диссоциации возрастает от метоксипроизводного (VI) до пропаргильного производного (IV б) в порядке (VI) < (IV а) < (V) < (IV б).

Скорее всего, возрастание энтропии процесса диссоциации в случае димера (IV б) может быть связано с тем, что даже в *n*-положении фенильного кольца алкинильный фрагмент препятствует процессу димеризации радикалов (III б).

Значения активационного барьера для диссоциации димеров (IV а–б) на радикалы (III а–б) значительно ниже такового для димера 2,4,5-трифенилимидазолила (V). При чем значения $\Delta S^\ddagger$ свидетельствуют об определяющем влиянии на скорость диссоциации димеров (IV а–б) стерического фактора: для димера (IV а) он более значим, чем для димера (IV б).

Экспериментальная часть

Анализ продуктов проводился методом ТСХ на пластинках Silufol UV-254 (элюенты – петролейный эфир, ацетон, дихлорметан), проявился в парах иода и при УФ-облучении. ИК-спектры (таблетки KBr) регистрировались с помощью Фурье-спектрометра «Инфра-Люм ФТ-02». Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C – прибор Jeol «ECX 400(A) T» в DMSO-*d*₆; в качестве реперной точки использовался остаточный сигнал протона в дейтерированном растворе. Электронные спектры видимой области (бензол) регистрировались на приборах «Simadzu UV 2600 VIS» и

«СФ-16», ЭПР спектры – с помощью ЭПР спектрометра «ESR 70-03 XD/2».

Синтез 2-(*n*-пропаргилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолила (IVа) и его димера был осуществлен по литературным методикам [2].

n-Аллилоксибензальбегид (II а). В круглодонную колбу емкостью 50 мл, снабженную обратным холодильником с хлоркальциевой трубкой, поместили 15 мл ацетона, 0,0213 моль (2 г) *n*-гидроксibenзальдегида, 0,0213 моль (1,845 см³) бромистого аллила и 0,0213 моль (2,936 г) карбоната калия. Реакционную смесь нагревали в течение 8 ч. По истечении времени реакционную смесь охладил до комнатной температуры и вылили в 80 мл воды. Продукт экстрагировали эфиром. Эфирный экстракт промыли раствором едкого натра и сушили над безводным карбонатом натрия. Эфир отогнали при атмосферном давлении, а остаток перегнали в вакууме, собирая фракцию в интервале 115–116 °C/18 мм. рт. ст. (лит 115 °C/18 мм. рт. ст). Получили 2,6 г (75 %) *n*-аллилоксибензальбегид. Продукт представляет собой маслянистую жидкость с серовато-зеленоватым оттенком, кристаллизующуюся при комнатной температуре в низкоплавкие кристаллы.

ИК спектр (см⁻¹): 829 (ср), 1 022 (ср), 1 111 (ср) 1 172 (ср), 1 215 (с), 1 250 (ср), 1 381 (ср), 1 454 (ср), 1 508 (оч. с), 1 554 (ср), 1 578 (с), 1 604 (с), 1 678 (с), 1 685 (с), 2 835 (ср), 3 071 (ср), 3 210 (ср).

2-(4-Аллилоксифенил)-4,5-дифенилимидазол (I а). В круглодонную колбу емкостью 100 мл, снабженную обратным холодильником, поместили 0,0031 моль (0,5 г) *n*-аллилоксибензальбегид (II а), 0,0031 моль (0,65 г) бензила, 0,061 моль (4,67 г) безводного ацетата аммония и 30 мл ледяной уксусной кислоты. Реакционную смесь кипятили в течение 1,5 ч, затем охладил до комнатной температуры и вылили в 50 мл водного раствора аммиака. Выпавший осадок отфильтровали на воронке Бюхнера, промыли на фильтре водой (30 мл х 3) и сушили на воздухе. Очищали перекристаллизацией из этанола.

Получили 0,725 г (66 %) бесцветных со слегка желтоватым оттенком игольчатых кристаллов (Ia); $t_{пл.}$ – 112–113 °С.

ИК спектр (cm^{-1}): 521 (ср), 675 (ср), 698 (оч. с), 733 (с), 773 (ср), 833 (ср), 1 026 (с), 1 073 (ср) 1 130 (ср), 1 180 (с), 1 227 (с), 1 451 (с), 1 493 (оч. с), 1 504 (с), 1 582 (ср), 1 613 (с), 2 863 (ср), 2 924 (ср), 2 963 (ср), 3 295 (ср), 3 445 (ср), 3 476 (ср).

Спектр ЯМР ^{13}C δ , м, д: 68,80, 115,35, 118,03, 123,85, 126,92, 127,26, 127,61, 128,11, 128,67, 128,89, 129,13, 131,80, 134,16, 135,90, 137,35, 146,15, 158,90,

Спектр ЯМР 1H (м, д): 4,58 д (2H, 3 Гц), 5,23 д (J3 10 Гц, 1H), 5,26 д (J3 17 Гц, 1H), 6,00–6,07 м (1H), 7,04 д (2H, 9 Гц), 7,01–7,54 м (10H), 7,98 д (2H, 9 Гц), 8,00 д (2H, 10 Гц), 9,33 с (1H).

Димер 2-(*n*-аллилоксибензил)-4,5-дифенилимидазол-2-ила (IV а), В плоскодонную колбу емкостью 100 мл, снабженную магнитной мешалкой, помещали 0,96 ммоль (0,315 г) гексацианоферрата (III) калия, 0,46 ммоль (0,162 г) 2-(4-аллилоксибензил)-4,5-дифенилимидазола (I а), 10 мл воды, 3,5 мл бензола, 5,3 ммоль (0,211 г) гидроксида натрия и 0,117 г триэтилбензиламмония хлорида (катализатор межфазного переноса). Реакционную смесь перемешивали при комнатной температуре в течение 4 ч. В результате реак-

ции органический бензольный слой окрасился в желто-зеленый цвет. Выпавший в ходе реакции осадок отфильтровали на воронке Бюхнера и промыли на фильтре водой до нейтральной реакции промывных вод и отрицательной реакции на ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} . Сушили на воздухе, получили 0,21 ммоль (0,15 г, 93 %) бесцветных со слегка желтоватым оттенком кристаллов димера (IV а); $t_{пл.}$ – 221–222 °С.

ИК спектр (cm^{-1}): 482 (сл), 552 (ср), 694 (оч. с), 721 (с), 767 (с), 799 (ср), 837(ср), 1 073 (ср), 1 134 (с), 1 204 (с), 1 273 (ср), 1 447 (с), 1 489 (с), 1 524 (ср), 1 601 (с), 1 647 (оч. с), 1 655 (оч. с), 1 663 (оч. с), 1 671 (оч. с), 3 032 (ср), 3 059 (ср).

Спектр ЯМР ^{13}C δ , м, д: 68,79, 113,86, 115,00, 117,77, 127,12, 127,25, 127,98, 128,43, 129,42, 131,51, 132,00, 133,29, 158,52, 159,20, 166,31.

Спектр ЯМР 1H δ , м, д: 4,39 – 4,69 м (4H), 5,24 – 5,43 м (4H), 5,97 – 6,03 м (2H), 6,45 д (2H, 15 Гц), 6,90 д (2H, 15 Гц), 7,07 – 7,49 м (10H), 7,77 д (2H, 7 Гц), 7,82 д (2H, 7 Гц).

n-Пропаргилоксибензальбегид (II б), 2-(4-пропаргилоксибензил)-4,5-дифенилимидазол (I б), димер 2-(*n*-аллилоксибензил)-4,5-дифенилимидазол-2-ила (IV б) были получены по литературным методикам [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследования в области химии азотсодержащих гетероциклических свободных радикалов : XXI : Константы диссоциации димеров триарилимидазолилов / Б. С. Танасейчук [и др.] // Журнал органической химии. – 1978. – Т. 14. – № 10. – С. 2029–2035.
2. Пряничникова, М. К. Стабильные радикалы XXV : Триарилимидазолилы с тройными связями в боковой цепи / М. К. Пряничникова, Л. Г. Тихонова, Б. С. Танасейчук // Журнал органической химии. – 1997. – Вып. 9. – С. 1386–1389.
3. Allinson, G. Organic molecular magnets – the search for stable building blocks / G. Allinson, R. J. Bushby, J.-L. Paillaud // Journal Materials Science: Materials in Electronics. – 1994. – Vol. 5. – P. 67–74.
4. Baumgartel, H. 1,1'-Bis-imidazolyl und ihre dissoziation in radikale / H Baumgartel., H. Zimmermann // Z. Naturforsch. – 1963. – Vol. 186. – № 5. – P. 406–412.
5. Baumgartel, H. Uber triarylimidazolyl und triarylimidazol – Farbstoffe / H Baumgartel., H. Zimmermann // Chem. Ber. – 1966. – Vol. 99. – № 3. – P. 843–849.
6. Davidson, D. The action of anion on benzyl / D. Davidson, M. Weiss, Jelling. // J. Org. Chem. – 1977. – Vol. 42. – № 4. – P. 319–324.
7. Magnetism in organic radical ion salts based on imidazolyl and benzimidazolyl nitronyl nitroxide / T. Sugano [et al.] // J. Phys. IV (France). – 2004. – Vol. 114. – P. 651–653.

Поступила 13.01.2014 г.

Об авторах:

Буртасов Алексей Анатольевич, кандидат химических наук, доцент кафедры органической химии химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), burtasovaa@mail.ru

Прыничникова Маргарита Константиновна, ведущий инженер кафедры органической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Безрукова Елена Вячеславовна, студент химического отделения Института физики и химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Тихонова Людмила Григорьевна, кандидат химических наук, инженер НОЦ «Магнитоактивные органические материалы ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), доцент, orgchem@mrsu.ru

Танасейчук Борис Сергеевич, доктор химических наук, профессор кафедры органической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), профессор, orgchem@mrsu.ru

Для цитирования: Константы диссоциации димеров 2-(п-аллилоксифенил)- и 2-(п-пропар-гилоксифенил)-4,5-дифенилимидазолилов / А. А. Буртасов [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014 – № 1. – С. 64–68.

REFERENCES

1. Tanaseichuk B. S., Belozeorov A. I., Tihonova L. G., Shishkin V. N., Butin K. P. Issledovanie v oblasti azotsoderzhashchih geterocyklicheskih svobodnyh radikalov. XXI. Konstanty dissosiatii dimerov triarilimidazolilov [Research in chemistry of nitrogen-containing heterocyclic radicals. XXI. Dissociation constants of the dimers of triarilimidazolyls]. *Zhurnal organicheskoi khimii* – Journal of Organic Chemistry. 1978, vol. 14, no. 10, pp. 2029–2035.
2. Pryanichnikova M. K., Tihonova L. G., Tanaseichuk B. S. Stabil'nye radikaly XXV: Triarilimidazolily s trojnymi svyazjami v bokovoj cepi [Stable radicals XXV. Triarilimidazoliles with triple bonds in a lateral chain]. *Zhurnal organicheskoi khimii* – Russian Journal of Organic Chemistry. 1997, vol. 33, no. 9, pp. 1311–1315.
3. Allinson G., Bushby R. J., Paillaud J.-L. Organic molecular magnets – the search for stable building blocks. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 1994, vol. 5, pp. 67–74.
4. Baumgartel H., Zimmermann H. 1,1'-Bis-imidazolyl und ihre dissoziation in radikale. *Z. Naturforsch.* 1963, vol. 186, no. 5, pp. 406–412.
5. Baumgartel H., Zimmermann H. Uber triarylimidazolyl und triarylimidazol – Farbstoffe. *Chem. Ber.* 1966, vol. 99, no. 3, pp. 843–849.
6. Davidson D., Weiss M. The action of anion on benzyl. *Journal of Organic Chemistry*. 1977, vol. 42, no. 4, pp. 319–324.
7. Sugano T., Blundell S. J., Hayes W., Day P. Magnetism in organic radical ion salts based on imidazolyl and benzimidazolyl nitronyl nitroxide. *Journal de Physique IV*. 2004, vol. 114, pp. 651–653.

About the authors:

Burtasov Alexey Anatolievich, associate professor, chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Chemical sciences, burtasovaa@mail.ru.

Pryanichnikova Margarita Konstantinovna, leading engineer, chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), orgchem@mrsu.ru

Bezrukova Elena Vyacheslavovna, student of Chemical department of Physical and Chemical Institute, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), orgchem@mrsu.ru

Tichonova Ludmila Grigorevna, engineer, SEC «Magnetic Organic Materials», Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Chemical sciences, orgchem@mrsu.ru

Tanaseichuk Boris Sergeevich, professor, chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Doktor Nauk degree holder in Chemical sciences, Professor, orgchem@mrsu.ru

For citation: Burtasov A. A., Pryanichnikova M. K., Bezrukova E. V., Tanaseichuk B. S. Konstanty dissociatsii dimerov 2-(p-allyloxyfenyl)- and 2-(p-propargyloxyfenyl)-4,5-difenyliimidazolilov [The constants of dissociation of dimers 2-(p-allyloxyphenyl)- and 2-(p-propargyloxyphenyl)-4,5-diphenylimidazolyls]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 64–68.

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА 2-(9-АНТРАЦЕНИЛ)-4,5-ДИФЕНИЛИМИДАЗОЛА

**Б. С. Танасейчук, А. И. Азрапкина, Ю. А. Маркелова,
Е. Е. Мурюмин, М. К. Пряничникова**

В статье описывается синтез 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола; на основании ИК спектров и квантово-химических расчетов высказывается предположение о возможной структуре димера 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола.

Ключевые слова: имидазол, 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазол, окисление, радикал, димеризация, димер, структура димера.

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF 2-(9-ANTRACENIL)-4,5-DIPHENILIMIDAZOLE

**B. S. Tanaseichuk, A. I. Azrapkina, Y. A. Markelova,
E. E. Muryumin, M. K. Pryanichnikova**

Was made a synthesis of 2-(9-antraceni)-4,5- diphenilimidazole. With its oxidation in alkaline medium is formed the short-lived radical forming a dimer. On the basis of INFRARED spectra and quantum-chemical calculations, it was suggested that the dimerization of radical is meso-status of antraceni's and was made the possible structure of the dimer 2-(9-antraceni)-4,5- diphenilimidazole.

Keywords: imidazole, 2-(9-antraceni)-4,5-diphenilimidazole, oxidation, radical, dimerization, structure of the dimer.

Радикалы триарилимидазолильного ряда относятся к типу электронодефицитных радикалов [5]. Поэтому введение заместителя, обладающего электронодонорным характером, или замена фенильного кольца остатком полицикла должны увеличивать относительную стабильность этих радикалов [4].

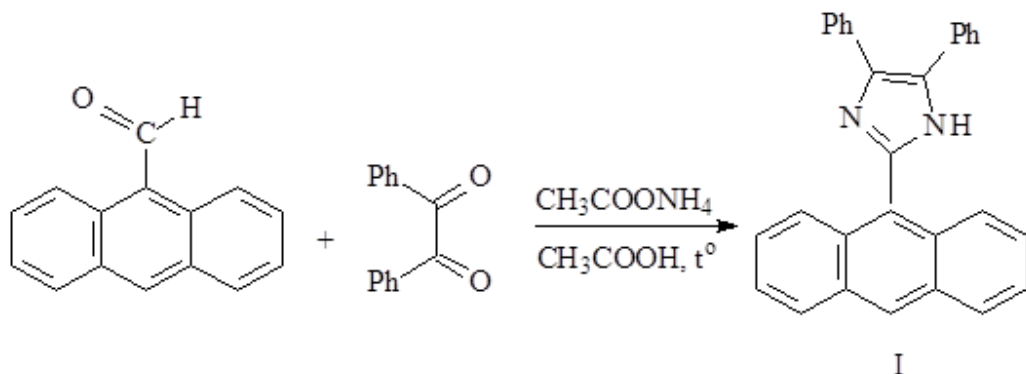
В этой связи нам представляется интересной замена фенильного кольца в положении C_2 имидазольного кольца на остаток антрацена, поскольку в этом случае возникают два взаимоисключающих фактора, определяющих относительную стабильность радикалов. С одной стороны, остаток антрацена можно рассматривать как электронодонорный заме-

ститель, способствующий делокализации электронов по антраценовому кольцу, а с другой, боковые фенильные кольца антрацена могут мешать образованию плоской системы, тем самым дестабилизируя радикал.

Для решения вопроса, что именно является определяющим в стабилизации радикала, – увеличение степени делокализации электронов или стерические факторы, препятствующие этой делокализации, – и был осуществлен синтез 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (I).

Имидазол (I) был получен путем конденсации бензила, 9-формилантрацена (II), ацетата аммония и уксусной кислоты по способу Дэвидсона [8].

Схема 1

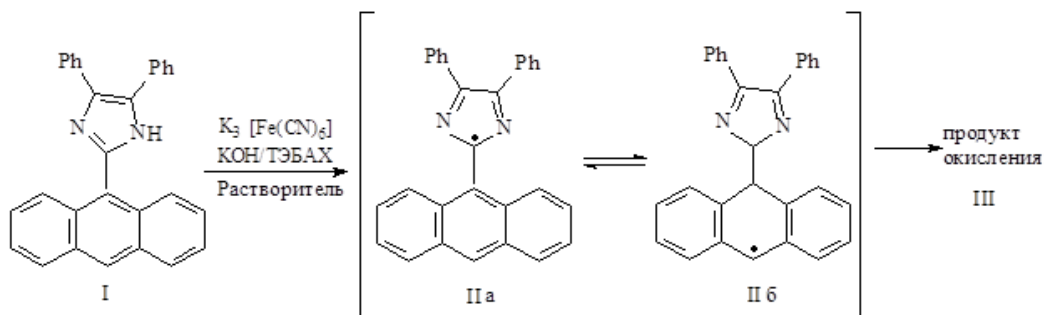


Полученный имидазол (I) представляет собой светло-желтый кристаллический продукт, хорошо растворимый в уксусной кислоте при низких температурах, а в ацетонитриле, спирте, толуоле и ДМСО – при нагревании. Структура имидазола (I) была подтверждена ИК-, ПМР, ^1H - и ^{13}C спектрами.

При окислении (I) гексацианоферратом (III) калия в щелочном водно-спир-

товом растворе был получен продукт неизвестного строения (III), который по ИК спектру и физическим характеристикам (температура плавления и растворимость в органических растворителях) отличается от имидазола (I). Однако продукт (III) не реагировал с N,N-дифенилпикрилгидразином (ДФПГ·Н) в отличие от обычных димеров триарилмидазольных радикалов [2].

Схема 2



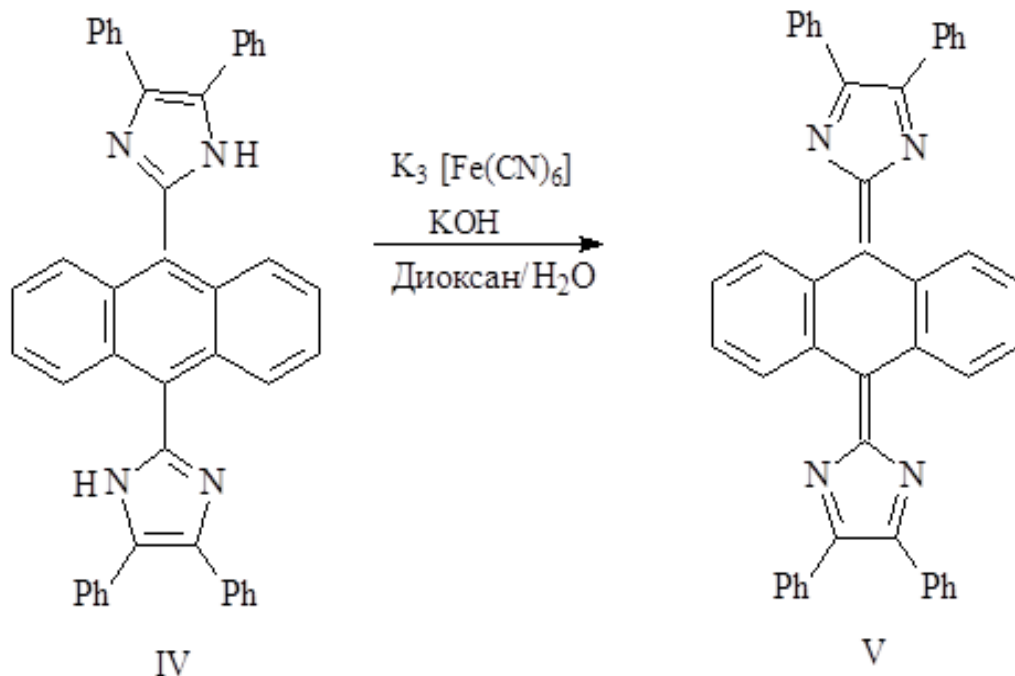
При взаимодействии имидазола (I) с аналогичным окислителем в других растворителях (ацетонитрил, диоксан), где исходный имидазол растворялся лучше, был получен тот же продукт (III), но с гораздо большими выходами, чем при окислении в водно-спиртовом растворе.

В ИК спектре (III) были обнаружены: полоса в области 3441 см^{-1} , характерная для валентных колебаний NH-

группы, которая должна отсутствовать в продукте димеризации радикала (II), группа полос в области $1327\text{--}1265\text{ см}^{-1}$, характерная для валентных колебаний углеродного скелета, и сильная полоса в области 894 см^{-1} .

Сравнивая ИК спектры продукта (III) с ИК спектром ранее синтезированного хинона 2,2'-(антрацен-9,10-диилден) бис(4,5-дифенил-2H-имидазола) (V) [3], мы обнаружили их большое сходство.

Схема 3



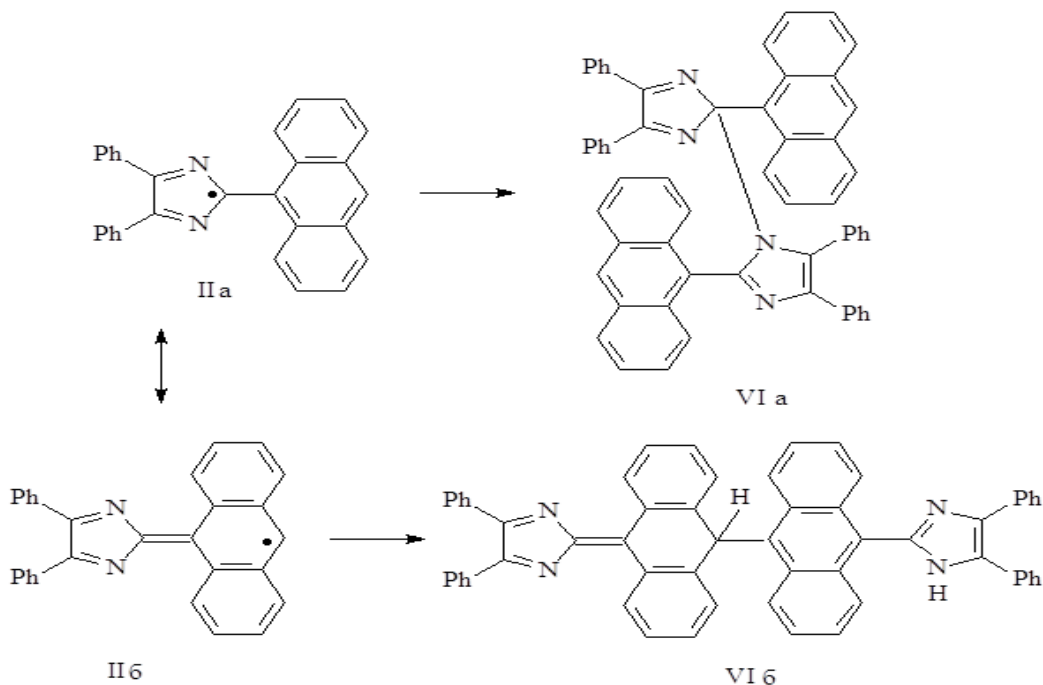
Так, в ИК спектре хинона (V) присутствуют сильные полосы поглощения в области $1\ 327\text{--}1\ 265\text{ см}^{-1}$ и очень сильная полоса в области 895 см^{-1} , которые отсутствуют в исходном имидazole (IV). Аналогичная картина наблюдается и в ИК спектре (III). Интересно, что полосы в области $1\ 326\text{--}1\ 265\text{ см}^{-1}$ наблюдались и в случае 2-аминоантрахинона [1]. Скорее всего, эти полосы принадлежат антрахиноновой структуре.

В масс-спектре продукта (III) присутствует пик с $m/z\ 395$, который может быть отнесен только к радикалу (II), образование которого возможно только в том случае, если продукт (III) является димером радикала (II). Отсутствие пика молекулярного иона (III) возможно из-за его низкой устойчивости в условиях съемки масс-спектра. К сожалению, получить ЯМР спектр не представилось возможным из-за очень плохой растворимости (III).

Предлагая на основе данных ИК и масс-спектра возможную структуру димера (III), мы исходили из следующих предпосылок [6; 10].

Классическим вариантом димеризации триарилимидазолилов является образование связи C–N между атомом C_2 одного имидазольного цикла с атомом азота другого имидазольного цикла [10], так называемой донорно-акцепторной димеризации, характерной для относительно стабильных радикалов [6] (структура VI а). Для короткоживущих же радикалов характерна димеризация по атомам с наибольшей плотностью неспаренного электрона. В нашем случае из-за стерических препятствий, создаваемых большим объемом антраценового цикла, димеризация радикалов может проходить не обязательно по атомам, несущим наибольшую спиновую плотность, а аналогично димеризации трифенилметильных радикалов.

Схема 4



Так как наименее стерически затрудненной оказывается димеризация радикала (II б) по положению C_{10} антраценового цикла, то в этом случае в димере (VI б) два антраценовых кольца не мешают друг другу, поскольку являются взаимно ортогональными. При этом половина димера сохраняет ароматичность имидазольного цикла, а вторая, имея хиноидную структуру имидазольного цикла, имеет два бензольных кольца в антраценовом фрагменте.

Предлагаемая нами структура димера (VI б) объясняет наличие в ИК спектре полосы поглощения в области 3441 см^{-1} , характерной для NH-группы, и полос в области $1326\text{--}1265\text{ см}^{-1}$, характерных для антрахинона.

С целью подтверждения возможности образования димера, имеющего структуру (VI б) были выполнены квантово-химические расчеты неэмпирическим методом Хартри-Фока в базисе 6-31 G из пакета прикладных программ [9] для полных энергий структур радикалов (II а-б) и ди-

меров (VI а-б). Расчеты показали, что хотя разность в полных энергиях (II а-б) составляет $418,25\text{ ккал/моль}$, радикал (II а) является более устойчивым, чем радикал (II б), а образование димера (VI б) – более предпочтительным, чем (VI а). Выигрыш в энергии, который представляет собой разность полных энергий продуктов и исходных веществ, т. е. димеров (VI а-б) и радикалов (II а-б) соответственно, в первом случае составляет $-763,71\text{ ккал/моль}$, а во втором – $97,08\text{ ккал/моль}$. Меньшая стабильность димера (VI а) связана, скорее всего, с возможными стерическими затруднениями, которые могут возникнуть при его образовании.

Таким образом, на основании проведенных исследований констатируем, что в данном случае определяющим фактором дестабилизации радикала являются стерические препятствия, создаваемые взаимным отталкиванием антраценового и имидазольного циклов, и димеризация радикала идет с образованием димера (VI б).

Экспериментальная часть

Качественный анализ синтезированных веществ был проведен методом тонкослойной хроматографии на пластинках Silufol UV-245. ИК спектры веществ регистрировали с помощью Фурье – спектрометра «Инфра-Люм ФТ –02» в таблетках KBr. Электронные спектры видимой области регистрировали на спектрофотометре «СФ-16». ЯМР ^{13}C - и ^1H -спектры были получены на приборе Bruker «AMX-400» (100 МГц) в растворе $\text{DMSO}-d_6$, масс-спектр – на приборе «KONIK MS Q12» (ионизация электроударом Уиониз. 70 эВ). Квантово-химический расчет выполнен эмпирическим методом Хартри-Фока в базисе 6–31 G из пакета прикладных программ GAMESS.

9-Формилантрацен был получен методом [7].

2-(9-Антраценил)-4,5-дифенилимидазол (I). Смесь 1 г (0,0048 моль) 9-формилантрацена, 1,1 г (0,0052 моль) бензила, 5,6 г (0,0728 моль) ацетата аммония и 15 мл ледяной уксусной кислоты кипятили 2,5 ч. Контроль за ходом реакции вели хроматографией на силуфоле (элюент – метилен хлористый) по исчезновению пятна 9-формилантрацена (R_f 0,33). По окончании реакции реакционную смесь вылили в ~150 мл воды и добавили ~5 см³ 25 % раствора аммиака. Образовавшийся желтый осадок отфильтровали, сушили на воздухе, перекристаллизовывали из толуола. Выход 1,45 г (75,5 %), светло-желтые кристаллы, t пл. 224–225 °С. Спектр ЯМР ^1H (CD_2Cl_2), δ , м. д.: 7,23 (1H, т. д. J ~ 14,65 Гц), 7,33 (3H, т. д. J ~ 14,65 Гц), 7,41 (2H, т. д. J ~ 15,11 Гц), 7,55 (6H, т. д. J ~ 41,22 Гц), 7,68 (2H, т. д. J ~ 8,24 Гц), 7,94 (2H, т. д. J ~ 10,07 Гц), 8,16 (2H, т. д. J ~ 13,28 Гц), 8,75 (1H, с). Спектр ЯМР ^{13}C (CD_3Cl), δ , м. д.: 126,10, 126,59, 127,12, 127,89, 128,52, 128,80, 129,26, 131,38, 131,48, 136,04, 143,84.

Продукт окисления 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (III).

а) Растворителем является водный спирт. Смесь 0,4 г (0,001 моль)

2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (I), 0,34 г (0,006 моль) гидроксида калия и 70 мл этилового спирта перемешивали до полного растворения всех компонентов. Затем по каплям прибавляли 131,6 мл 1%-ного раствора гексацианоферрата (III) калия. По окончании прибавления окислителя смесь перемешивали при комнатной температуре ~30 мин. Выпавший оранжево-коричневый осадок отфильтровали и промыли на фильтре водой до нейтральной реакции промывных вод и отрицательной реакции на ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} . Сушили на воздухе. Очищали последовательной перекристаллизацией из пиридина и водного диоксана. Выход составил 0,04 г (5,1 %), оранжевые кристаллы.

б) Растворитель – диоксан -1,4. К смеси 0,1 г (0,00025 моль) 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (I), 5 мл диоксана и 4 мл 6%-ного раствора гидроксида калия прибавили охлажденный раствор 0,3 г (0,001 моль) гексацианоферрата (III) калия в 7 мл воды. Раствор изменил окраску с желтой на оранжевую. Реакционную смесь перемешивали ~2 ч при комнатной температуре. Контроль за ходом реакции вели хроматографией на силуфоле (элюент – метилен хлористый:ацетонитрил 1:1) по исчезновению пятна 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (I) (R_f 0,61). По окончании реакции выпавший осадок отфильтровали, промыли на фильтре водой до нейтральной реакции промывных вод и отрицательной реакции на ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} . Сушили на воздухе. Очищали перекристаллизацией из толуола. Выход 0,088 г (44,5 %), оранжевые кристаллы, t пл. >235–237 °С.

в) Растворитель – ацетонитрил. К смеси 0,1 г (0,00025 моль) 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (I), 10 мл ацетонитрила и 4 мл 6%-ного раствора гидроксида калия прибавили охлажденный раствор 0,3 г (0,001 моль) гексацианоферрата (III) калия в 7 мл воды. Раствор изменил окраску с желтой на оранжевую. Реакционную смесь перемешивали ~2 ч при охлаждении ледяной водой. Контроль за ходом реакции вели хроматогра-

фией на силуфоле (элюент – метилен хлористый:ацетонитрил 1:1) по исчезновению пятна 2-(9-антраценил)-4,5-дифенилимидазола (I) (Rf 0,61). По окончании реакции выпавший осадок отфильтровали, промыли на фильтре

водой до нейтральной реакции промывных вод и отрицательной реакции на ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} . Сушили на воздухе. Очищали перекристаллизацией из толуола. Выход 0,0712 г (36 %), оранжевые кристаллы, t пл. >235–237 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Наканиси, К.** Инфракрасные спектры и строение органических соединений / К. Наканиси. – Москва : Мир, 1965. – 216 с.
2. Исследования в области азотсодержащих гетероциклических свободных радикалов : Использование ДФПГ для изучения скорости диссоциации димеров трифенилимидазолильных радикалов // Б. С. Танасейчук [и др.] // Журнал органической химии. – 1969. – Т. 5. – № 11. – С. 2054–2055.
3. Редокс-индуцированная обратимая трансформация системы хинон – дианион на основе 2,2'-антрацент-9,10-диилденбис(4,5-дифенил-2Н-имидазола) // Б. С. Танасейчук [и др.] // Журнал органической химии. – 2013. – Т. 4. – № 5. – С. 756–759.
4. **Танасейчук, Б. С.** Исследования в области азотсодержащих гетероциклических свободных радикалов : Синтез и скорость диссоциации бис- α -нафтилдарилимидазолилов // Б. С. Танасейчук, А. А. Бардина, И. М. Некаева // Химия гетероциклических соединений. – 1972. – № 12. – С. 1688–1689.
5. **Танасейчук, Б. С.** О влиянии заместителей на относительную стабильность свободных радикалов // Б. С. Танасейчук, О. Б. Томилин, К. П. Бутин // Журнал органической химии. – 1982. – Т. 18. – № 2. – С. 241–246.
6. **Танасейчук, Б. С.** К вопросу об общих закономерностях образования димеров свободных радикалов // Б. С. Танасейчук // Журнал органической химии. – 2004 – Т. 40. – № 4. – С. 629–632.
7. **Campaigne, E.** The use of dimethylformamide as a formylation reagent / E. Campaigne, L. Wesley Archer // Journal American Chemical Society. – 1953. – Vol. 75. – № 4. – P. 991.
8. **Davidson, D.** The action of ammonia on benzyl / D. Davidson, M. Weiss, M. Jelling // Journal of Organic Chemistry. – 1937. – Vol. 2. – P. 319–327.
9. General atomic and molecular electronic structure system / M.W. Schmidt [et al.] // J. Comput. Chem. – 1993. – Vol. 14. – P. 1347–1363.
10. **White, D. M.** Oxidation of triarylimidazoles. Structures of the photochromic and piezochromic dimers of triarylimidazolyl radicals / D. M. White, J. Sonnenberg // Journal American Chemical Society. – 1966. – Vol. 88. – № 16. – P. 3825–3829.

Поступила 11.01.2014 г.

Об авторах:

Танасейчук Борис Сергеевич, доктор химических наук, профессор кафедры органической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), профессор, orgchem@mrsu.ru

Азрапкина Ангелина Ивановна, студент химического отделения Института физики и химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), angelina13rus@rambler.ru

Маркелова Юлия Анатольевна, студент химического отделения Института физики и химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

Мурюмин Евгений Евгеньевич, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), доцент, mur_ee@mail.ru

Пряничникова Маргарита Константиновна, ведущий инженер кафедры органической химии ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), orgchem@mrsu.ru

REFERENCES

1. Nakanisi K. *Infrakrasnye spektry i stroenye organicheskikh soedineniy* [Infrared spectra and structure of organic compounds]. Moscow, Mir Publ., 1965, 216 p.
2. Tanaseichuk B. S., Stanovkina K. V., Sunin A. N., Rezepova L. G. Issledovaniya v oblasti azotsoderzhashykh geterociklicheskykh svobodnykh radikalov. XVII. Ispolzovanie DFGP dlya izucheniya skorosti dissotsiatsii dimerov trifenilimidazolilnykh radikalov [Researches of nitrogen-bearing heterocyclic free radicals. Use DFGP to study the rate of dissociation of dimers of trifenyylimidazolyl radicals]. *Zhurnal organicheskoi khimii* – Journal of Organic Chemistry. 1969, vol. 5, no. 11, pp. 2054 – 2055.
3. Tanaseichuk B. S., Samsonkin A. A., Pryanichnikova M. K., Dolganov A. V. Redoks-inducirovannaya obratimaya transformatsiya sistemy hinon – dianion na osnove 2,2'-antracene-9,10-diilidenbis(4,5-difenil-2N-imidazola) [Redox-induced reversible transformation of a system quinone–dianion based on 2,2'-(anthracene-9,10-diylidene)bis(4,5-diphenyl-2H-imidazole)]. *Zhurnal organicheskoi khimii* – Russian Journal of Organic Chemistry. 2013, vol. 49, no. 5, pp. 739 – 742.
4. Tanaseichuk B. S., Bardina A. A., Nekaeva I. M. Issledovaniya v oblasti azotsoderzhashykh geterociklicheskykh svobodnykh radikalov. XVIII. Sintez i skorost dissotsiatsii bis- α -naftildiarilimidazolilov [Research on nitrogen-containing heterocyclic free radicals. XVIII. Synthesis and properties of bis- α -naphtyldiarylimidazoles dissociation]. *Zhimiya geterociklicheskiykh soedineniy* – Chemistry of Heterocyclic Compounds. 1972, no. 12, pp. 1688 – 1689.
5. Tanaseichuk B. S., Tomilin O. B., Butin K. P. O vliyani zamestiteley na otnositelnuyu stabilnost svobodnykh radikalov [The impact on the relative stability of free radicals]. *Zhurnal organicheskoi khimii* – Journal of Organic Chemistry. 1982, no. 2, pp. 241 – 246.
6. Tanaseichuk B. S. K voprosu ob obshchikh zakonomernostiyah obrazovaniya dimerov svobodnykh radikalov [The general regularities of formation of dimers of free radicals] *Zhurnal organicheskoi khimii* – Journal of Organic Chemistry. 2004, vol. 40, no. 4, pp. 629 – 632.
7. Campaigne E., Wesley Archer L. The use of dimethylformamide as a formylation reagent. *Journal of American Chemical Society*. 1953, vol. 75, no. 4, pp. 991 – ?.
8. Davidson D., Weiss M., Jelling M. The action of ammonia on benzyl. *Journal of Organic Chemistry*. 1937, vol. 2, pp. 319 – 327.
9. M.W. Schmidt General atomic and molecular electronic structure system. *Comput. Chem*. 1993, vol. 14, pp. 1347 – 1363.
10. White D. M., Sonnenberg J. Oxidation of triarylimidazoles. Structures of the photochromic and photochromic dimers of triarylimidazolyl radicals. *Journal of American Chemical Society*. 1966, vol. 88, no. 16, pp. 3825 – 3829.

About the authors:

Tanaseichuk Boris Sergeevich, professor, chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Doctor Nauk degree holder in Chemical sciences, Professor, orgchem@mrsu.ru

Azrapkina Angelina Ivanovna, student of Chemical Department of Physical and Chemical Institute, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), angelinal3rus@rambler.ru

Markelova Yulia Anatolievna, student of Chemical Department of Physical and Chemical Institute, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), orgchem@mrsu.ru

Muryumin Evgeny Evgenievich, associate professor, chair of Physical Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Chemical sciences, mur_ee@mail.ru

Pryanichnikova Margarita Konstantinovna, leading engineer, chair of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), orgchem@mrsu.ru

For citation: Tanaseichuk B. S., Azrapkina A. I., Markelova Y. A., Pryanichnikova M. K. Sintez i svoystva 2-(9-antraceni)-4,5-difenilimidazola [Synthesis and property 2-(9-antraceni)-4,5-diphenylimidazole]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Bulletin of Mordovian University. 2014, no. 1, pp. 69 – 75.

УДК 621.31:330.131

АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

И. И. Байнева, В. В. Байнев

В статье рассмотрены типы современных источников света, их роль в энергосберегающих технологиях, аспекты энергоэффективности и энергосбережения в мире и в России.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, источник света, освещение, лампа люминесцентная, лампа накаливания.

DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT LIGHT DEVICES FOR ENERGY CONSERVATION IMPROVEMENTS

I. I. Bayneva, V. V. Baynev

We have described the aspects of energetic efficiency and conservation in Russia, the features of modern illuminants and their role in energy conservation.

Keywords: energy efficiency, energy conservation, lighting, light sources, incandescent lamp, fluorescent lamp.

Энергосбережение и энергоэффективность – наиболее важные и актуальные проблемы энергетики в настоящее время. Одними из главных приоритетов развития нашей страны являются снижение потребления энергоресурсов, а также повышение энергоэффективности всех отраслей промышленности и сельского хозяйства. Именно поэтому президент РФ в качестве основных направлений модернизации и развития технологий и экономики России определил в качестве первоочередных задачи энергоэффективности и энергосбережения. Для их решения необходимо оснастить все объекты народного хозяйства приборами учета потребляемых энергоресурсов, последо-

вательно перейти к энергосберегающим источникам света (ИС) и световым приборам (СП) на их основе.

Световые технологии дают возможность экономить до 40 % потребляемой электроэнергии, что в мировых масштабах составит порядка 100 млрд. евро в год. В экологическом отношении это способствует уменьшению выбросов вредных газов в атмосферу на сотни млн. тонн в год, сбережению электроэнергии свыше 2,1 ТВт и экономии до 1,6 млрд. баррелей нефти [1]. Согласно оценкам экспертов, в России применение энергосберегающих осветительных технологий, мероприятий и программ сэкономит более 250 млрд. рублей в год,

© Байнева И. И., Байнев В. В., 2014

а выбросы углекислого газа уменьшатся на 20 млн. тонн.

Продукция отечественного производства составляет примерно половину всех светотехнических изделий, таких как ИС, источники питания, светильники и комплектующие. Однако до сих пор значительную часть этой продукции составляют устаревшие изделия, например, лампы накаливания общего назначения, люминесцентные лампы первых двух поколений, электромагнитные ПРА (запрещенные во многих странах) и т. д. [3].

Экономия электроэнергии в осветительных установках (ОУ) имеет большое значение, поскольку в России для освещения требуется около 14 % всей получаемой электрической энергии. Доля потребляемой электроэнергии ОУ в различных отраслях производства колеблется от 10 до 70 %.

Одной из главных проблем является энергоэффективное освещение с обяза-

тельным соблюдением норм освещенности и проектирования освещения. Наиболее распространенными в России продолжают оставаться лампы накаливания общего освещения, на работу которых тратится до 13 % всей электроэнергии. Для уменьшения расхода электроэнергии необходимо повышать световую отдачу и срок службы современных энергоэкономичных ИС, а также уменьшать спад светового потока и их стоимость.

В последнее время на смену ламп накаливания (ЛН) и разрядных ламп (РЛ) приходят светодиоды. Однако эффективность этих источников света существенно отличается. Поэтому решение задач по повышению эффективности СП нужно начинать с обоснованного выбора ИС. Табл. 1 иллюстрирует ситуацию по традиционным средствам освещения (без светодиодов) в 2000 г. и прогноз на 2015 г. в России.

Т а б л и ц а 1

Источники света в России

Тип ИС	Использование в 2000 г., %	Прогноз на 2015 г., %
Лампы накаливания	64,00	40,0
Галогенные лампы накаливания	0,47	1,5
Люминесцентные лампы	26,00	34,0
Компактные люминесцентные лампы	0,05	12,0
Дуговые ртутные лампы	9,00	7,0
Металлогалогенные лампы	0,08	1,5
Натриевые лампы высокого давления	0,40	4,0

Принудительное уменьшение оборота ЛН позволит уменьшить энергозатраты, а с 1 января 2014 г., согласно Федеральному закону, планируется полный запрет на их использование. При этом предполагается, что они будут заменяться только на энергосберегающие лампы, поэтому основными задачами становятся увеличение конкурентоспособности российских производителей световых изделий и их выход на мировой рынок, а также повышение качества систем утилизации ртутных ламп.

Энергосбережение может быть реализовано также за счет оптимизации светотехнической части ОУ и осветительных сетей, систем управления и регулирования освещения, рациональной организации эксплуатации освещения [4]. Для оптимизации светотехнической части ОУ и осветительных сетей необходимо правильно выбрать систему освещения и источники света, схему расположения светильников и их тип, соответствующий особенностям светораспределения и конструкции.

Основной тип ламп, используемый в различных учреждениях, – это люминесцентные лампы (ЛЛ). Лампы высокого давления применяются в меньшей степени, в основном для освещения промышленных предприятий, спортивных залов и прилегающей территории.

Современные люминесцентные лампы являются энергоэкономичными источниками света. К их преимуществам относятся:

1) потребление электроэнергии приблизительно на 80 % меньше, чем у ламп накаливания аналогичной яркости;

2) по сравнению с лампами накаливания, срок службы увеличился более чем в 10 раз и составляет примерно 10 000 ч;

3) выделение гораздо меньшего количества тепла;

4) различная цветовая температура;

5) распределение света является более равномерным, чем у ламп накаливания, что уменьшает утомляемость глаз;

6) использование электронной пускорегулирующей аппаратуры позволяет лампе загораться и работать без мерцания;

7) широкий диапазон допустимых температур эксплуатации позволяет использовать их как для внутреннего, так и для наружного освещения;

8) компактные размеры энергоэкономичных ламп дают возможность использовать их практически в любых светильниках.

В 2000 г. была создана серия новых энергоэффективных тонких ЛЛ типа Т5, имеющих трубку диаметром 16 мм. Она отличается высокой световой отдачей, незначительным спадом (не более 5 %) светового потока в течение всего срока службы, возможностью настройки яркости и потребляемой мощности, отсутствием пульсаций. Во многих наиболее развитых странах световые приборы разрабатываются только для ламп типа Т5.

Такие лампы характеризуются очень высокой световой отдачей (90–116 лм/Вт) и большой стабильностью светового потока. Средняя продолжительность горения составляет 16 тыс. ч. Одним из главных достоинств ламп Т5 является меньшее содержание ртути, чем в лампах Т12 и Т8. Эти ИС обладают высоким качеством цветопередачи (индекс цветопередачи $R_a > 80$), могут иметь различную цветность излучения: от тепло-белого с $T_{\text{цв}} = 2\,700\text{ К}$ до холодного с $T_{\text{цв}} = 6\,500\text{ К}$.

Благодаря тому, что в лампах Т5 люминофор покрыт прозрачной защитной пленкой, на него не попадают частицы ртути, вольфрам, что исключает «отравление» люминофора и, как следствие, поддерживает стабильный световой поток. Кроме этого, уменьшение длины ламп Т5 приблизительно на 50 мм облегчает конструирование светильников.

В настоящее время выпускаются три типа таких ламп: нормальные (табл. 2), с повышенной интенсивностью (табл. 3), с повышенной световой отдачей (табл. 4) [2, с. 3].

Т а б л и ц а 2

Световые параметры нормальных ламп Т5

Мощность, Вт	Цветовая температура, К	Длина лампы, мм	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт
14	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	549	1 350	96
14	6 500	549	1 300	93
21	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	849	2 100	100
21	6 500	849	2 000	95
28	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 149	2 900	103
28	6 500	1 149	2 750	98
35	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 449	3 650	104
35	6 500	1 449	3 650	104

Т а б л и ц а 3

Световые параметры ламп Т5 с повышенной интенсивностью

Мощность, Вт	Цветовая температура, К	Длина лампы, мм	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт
24	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	549	2 000	83
24	6 500	549	1 900	79
39	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	849	3 500	89
39	6 500	849	3 525	85
49	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 449	4 900	100
49	6 500	1 449	4 600	93
54	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 149	5 000	92
54	6 500	1 149	4 750	87
80	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 149	7 000	87
80	6 500	1 149	6 650	83

Т а б л и ц а 4

Световые параметры ламп Т5 с повышенной световой отдачей

Мощность, Вт	Цветовая температура, К	Длина лампы, мм	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт
25	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 149	2 900	116
25	6 500	1 149	2 750	110
32	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 449	3 650	114
32	6 500	1 449	3 500	109
45	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 449	4 900	108
45	6 500	1 449	4 700	104
50	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 149	5 000	100
50	6 500	1 149	4 750	95
73	2 700, 3 000, 3 500, 4 000	1 149	7 000	95
73	6 500	1 149	6 650	91

Для «тонких» ламп Т5 стали разрабатываться особые светильники с оптимизированными оптическими системами. Они являются плоскими, а также сильно отличаются по светотехническим, эстетическим и конструкционным параметрам от светильников предыдущего поколения с лампами типа Т8; системы автоматического регулирования повышают эффективность их совместного использования.

Применение ламп Т5 с электронным ПРА является важным и перспективным направлением светотехники. Однако, в России на данный момент массовое производство таких ИС освоено не в полной мере.

Таким образом, одной из важнейших задач светотехнической промышленности в России мы считаем развитие производства таких ламп и светильников для них, которые должны иметь небольшие габариты и стоимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Задачи энергосбережения и повышения энергоэффективности [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru>.
2. **Рыбалов, С. Л.** Новое поколение энергоэффективных тонких люминесцентных ламп типа T5 / С. Л. Рыбалов. – Москва : Знак, 2011. – 16 с.
3. **Байнева, И. И.** От ламп накаливания к энергоэкономичным источникам света: аспекты перехода / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Фотоника. – 2011. – Т. 30. – № 6. – С. 30–33.
4. **Байнева, И. И.** Задачи и проблемы повышения энергоэффективности и энергосбережения в России. Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции / И. И. Байнева. – 2013. – Т. 7. – № 2. – С. 52–55.

Поступила 11.01.2014 г.

Об авторах:

Байнева Ирина Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры светотехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), baynevaai@rambler.ru

Байнев Виталий Валерьевич, студент факультета электронной техники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), bw14@mail.ru

Для цитирования: Байнева, И. И. Аспекты разработки энергоэффективных светотехнических изделий для решения задач повышения энергосбережения / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 76–80.

REFERENCES

1. Zadachi jenergosberezhenija i povyshenija jenergojeffektivnosti [Problem of energy conservation and energy efficiency]. Available at: http://minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/problem/index.php?sphrase_id=519800
2. Rybalov S. L. Novoe pokolenie jenergojeffektivnyh tonkih ljuminescentnyh lamp tipa T5 [A new generation of energy-efficient thin fluorescent lamps T5]. Moscow, Znak Publ., 2011, 16 p.
3. Bayneva I. I., Baynev V. V. Ot lamp nakalivanija k jenergojekonomichnym istochnikam sveta: aspekty perehoda [From incandescent lamps to energy efficient light sources: transition aspects]. Fotonika Publ., 2011.
4. Bayneva I. I. Tasks and problems of energy efficiency and conservation in Russia [Zadachi i problemy povyshenija jenergojeffektivnosti i jenergosberezhenija v Rossii]. *Sbornik nauchnyh trudov Sworld po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* – Collection of Sworld conference proceedings. 2013, vol. 7, no. 2.

About the authors:

Bayneva Irina Ivanovna, associate professor (docent) of Light Engineering chair of Department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, baynevaai@rambler.ru

Baynev Vitaliy Valer'evich, student of Department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), bw14@mail.ru

For citation: Bajneva I. I., Bajnev V. V. Aspekty razrabotki jenergojeffektivnyh svetotekhnicheskikh izdelij dlja reshenija zadach povyshenija jenergosberezhenija [Development of the energy efficient light devices for energy conservation improvements]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 76 – 80.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА РТУТИ В ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ ДИАМЕТРОМ 16 ММ

А. А. Горбунов

В статье рассматривается возможность определения количества ртути в линейных люминесцентных лампах в трубках диаметром 16 мм, а также особенности изготовления опытных образцов люминесцентных ламп малого диаметра с применением амальгамного метода; показывается возможность высокой точности дозирования ртути в объем лампы и улучшения экологических условий труда в процессе их производства без применения ртути в жидком состоянии.

Ключевые слова: люминесцентные лампы, количество ртути, контактный охладитель, постоянный ток, катафорез, амальгама, дозирочные головки, откачной полуавтомат, кран-дозатор, экологичность.

DEVELOPMENT OF A METHOD OF MEASURING OF THE AMOUNT OF MERCURY IN 16 MM TUBE FLUORESCENT LAMPS

A. A. Gorbunov

In the article we have considered the capacity of mercury amount measurement in linear 16 mm tube fluorescent lamps. The peculiarities of production of the prototypes capacity of small diameter fluorescent lamps using amalgamation process are described. The possibility of mercury dispensing with high accuracy in the tube is shown, improvement of the ecology of working conditions during the lamp manufacturing without using mercury in liquid state is featured.

Keywords: fluorescent lamps, mercury amount, contact cooler, direct current, cataphoresis, amalgam, dosing heads, evacuation semi-automatic unit, metering stopcock, sustainability.

В настоящее время проблема повышения экологичности разрядных источников света (ИС) является весьма актуальной, особенно для люминесцентных ламп (ЛЛ) в трубках малого диаметра и компактных ЛЛ (КЛЛ) ввиду их прогрессирующего использования в освещении офисных и жилых помещений. Главным фактором, определяющим экологическую опасность данных ламп, является наличие в них ртути в жидкой фазе и отсутствие высокопроизводительных методов введения малых количеств ртути в ЛЛ.

Известно, что для обеспечения работоспособности ЛЛ в течение всего

срока службы в нее достаточно ввести около 5 мг ртути. Однако сделать это с помощью дозирочных головок, установленных на откачных полуавтоматах с вертикальным расположением ламп при откачке, невозможно. Даже если удастся поместить такое количество ртути в штенгель лампы, она осядет на его стенке и не попадет в объем лампы. Поэтому для надежного попадания ртути в лампу головки рассчитаны на дозирование 30–60 мг ртути за одно срабатывание.

Необходимость проведения исследований по избранной теме обусловлена потребностью в решении проблемы

© Горбунов А. А., 2014

сокращения ртути в ЛЛ до минимально допустимых количеств, снижения расхода ртути в производстве ЛЛ, ускорения и удешевления испытаний ЛЛ на соответствие количества ртути нормативной документации, а также снижения зарпученности помещений как при производстве ламп, так и в процессе их эксплуатации.

В 2008 г. сотрудниками кафедры источников света светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарёва» был разработан метод контроля количества ртути в линейных ЛЛ. В 2011 г. был получен патент на данный метод, а также устройство для контроля количества ртути [1]. Метод основан на применении двух физических явлений: переносе положительных ионов ртути в область катода при работе ЛЛ в цепи постоянного тока (явление продольного катафореза) и диффузии нейтральных атомов ртути в специально созданную холодную зону в прикатодной части положительного столба разряда из более нагретых участков лампы. Таким образом, перенос ртути осуществляется синхронно ионами и нейтральными атомами в одну сторону (прикатодную), что существенно ускоряет его время.

Процесс переноса еще больше сокращается при увеличении значения тока в 2–2,5 раза по сравнению с номинальным значением тока лампы, при этом работа лампы обеспечивается в режиме двух катодных пятен (ток идет на оба конца электродов). Дополнительное ускорение процесса переноса также осуществляется путем утепления лампы вне холодной зоны.

Перед определением времени переноса ртути происходит предварительный ее сбор в зоне охладителя. Это необходимо потому, что после транспортирования лампы ртуть оказывается неравномерно распределенной по внутренней поверхности лампы. Определение времени переноса осуществляется согласно изменению напряжения и тока на лампе, которое регистрируется

с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) USB-6008 фирмы National Instruments.

На рис. 1 показано устройство определения количества ртути в люминесцентных лампах в трубках диаметром 16 мм.

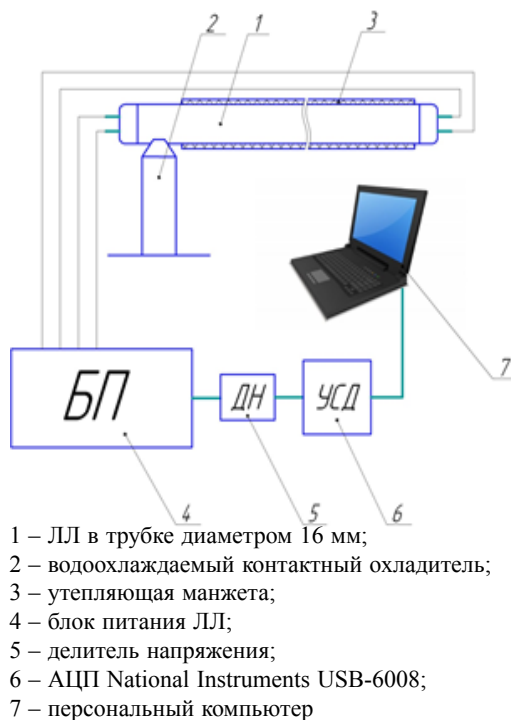


Рис. 1. Схема устройства для измерения количества ртути в ЛЛ в трубках диаметром 16 мм

Устройство состоит из ЛЛ, водоохлаждаемого контактного охладителя (рис. 2), помещенного в прикатодную зону положительного столба ЛЛ, утепляющей манжеты, надетой на ЛЛ вне охладителя, блока питания ЛЛ для создания интенсивного режима работы лампы от цепи постоянного тока с преобразователем переменного тока в постоянный, стабилизатора напряжения переменного тока, устройства сбора данных (УСД) National Instruments USB-6008 (рис. 3) служащего как АЦП, персонального компьютера (ПК) для отображения и обработки временной диаграммы.

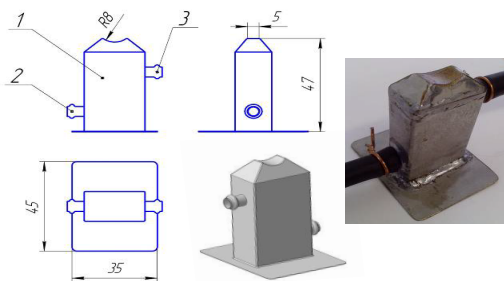


Рис. 2. Водоохлаждаемый контактный охладитель

Работа устройства осуществляется следующим образом. Контактный охладитель 1 (рис. 2) с помощью штуцера для подвода воды 2 (3 – штуцер для слива циркулирующей в охладителе воды) подключается к водопроводу, сверху на охладителе размещается ЛЛ 1 (рис. 1), которая подключается к блоку питания 4. После включения лампы устанавливается требуемый ток и начинается процесс переноса ртути в зону охладителя, который фиксируется с помощью УСД National Instruments USB-6008 и передается на ПК.

После завершения процесса блок питания 4 ЛЛ выключается, охладитель 2 перемещается к противоположному концу ЛЛ 1, меняя местоположением с утепляющей манжетой 3. Далее в схеме питания ЛЛ 1 меняется полярность (переключением на панели блока питания 4 ЛЛ тумблера), включается блок питания 4 ЛЛ и процесс переноса повторяется. С помощью АЦП National Instruments USB-6008 регистрируются зависимости напряжения на лампе от времени выхода лампы в состояние полного катафореза. Полученные измерительные данные сохраняются на ПК и накапливаются в виде массива.

Количество ртути определяется по градуировочному графику [1], который будет получен после проведения описанного выше эксперимента с ЛЛ с известным количеством ртути, изготовленными амальгамным методом на базе ГУП РМ «НИИИС им. А. Н. Лодыгина».

Технология изготовления таких ламп отличается от промышленной и имеет следующие особенности:

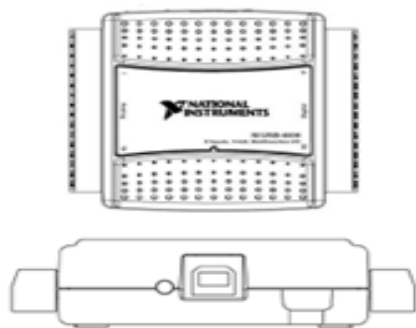


Рис. 3. Устройство сбора данных (УСД) National Instruments USB-6008

- после заварки лампы их откачка проводилась на откачном посту, снабженном краном-дозатором штабика амальгамы (рис. 4) с измеренной заранее массой, при этом в штенгель лампы перед откачкой помещалась трубочка из стекла, препятствующая прохождению штабика амальгамы в объем лампы (амальгама должна быть в штенгеле);

- штабик амальгамы дозировался в штенгель лампы, прошедшей стандартную термовакуумную обработку и охлажденную до комнатной температуры (состав амальгамы – 70 % Pb + 30 % Hg);

- лампа отпаивалась с удлиненным штенгелем и переносилась на установку для перегонки ртути из амальгамы в объем лампы;

- конец лампы с удлиненным штенгелем помещался в печь установки перегонки ртути;

- путем нагрева печи до температуры на 20–30 °C меньшей температуры плавления амальгамы (~250 °C) в течение заданного времени ртуть из амальгамы испарялась в объем лампы;

- удлиненный штенгель с оставшейся (обедненной ртутью) амальгамой отпаивался от лампы;

- отпаянный штенгель вскрывался и амальгама взвешивалась второй раз;

- определялось количество ртути в лампе как разница масс штабиков амальгамы до откачки лампы и после вскрытия штенгеля.

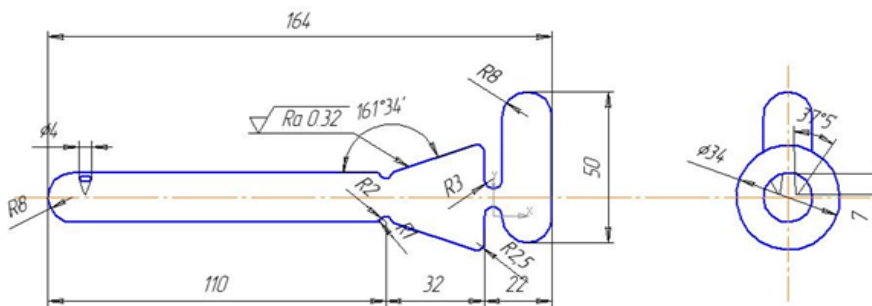


Рис. 4. Кран-дозатор штабика амальгамы

Таким образом удалось получить опытные образцы ЛЛ со следующими количествами ртути: 1,0; 1,5; 2,0; 4,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 12,0 мг.

Разработка и реализация данного способа измерения количества ртути

позволит оперативно и без разрушения лампы определять количество ртути, что приведет к увеличению производства качественной, экологически безопасной и ресурсосберегающей продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 2410791 Российская Федерация. Способ неразрушающего контроля количества ртути в трубчатой люминесцентной лампе и устройство для его осуществления / А. А. Горбунов ; № 2010102332/07 ; заявл. 25.01.2010 ; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3.3.

Поступила 11.01.2014 г.

Об авторе:

Горбунов Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры светотехники светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), alexd@mail.ru

Для цитирования: Горбунов, А. А. Разработка способа измерения количества ртути в люминесцентных лампах диаметром 16 мм / А. А. Горбунов // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 81–84.

REFERENCES

1. Sposob nerazrushajushhego kontrolja količestva rtuti v trubchatoj luminescentnoj lampe i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [The method of nondestructive inspection of mercury amount in a tubular fluorescent lamp and the device for its implementation]. Russian Federation Patent no. 2410791. Application 2010102332/07, 25.01.2010. Cl. МПК H01J 9/42. Publ.: 27.01.2011. Bull. № 3

About the author:

Gorbunov Aleksey Alekseevich, associate professor, department of Light Engineering, Faculty of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, alexd@mail.ru

For citation: Gorbunov A. A. Razrabotka sposoba izmerenija količestva rtuti v luminescentnyh lampah diametrom 16 mm [The development of a method of measuring the amount of mercury in 16 mm tube fluorescent lamps]. Vestnik Mordovskogo Universiteta – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 81 – 84.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВВОДНЫХ УСТРОЙСТВ СВЕЯЩИХСЯ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНОЙ ОПТИКИ

А. А. Горьков

В работе рассматриваются некоторые аспекты математического моделирования вводных устройств светящихся светодиодных панелей; оценивается возможность использования различных целевых функций оптимизации светораспределения вводных устройств.

Ключевые слова: люминесцентные лампы, количество ртути, контактный охладитель, постоянный ток, катафорез, амальгама, дозировочные головки, откачной полуавтомат, кран-дозатор экологичность.

MODELING OF INPUT DEVICES OF LUMINOUS PANELS BASED ON LED OPTICS

A. A. Gor'kov

The paper discusses some aspects of mathematical modeling of input devices of glowing LED panels. We also have estimated the possibility of employment of different objective functions for optimization of light distribution input devices.

Keywords: coefficient, multiple reflections, LED light, diffuse light, luminous flux.

Известно, что при формировании светового пучка светодиодной панели решающую роль играют многократные отражения. Данный аспект необходимо учитывать при разработке модели устройства ввода светового излучения. В качестве исходной модели можно воспользоваться методикой, предложенной Трембачем В. В. [3]. В основу данного метода положен расчет коэффициента многократных отражений.

При расчете диффузных светильников нужно рассматривать, что первый отраженный световой поток не полностью попадает на световое отверстие. Часть его возвращается на отражатель, после этого происходит вторичное отражение – и эта часть потока снова упадет на световое отверстие и отражатель. Это явление, называемое многократным отражением, необходимо учитывать, поскольку оно сопряжено с дополнительными потерями за

счет многократного поглощения светового потока поверхностью отражателя.

Кривая силы светильников рассчитывается с коэффициента многократных отражений a , который равен отношению общего светового потока, падающего на поверхность отражателя, к световому потоку, первично упавшему от источника света. Для вогнутых поверхностей, $a > 1$, поскольку к первично упавшему потоку прибавляются потоки, вторично и далее многократно попадающие на отражатель. Для выпуклых и плоских поверхностей $a = 1$. Коэффициент многократных отражений и находится как сумма ряда геометрической прогрессии [2; 3], описывающий процесс многократных отражений:

$$a = \Phi'_\phi / \Phi_\phi = 1 / (1 - \rho(1 - u)), \quad (1)$$

где Φ'_ϕ – суммарный поток, падающий на поверхность отражателя при многократных отражениях; Φ_ϕ – поток, падаю-

щий на поверхность отражателя от лампы; ρ – коэффициент отражения; u – коэффициент использования поверхности отражателя.

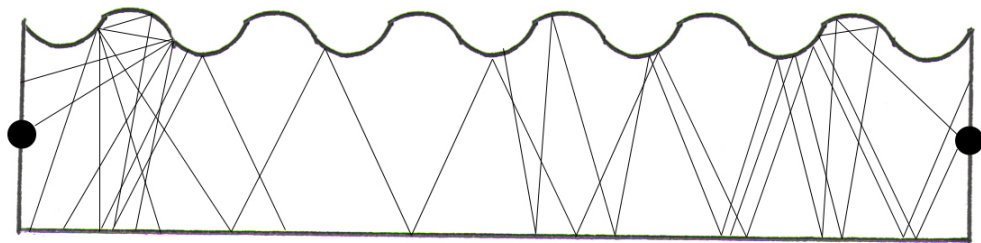


Рис. 1. Вариативная схема функционирования модели светодиодной панели с двумя источниками

Коэффициент использования дает ту долю отраженного потока, которая попадает на световое отверстие. Он определяется из очевидного равенства световых потоков, излучаемых диффузным отражателем и его световым отверстием, если считать последнее диском с яркостью отражателя:

$$\pi L_0 A_0 u = \pi L_{c0} A_{c0}, \quad (2)$$

где L_0 – яркость отражателя; A_0 – площадь отражателя; A_{c0} – площадь светового отверстия.

Из формулы (2) получаем коэффициент:

$$u = A_{c0} / A_0, \quad (3)$$

Для вогнутых поверхностей $u < 1$, а для плоских – $u = 1$.

Изменение a и u позволит рассчитать необходимые параметры отражателя для достижения максимально высокоэффективной КСС с точки зрения образования светового пучка световой панели. Решение указанной задачи сводится к поиску оптимального числа изогнутых и вогнутых отражателей, а также оптимальному значению показателей многократных отражений и использования поверхности отражателя касательно светового отверстия.

Для светодиодной панели с диффузными отражателями световой поток Φ_{cv}

может быть легко найден как сумма значений потоков, попавших на выходное отверстие [1]:

$$\Phi_{cv} = \Phi_\alpha + \frac{u \rho \Phi_\phi}{1 - \rho(1 - u)}. \quad (4)$$

Если выразить потоки Φ_α и Φ_ϕ через поток лампы Φ_L и ввести выражение (1) для коэффициента многократного отражения, то формула (4) может быть записана в следующем виде:

$$\Phi_{cv} = m_1 \Phi_L + \rho m \Phi_L x u, \quad (5)$$

где m – доля потока, изначально падающего на отражатель; m_1 – доля потока, падающего непосредственно на выходное отверстие.

При расчете КСС устройства ввода с определенными допущениями принимается за светящую поверхность равномерной яркости L_0 . Ее значение определяется суммарным световым потоком, падающим на отражатель в итоге многократных отражений:

$$L_0 = \frac{\rho m \Phi_L x}{S_0 \pi}. \quad (6)$$

Сила света $I_{a_{cv}}$ в заданном направлении определяется прямой силой света I_a

в этом направлении и силой света, создаваемой светящей поверхностью отражателя I_{ao} :

$$I_{\alpha CB} = p_{\alpha} I_{\alpha} + I_{ao} = p_{\alpha} I_{\alpha} + L_0 S_{B0} \cos \alpha, \quad (7)$$

где p_{α} – показатель экранирования светящего тела светодиодного модуля краем отражателя в пределах зоны углов экранирования от $\alpha=90^{\circ} - \gamma_1$ до $\alpha=90^{\circ} - \gamma$:

$$p_{\alpha} = \frac{e}{\gamma_1 - \gamma}, \quad (8)$$

Согласно приведенным выше выражениям, преобразование КСС вводного устройства с диффузным отражателем возможно осуществить путем изменения яркости выходного отверстия и угла выхода прямого излучения лампы. С увеличением защитного угла вырастет доля перехваченного отражателем светового потока, растут многократные отражения, в результате чего возрастает яркость выходного отверстия и возрастают значения силы света под малыми

углами к оси; одновременно за счет экранирования снижаются либо становятся равными нулю силы света под значительными углами к оси и падает значение КПД светодиодной панели. Но если увеличить глубину отражателя, сохраняя постоянным значение защитного угла, то осевая сила света и КПД светодиодной панели уменьшаются за счет увеличения потерь при многократных отражениях без возрастания доли перехваченного отражателем потока.

Для решения задачи оптимизации необходимо дополнительно выбрать целевую функцию. В первом приближении это могла бы быть функция дисперсии светового потока, упавшего на выходное отверстие световой панели.

Решение поставленной задачи поможет построить 3D-модель устройства и сделать совокупный анализ работоспособности разрабатываемого устройства. Необходимо отметить, что геометрические параметры вводного устройства оказывают влияние не только на всеобщее светораспределение светового прибора, но и на тепловой режим излучающих модулей светодиодов [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзенберг, Ю. Б. Световые приборы / Ю. Б. Айзенберг. – Москва : Энергия, 1980. – 463 с.
2. Ивлиев, С. Н. О некоторых аспектах использования общемашиностроительных САПР при анализе тепловых режимов светодиодных световых приборов / С. Н. Ивлиев // Сборник научных трудов SWorld. – Одесса : Купrienko, 2013. – Т. 5. – Вып. 2. – С. 70–72
3. Карякин, Н. А. Световые приборы прожекторного и проекторного типов. / Н. А. Карякин. – Москва : Высшая школа, 1966. – 412 с.
4. Трембач, В. В. Световые приборы : Учеб для вузов по спец. «Светотехника и источники света» (2-е изд., перераб. и доп.) / В. В. Трембач. – Москва : Высшая школа, 1990. – 463 с.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторе:

Горьков Александр Алексеевич, аспирант кафедры светотехники светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), alexander@gorkow.org

Для цитирования: Горьков, А. А. Моделирование вводных устройств светящихся панелей на основе светодиодной оптики / А. А. Горьков // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 85–88.

REFERENCES

1. Eisenberg Yu. B. Svetovye pribory [Light devices]. Moscow, Energy Publ., 1980, 463 p.
2. Ivliev S. N. O nekotorykh aspektah ispol'zovanija obshhemashinostroitel'nyh SAPR pri analize teplovyh rezhimov svetodiodnyh svetovyh priborov [Some aspects of the use of CAD in the analysis of general machine-building thermal modes of LED lighting fixtures]. *Collection of SWorld conference proceedings*. Odessa, Kuprienko Publ., 2013, Issue 2, vol. 5, pp. 70 – 72.
3. Karjakin H. A. Svetovye pribory prozhektornogo i proektornogo tipov [Light devices of searchlight and projector types]. Moscow, Higher School Publ., 1966, 412 p.
4. Trembach V. V. Lighting devices: Svetovye pribory : Ucheb dlja vuzov po spec. «Svetotekhnika i istochniki sveta» [Textbook for universities on speciality “Lighting and light sources”]. 2nd ed., Rev. and enlarged issue, Moscow, High. Shkola Publ., 1990, 463 p.

About the author:

Gor'kov Aleksandr Alekseevich, post-graduate student of Light Engineering chair of Department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), alexander@gorkow.org

For citation: Gor'kov A. A. Modelirovanie vvodnyh ustrojstv svetjashhihsja panelej na osnove svetodiodnoj optiki [Modelling of luminous panels input devices based on led optics]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 85 – 88.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

**О. Е. Железникова, С. А. Амелькина, Л. В. Синицына,
М. П. Куликова**

В статье рассматриваются результаты психофизиологических и гигиенических исследований воздействия светодиодного освещения на орган зрения и организм человека; описывается экспериментальная исследовательская установка; приводятся расчетные значения интегральных показателей эффективности светодиодного освещения; показывается практическая значимость полученных результатов.

Ключевые слова: светодиодное освещение, комплексная методика, экспериментальная исследовательская установка, гигиенические и психофизиологические исследования, эффективность, рекомендации.

STUDY OF THE CONDITIONS OF LED LIGHTING

**O. E. Zheleznikova, S. A. Amel'kina, L. V. Sinitsyna,
M. P. Kulikova**

The article considers the results of psychophysiological and hygienic researches on the evaluation of LED-based lighting influence on the human organs of vision and the organism in whole. Experimental research installation is described. We have calculated values of integrated indicators of LED lighting efficiency. The practical importance of results received is shown.

Keywords: led-based lighting, complex method, experimental research installation, hygienic and psychophysiological researches, efficiency, recommendations.

В настоящее время актуальной задачей светотехники является создание благоприятной цветоцветовой среды, которая предполагает использование света как для выполнения зрительной работы, так и для удовлетворения комплекса потребностей человека: психофизиологических, эргономических, психологических, экологических. С другой стороны, являются важными вопросы экономии электроэнергии, расходуемой на освещение. Решение этих задач возможно при использовании светодиодных источников света (ИС), которые сегодня являются одними из самых эффективных и перспективных.

Однако возможность использования светодиодов для создания комфортных

условий освещения требует весомых доказательств, которые могут быть получены путем всестороннего изучения влияния их излучения на орган зрения и организм человека в целом. В работах российских и зарубежных ученых практически нет описаний подобных исследований – встречаются только отдельные результаты о влиянии освещения светодиодами на некоторые функции зрения и зрительную работоспособность. Результаты этих исследований противоречивы и неоднозначны. Это дает основание считать проделанную работу, целью которой являлось проведение экспериментальных психофизиологических и гигиенических исследований по изучению воздействия свето-

диодного освещения на орган зрения и организм человека в целом, актуальной.

Анализ теоретического материала и экспериментальных исследований воздействия на зрительную работоспособность и утомление (факторов, связанных в первую очередь с условиями освещения), позволил нам разработать комплексную методику оценки влияния условий светодиодного освещения на состояние органа зрения и организма человека в целом [1–2].

На основе анализа существующих методик определения отдельных показателей были выбраны оптимальные, наиболее соответствующие поставленным задачам – психофизиологической

и гигиенической оценке эффективности условий светодиодного освещения. Так, изменения функционального состояния органа зрения предлагается оценивать на основании исследований аккомодационно-мышечного аппарата, а также рецепторного аппарата и центрального звена органа зрения.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и создана экспериментальная исследовательская установка (ЭИУ) общего освещения, смонтированная в лаборатории № 316 корпуса № 16 ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н. П. Огарева». Вид помещений, в которых проводились исследования, представлен на рис. 1.

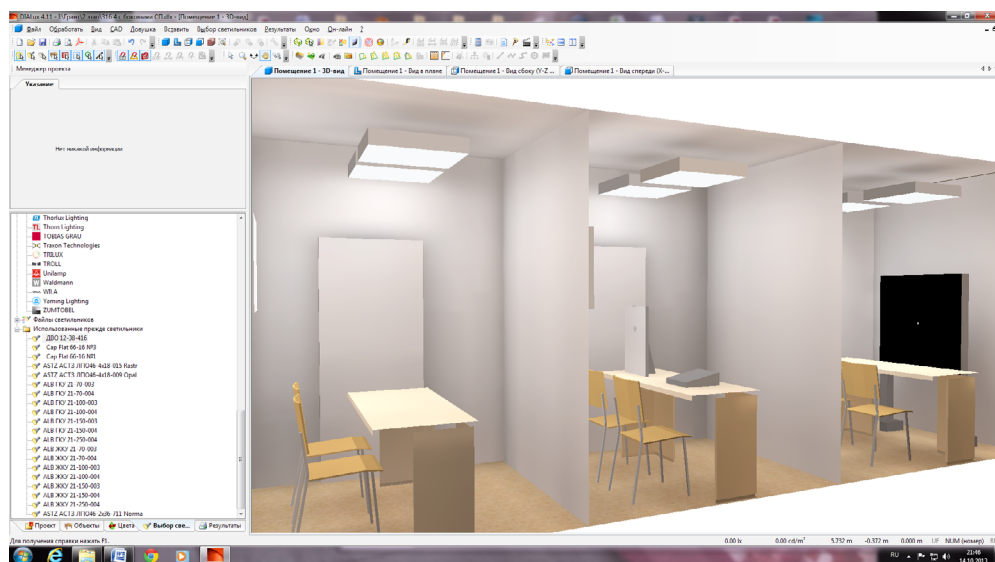


Рис. 1. Помещения для экспериментальных исследований

В качестве базовых ИС для сравнения со светодиодными были выбраны люминесцентные лампы (ЛЛ). Они были достаточно широко и глубоко обследованы с точки зрения психофизиологического и гигиенического воздействия их излучения на организм человека. Влиянию люминесцентного освещения на работу зрительного анализатора посвящено большое число работ различных специалистов и ученых, где установлено положительное влияние излучения ЛЛ на ор-

ган зрения и организм в целом при грамотном выполнении осветительной установки (ОУ).

Для экспериментальных исследований были выбраны светильники следующих производителей:

- совместного российско-корейского предприятия ООО «Непес Рус» (светильники со СД – Cap Flat 66-16);
- ОАО «Ардатовский светотехнический завод» (светильники со СД –

ДВО12-38-001 Prizma и ЛЛ – ЛВО04-4х14-041 PRS, ЛВО04-4Ч18-041 PRS).

Требования к количественным и качественным показателям общего освещения в

помещениях общественных и административных зданий, где производятся зрительные работы разряда А-2, выбранного нами за базовый, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Нормируемые количественные и качественные показатели световой среды основных помещений общественных и административных зданий

Помещения	Плоскость нормирования освещенности (Г – горизонтальная, В – вертикальная), м	Разряд и подразряд зрительной работы	Освещенность рабочей поверхности при общем освещении, лк	Объединенный показатель дискомфорта UGR, не более	Коэффициент пульсации освещенности, не более
Основные помещения общественных и административных зданий	Г-0,8	А-2	400	21	10

В качестве модели зрительной работы выбрана работа умственного и корректорского типа продолжительностью 90 мин. Работа в течение 1,5 ч по выбранной модели эквивалента по зрительному утомлению работе в реальных производственных условиях в течение полного рабочего дня.

Экспериментальные исследования проводились при трех уровнях освещенности, которые являются наиболее характерными для выполнения зрительных работ в помещениях различного функционального назначения: 200, 400 и 1 000 лк. Кроме этого, варьировалась цветовая температура $T_{\text{цв}}$ излучения ИС: 3 000, 4 000 и 5 000 К.

Перед оборудованием экспериментальных помещений светильниками варианты освещения были смоделированы в программе DIALux. Это позволило выполнить требования нормативных документов [3], предъявляемые к общему освещению общественных и административных зданий. Моделирование вариантов освещения с помощью программы DIALux определило высоту

подвеса светильников, обеспечивающую на рабочей поверхности освещенность $E = 1\,000$ лк. Другие, более низкие, уровни освещенности создавались диммированием светового потока.

В исследованиях принимали добровольное участие студенты в возрасте 20–25 лет. Предварительное обследование участников эксперимента включало определение рефракции, остроты зрения, а также проведение компьютерной томограммы сетчатки. У всех отобранных наблюдателей рефракция была преимущественно эметропической, острота зрения на оба глаза – 1,0, цветоощущение без патологии. Кроме этого студенты прошли электрокардиографическое обследование и электроэнцефалографическое исследование функциональной активности головного мозга.

Отобранные наблюдатели в количестве 60 человек были случайным образом разбиты на две группы по 30 человек в каждой: контрольная (эксперимент при люминесцентном освещении) и основная (эксперимент при светодиодном освещении). Число наблюдателей

и количество экспериментов определялось согласно требованиям получения статистически достоверных данных и заданной продолжительности времени проведения исследований.

Перед началом экспериментальных исследований все наблюдатели прошли 10-дневную тренировку по методикам исследований до получения стабильных результатов.

По окончании экспериментальных исследований мы провели повторное обследование наблюдателей прошли повторное обследование, чтобы выявить, не оказывает ли светодиодное освещение отрицательного воздействия на орган зрения и соматический статус организма человека. Результаты эксперимента заносились в специальные протоколы, на основании которых проводилась их статистическая обработка с помощью пакета Statistica 6.0, после чего делались соответствующие заключения об эффективности условий освещения.

Согласно результатам исследований, проведенных с помощью разработанной комплексной методики психофизиологической и гигиенической оценки, нами был составлен психофизиологический

«портрет» утомления, дающий целостное представление о влиянии светодиодного освещения на орган зрения и организм человека в целом.

Проведение серии аналогичных экспериментов показало, что разработанная комплексная методика психофизиологической и гигиенической оценки эффективности светодиодного освещения успешно прошла апробацию в лабораторных условиях.

В ходе исследований также было установлено, что светодиодное освещение не вызывает вредного действия на орган зрения и организм человека в целом. Имевшие место при выполнении зрительных работ изменения исследованных функциональных показателей органа зрения и организма входят в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер.

В качестве интегральных показателей эффективности светодиодного освещения нами были предложены степень зрительного утомления и зрительной работоспособности. В табл. 2 для исследованных условий освещения представлены результаты расчета зрительного утомления (ЗУ) по динамике временно-го порога ахроматической адиспаропии.

Т а б л и ц а 2

**Зрительное утомление (по данным времени ахроматической адиспаропии)
в различных условиях освещения**

Е, лк	$T_{цв}, К$	Зрительное утомление при светодиодном освещении, %	Зрительное утомление при люми- несцентном освещении, %
200	3 000	15,18	20,39
400		12,17	18,27
1 000		6,45	16,67
200	4 000	14,91	19,23
400		11,21	17,14
1 000		6,40	9,4
200	5 000	14,16	18,27
400		11,97	17,14
1 000		8,66	9,57

Показатель ЗУ рассчитывался по формуле:

$$A = \left(1 - \frac{t_j}{t_i}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где A – зрительное утомление; t_j – время ахроматической адиспаропии после зрительной работы; t_i – время ахроматической адиспаропии до зрительной работы.

Согласно табл. 2, с ростом уровня освещенности ЗУ снижается. Расчеты показали, что при $E = 1\,000$ лк снижение ЗУ недостоверно ($p > 0,05$) при всех исследованных значениях $T_{цв}$ как при люминесцентном, так и при светодиодном освещении. Также было установлено, что при светодиодном освещении в процессе полуторачасовой зрительной напряженной работы развивается меньшее ЗУ. Наименьшее ЗУ при светодиодном освещении характерно для $T_{цв} = 4\,000$ К и $T_{цв} = 5\,000$ К при уровне освещенности $E = 400$ лк. Достоверность вли-

яния спектрального состава освещения на ЗУ была доказана во всех исследованных вариантах освещения с $p < 0,05$ по t – критерию Стьюдента.

Результаты исследования зрительной работоспособности методом корректурных проб приведены в табл. 3–4. Основные показатели данного метода (коэффициент точности K , коэффициент работоспособности I , скорость различения V) рассчитывались следующим образом:

$$K = \frac{a - (b + c)}{a + b}, \quad (2)$$

$$I = K \cdot d, \quad (3)$$

$$V = \frac{d}{t}, \quad (4)$$

где a – количество правильно проверенных букв, b – количество пропущенных букв, c – количество допущенных ошибок, d – количество всех букв в проверенном тесте, t – время теста (2 мин).

Таблица 3

Изменение коэффициента зрительной работоспособности I после зрительной нагрузки в условиях светодиодного освещения

Е, лк	$T_{цв},$ К	Условия светодиодного освещения							
		До работы			После работы			Коэффициент корреляция	
		I, зн., $\bar{x}$	Доверительный интервал		I, зн., $\bar{x}$	Доверительный интервал		r (между до и после работы)	$p(r)$
			Нижняя граница ($p=0,05$)	Верхняя граница ($p=0,05$)		Нижняя граница ($p=0,05$)	Верхняя граница ($p=0,05$)		
200	3 000	756	727	785	690	653	727	0,628	$p < 0,05$
400		783	761	804	771	752	790	0,860	$p < 0,05$
1 000		807	776	838	799	765	833	0,469	$p < 0,05$
200	4 000	772	740	804	728	699	757	0,619	$p < 0,05$
400		799	780	818	796	786	807	0,221	$p < 0,01$
1 000		818	784	849	816	802	892	0,532	$p < 0,05$
200	5 000	769	728	810	710	680	740	0,734	$p < 0,05$
400		784	757	811	770	753	786	0,212	$p < 0,05$
1 000		815	781	850	798	781	815	0,576	$p < 0,05$

Таблица 4

Изменение коэффициента зрительной работоспособности / после зрительной нагрузки в условиях люминесцентного освещения

Е, лк	$T_{цв}, K$	Условия люминесцентного освещения							
		До работы			После работы			Коэффициент корреляция	
		$I, \text{зн., } \bar{x}$	Доверительный интервал		$I, \text{зн., } \bar{x}$	Доверительный интервал		r (между до и после работы)	$p(r)$
			Нижняя граница ($p=0,05$)	Верхняя граница ($p=0,05$)		Нижняя граница ($p=0,05$)	Верхняя граница ($p=0,05$)		
200	3 000	720	688	752	632	602	662	0,687	$p<0,05$
400		747	711	784	682	663	701	0,150	$p<0,05$
1 000		762	727	797	705	675	735	0,702	$p<0,05$
200	4 000	731	689	773	651	618	684	0,637	$p<0,05$
400		754	711	798	693	658	727	0,595	$p<0,01$
1 000		777	741	816	726	692	761	0,537	$p<0,05$
200	5 000	728	701	755	641	611	671	0,469	$p<0,05$
400		749	727	770	683	650	717	0,501	$p<0,05$
1 000		771	732	810	713	670	759	0,572	$p<0,05$

Анализ данных табл. 3–4 показывает, что во всем исследованном диапазоне освещенностей при $T_{цв} = 3\,000\text{ К}$, $T_{цв} = 4\,000\text{ К}$ и $T_{цв} = 5\,000\text{ К}$ преимущество светодиодного освещения с позиции обеспечения большей зрительной работоспособности очевидно.

Достоверность различий I при различном спектральном составе и по-

стоянном уровне освещенности подтверждена t – критерием Стьюдента с высокими уровнями значимости практически во всех случаях. Результаты, представленные в табл. 5, позволяют утверждать, что спектральный состав излучения влияет на коэффициент зрительной работоспособности I .

Таблица 5

Достоверность изменения коэффициента зрительной работоспособности / после зрительной работы при различных вариантах освещения

Е, лк	$T_{цв}, K$	Вариант освещения	Достоверность различий с уровнем значимости p по t -критерию Стьюдента
200	3 000	СД – ЛЛ	–
400			$<0,05$
1 000			$<0,05$
200	4 000	СД – ЛЛ	$<0,05$
400			$<0,05$
1 000			$<0,05$

Окончание табл. 5

200	5 000	СД – ЛЛ	–
400			<0,05
1 000			<0,05

Следует отметить, что парный коэффициент корреляции r подтвердил ($p < 0,05$) наличие положительной корреляции между объемом абсолютной аккомодации (ОАА) и I после зрительной работы (табл. 6). Это позволяет сде-

лать вывод, что определенный вклад в повышение коэффициента зрительной работоспособности при светодиодном освещении вносит лучшая работа аккомодационно-мышечного аппарата органа зрения.

Таблица 6

Оценка статистической связи объема абсолютной аккомодации и коэффициента зрительной работоспособности после нагрузки в различных условиях освещения

Е, лк	$T_{цв}, K$	После работы в условиях светодиодного освещения		Парный коэффициент корреляции r ($p < 0,05$)
		ОАА, дптр, $\bar{x}$	I , зн., $\bar{x}$	
200	4 000	8,3	728	0,89
400		8,8	796	0,91
1 000		9,6	816	0,92

Проверка гипотезы о нормальности распределения численных значений качества работы (коэффициента точности K) была принята, поэтому статистическая обработка результатов осуществлена посредством параметрических критери-

ев статистики. Обработка значений коэффициента точности K при различном спектральном составе освещения показала, что различия во всех исследованных вариантах освещения оказались не значимыми (табл. 7).

Таблица 7

Достоверность изменения коэффициента точности K после зрительной работы при различных вариантах освещения

Е, лк	$T_{цв}, K$	Вариант освещения	Достоверность различий с уровнем значимости p по t -критерию Стьюдента
200	3 000	СД – ЛЛ	–
400			–
1 000			–
200	4 000	СД – ЛЛ	–
400			–
1 000			–
200	5 000	СД – ЛЛ	–
400			–
1 000			–

Полученные в ходе исследований результаты позволят сформулировать требования для устройства светодиодного освещения и разработать практические рекомендации по реализации освещения со светодиодными ИС, которые будут способствовать оптимизации условий труда при выполнении напряженных умственных и зрительных работ. Также материалы исследований могут служить

основой для внесения изменений в нормативные документы, определяющие требования к количественным и качественным показателям ОУ, выполняемых на основе светодиодных ИС. Предлагаемые изменения связаны с уточнением рекомендуемых значений цветовой температуры $T_{\text{цв}}$, объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации освещенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О разработке комплексной методики психофизиологической и гигиенической оценки светодиодного освещения / О. Е. Железникова [и др.] // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : Сб. науч. тр. XI Междунар. научн.-техн. конф. (Саранск, 3–4 декабря 2013 г.) / Отв. ред.: О. Е. Железникова. – Саранск : Афанасьев В. С., 2013. – С. 149–153.
2. Разработка комплексной методики оценки влияния условий светодиодного освещения на состояние органа зрения и организма человека в целом / С. А. Амеликина [и др.] // Естественные и технические науки. – 2013. – № 5 (67). – С. 249–257.
3. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084092>. – Дата обращения: 14.10.2013.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Железникова Ольга Евгеньевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой светотехники, декан светотехнического факультета, ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), sarstf@mail.ru

Амеликина Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры светотехники факультета светотехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), amelkinas@mail.ru

Синицына Людмила Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры источников света факультета светотехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), lvsinitsina@mail.ru

Куликова Маргарита Павловна, кандидат медицинских наук, профессор кафедры госпитальной хирургии Медицинского института ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), dalim4@mail.ru

Для цитирования: Исследование условий светодиодного освещения / О. Е. Железникова [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 89–97.

REFERENCES

1. Amel'kina S. A., Zheleznikova O. E., Kiryuchina S. V., Sinitsyna L. V. Razrabotka kompleksnoj metodiki ocenki vlijaniya uslovij svetodiodnogo osveshhenija na sostojanie organa zrenija i organizma cheloveka v celom [Elaboration of the complex methodology for the estimation of led-based lighting influence of the human organ of vision and the entire organism]. *Estestvennyye i tehicheskie nauki* – Natural and technical Sciences. 2013, vol. 67, no. 5, pp. 249 – 257.
2. Zheleznikova O. E., Amel'kina S. A., Sinitsyna L. V., Aksenova S.V., Kiryukhina S.V. About the development of integrated methods of psycho-physiological and hygienic estimation of led lighting. [O razrabotke

kompleksnoj metodiki psihofiziologicheskoy i gigienicheskoy ocenki svetodiodnogo osveshhenija]. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoj svetotekhniki, jelectrotehniki i jenergetiki: Sb. nauch. tr. XI Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf., Saransk, 3–4 dekabrya 2013 g.* – Problems and prospects of development of domestic lighting, electrical engineering and energy: proceedings of XI international scientific and technical conference, Saransk, December 3 to 4, 2013, V. Afanasiev. Saransk, 2013, pp. 149 – 153.

3. SR 52. 13330.2011 Estestvennoe i iskusstvennoe osveshhenie [Natural and artificial lighting]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200084092>.

About the authors:

Zheleznikova Ol'ga Evgen'evna, associate professor (docent), head of Light Engineering chair, dean of Department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, sarstf@mail.ru

Amel'kina Svetlana Anatol'evna, associate professor (docent) of Light Engineering chair of Department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, amelkinas@mail.ru

Sinicyna Ljudmila Vasil'evna, associate professor (docent) of Light Sources chair of Department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, lvsinitsina@mail.ru

Kulikova Margarita Pavlovna, professor of Hospital Surgery chair of Institute of Medicine of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Medical sciences, dalim4@mail.ru

For citation: Zheleznikova O. E, Amel'kina S. A, Sinitsyna L. V., Kulikova M. P. Issledovanie uslovij svetodiodnogo osveshhenija [Study of the conditions of led lighting]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 89 – 97.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПАКТНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

А. А. Ашрятов

В статье определяется причина возникновения периодических световых вспышек в компактных люминесцентных лампах в осветительных установках с выключателями со встроенным световым индикатором, находящимися в выключенном состоянии; исследуются электронные пускорегулирующие аппараты.

Ключевые слова: компактная люминесцентная лампа (КЛЛ), встроенный электронный ПРА, осветительные установки, местоположение выключателя, выключатель с индикатором, индикатор местоположения

ON SPECIFICS OF EMPLOYMENT OF COMPACT FLUORESCENT LAMPS

A. A. Ashryatov

In the article we have determined a cause of the periodic flashes of light in compact fluorescent lamps in lighting devices where switches have integrated light indicator in neutral position. Investigation of electronic ballasts showed that some manufacturers of electronic ballasts on its printed circuit board provides space for mounting the thermistor, but there is no thermistor.

Keywords: compact fluorescent lamp (CFL), built-in electronic ballasts, lighting installation, the location of the switch, the switch with indicator light location.

В настоящее время актуальны усилия по повышению энергоэкономичности осветительных установок (ОУ) [1]. Одним из путей энергосбережения в освещении, особенно бытовом, является использование компактных люминесцентных ламп со встроенными электронными ПРА (далее – КЛЛ). КЛЛ, номенклатура которых с каждым годом увеличивается, позволяют использовать их в ОУ вместо ламп накаливания общего назначения (ЛОН). При этом широко используются выключатели со встроенным световым индикатором (для легкости определения местоположения выключателей, что особенно важно в условиях темноты). Однако было замечено, что нередко при замене ЛОН на КЛЛ в ОУ с такими выключателями происходят световые вспышки в КЛЛ с часто-

той порядка 1 Гц, когда выключатели (и ОУ, соответственно) выключены. Данная работа посвящена выяснению причин возникновения этого явления.

В ходе исследований использовались КЛЛ и выключатели со встроенными световыми индикаторами производства различных фирм. Исследовались выключатели как с газоразрядным, так и со светодиодным (СД) индикаторами. При этом газоразрядный индикатор последовательно соединялся с балластным резистором R с сопротивлением 470 или 120 кОм, а светодиодный индикатор VD – с сопротивлением 220 кОм (рис. 1). При разомкнутых контактах выключателя SA токи данных индикаторов при напряжении сети 220 В, соответственно, равны 0,350, 1,200 и 0,075 мА.

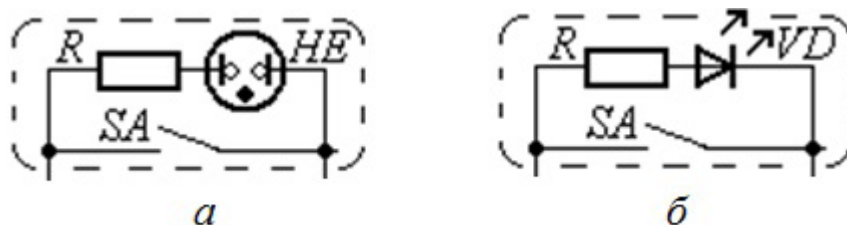


Рис. 1. Электрические схемы выключателей с газоразрядным (а) и светодиодным (б) индикаторами: SA – контакты выключателя; R – балластный резистор; HE – газоразрядная лампа; VD – светоизлучающий диод

При включении в цепь выключателя ЛОН мощностью 60 Вт, наиболее часто используемой в бытовых осветительных приборах, осциллограмма напряжения на ней при разомкнутых контактах выключателя близка к синусоидальной, с паузами в начале и в конце полупериодов. Поскольку сопротивление ЛОН активно, такая осциллограмма характеризует изменение тока в цепи при разомкнутых контактах выключателя, то есть тока, значение которого в основном определяется сопротивлением балластного резистора R (по форме осциллограммы аналогичного току газоразрядной лампы с активным балластом [2]).

При таком же включении КЛЛ, например, типа КОСМОС 3U 20W, осциллограмма напряжения на лампе су-

щественно отличается (рис. 2). Наличие нескольких кривых на осциллограмме напряжения на КЛЛ и их различие в четные и нечетные полупериоды свидетельствуют о его периодической изменчивости во времени. При этом рост напряжения на КЛЛ в «первом» полупериоде, согласно рис. 2 (б, в), происходит плавно, а снижение, почти до нуля, происходит в тот момент, когда напряжение питания возрастает (рис. 2 в) или достигает максимума (рис. 2 б). Уменьшение частоты развертки луча осциллографа (на два порядка), позволило определить характер периодического изменения напряжения на КЛЛ. Полученные периодичности (рис. 3) были как у указанных световых вспышек в КЛЛ и равнялись 1,15; 0,34 и 0,43 с соответственно.

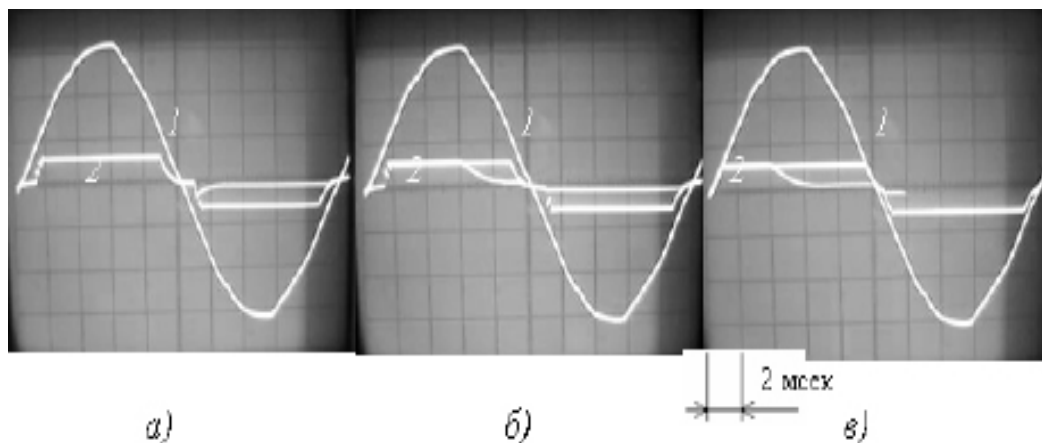


Рис. 2. Осциллограммы напряжения питания (1) и напряжения на КЛЛ (2) (100 В/дел) с выключателями по рис. 1 а производства фирм MAKEL (а) и «Универсал» (б) и с выключателем по рис. 1 б (в), находящимися в выключенном состоянии

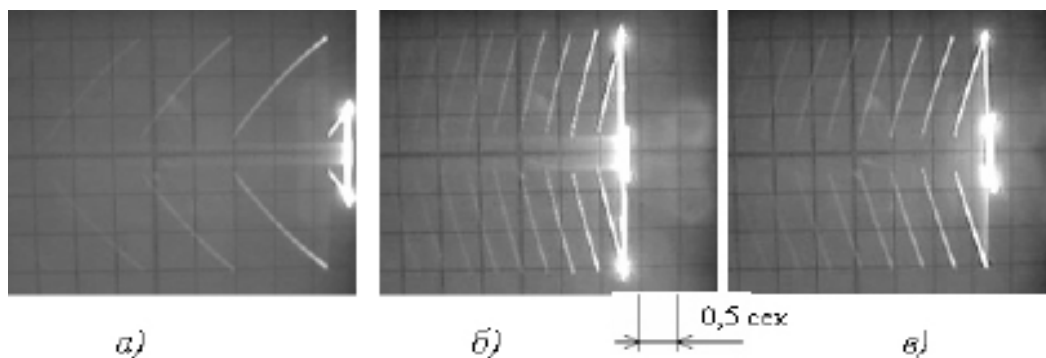


Рис. 3. Характер изменчивости осциллограмм напряжения на КЛЛ (20 В/дел) с выключателями по рис. 1 а производства фирм MAKEL (а) и «Универсал» (б) и с выключателем по рис. 1 б (в), находящимися в выключенном состоянии

Однако при включении в цепь выключателя с индикатором местоположения некоторые типы КЛЛ (например КЛЭ 6-20 производства ОАО «ЛисмаВНИИИС») световых вспышек не дают. Для выяснения причин периодических световых вспышек в выключенных КЛЛ остальных типов были сравнены между собой схемы электронных ПРА в КЛЛ КОСМОС 3U 20W и КЛЭ 6-20. Оказалось, что существенным различием является отсутствие в схеме первого ПРА термистора (позистора) $PTC1$,

который в схеме второго ПРА включен параллельно емкости $C5$, осуществляющей «быстрый пуск» лампы (рис. 4). Функциональное назначение термистора в электронном ПРА – замедление роста напряжения на этой емкости, благодаря чему возрастает время подогрева электродов перед пуском лампы [4]. Это связано с тем, что термистор имеет положительный температурный коэффициент сопротивления, которое нелинейно быстро возрастает с ростом его температуры.

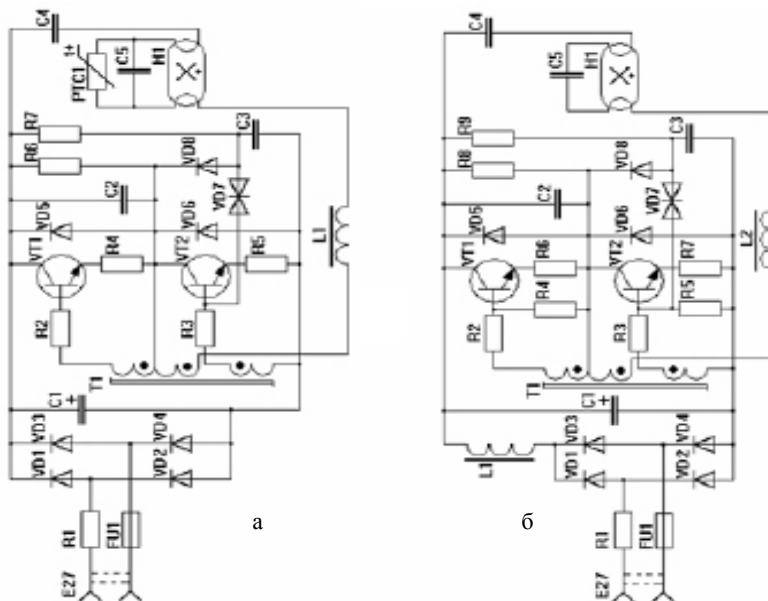
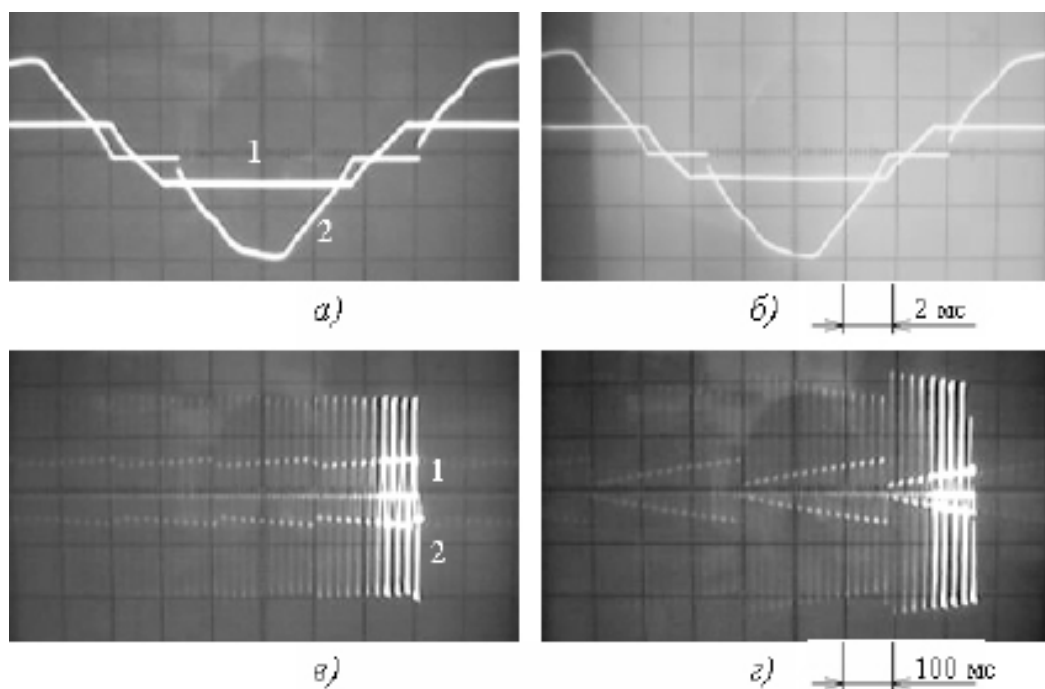
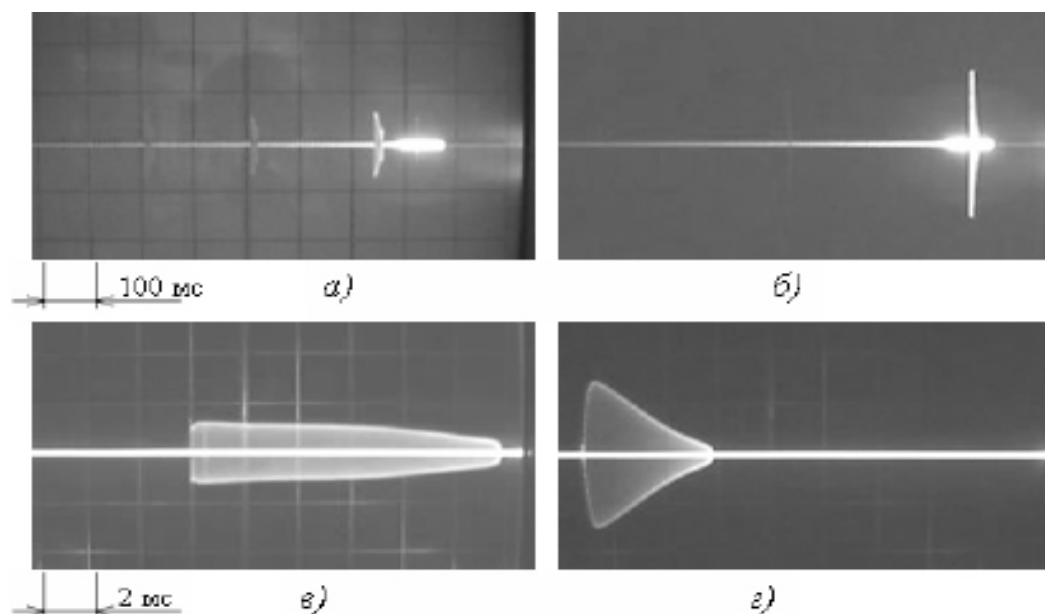


Рис. 4. Принципиальные электрические схемы КЛЛ типов КЛЭ 6-20 (а) и КОСМОС 3U 20W (б)



Р и с . 5. Осциллограммы напряжения на КЛЛ (1) типов КЛЭ 6-20 (а, в) и КОСМОС 3U 20W (б, г) (100 В/дел) и напряжения на балластном резисторе (2) газоразрядного индикатора выключателя (100 В/дел) при выключенном выключателе с индикатором



Р и с . 6. Осциллограммы напряжения на разрядной трубке КЛЛ типа КЛЭ 6-20 с термистором (а, в) (0,05 В/дел) и без термистора (б, г) (0,2 В/дел) при выключенном выключателе с индикатором

Осциллограммы тока и напряжения на КЛЛ независимо от наличия указанного термистора практически одинаковы (рис. 5 а–б), но в КЛЛ с термистором (рис. 5 в) имеются незначительные периодические пульсации тока и напряжения, а в КЛЛ без термистора (рис. 5 г) – значительные (см. также рис. 3). Это свидетельствует о том, что в течение периода этих пульсаций, благодаря протекающему через индикатор выключателя тока происходит накопление энергии в ёмкости $C1$ (рис. 4) до уровня, при котором происходит за-

пуск инвертора ПРА. В первом случае накопленная в ёмкости $C1$ энергия рассеивается в термисторе за 12 мс (рис. 6 а, в), а во втором – идет на зажигание разряда и последующее его горение в течение 5 мс (рис. 6 б, г).

Светлый фон осциллограмм (рис. 6 в–г) свидетельствует о наличии высокочастотных колебаний напряжения, подаваемого на разрядную трубку электронным ПРА. Вид осциллограммы напряжения на разрядной трубке КЛЛ типа КЛЭ 6–20 в рабочем режиме приведен на рис. 7.

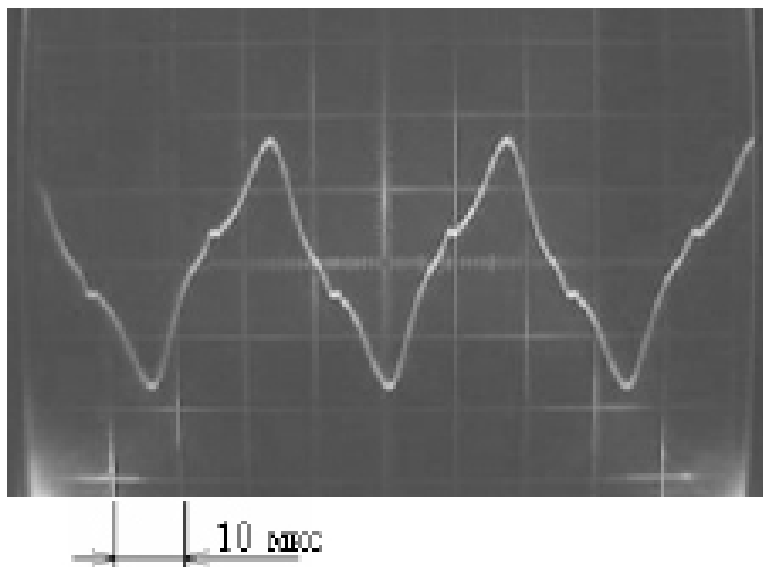


Рис. 7. Осциллограмма напряжения на разрядной трубке КЛЛ типа КЛЭ 6–20 в рабочем режиме горения (50 В/дел)

Таким образом, согласно полученным данным, КЛЛ без термистора при разомкнутых контактах выключателя со световым индикатором его местоположения работает в импульсном режиме с высокой скважностью. Можно считать, что в этом случае лампа как бы работает в режиме частых включений, сокращающих срок ее службы, несмотря на то, что ток лампы при этом значительно меньше рабочего. Кроме этого, отсутствие термистора приводит к холодным зажиганиям КЛЛ, каждое из которых снижает срок их службы на 3–4 ч [3].

Поэтому КЛЛ без термистора не должны попадать к потребителю!

Добавим, что изучение электронных ПРА в КЛЛ различных производителей показало, что на печатной плате некоторых ПРА предусмотрено место для термистора, но сам он отсутствует, и КЛЛ одного производителя может быть как с термистором, так и без него. Таким образом, наличие термистора в КЛЛ необходимо проверять (в том числе в торговле и потреблении), основываясь на следующих выводах. При наличии термистора при включении КЛЛ про-

исходит разогрев электродов перед подачей зажигающего напряжения на разрядную трубку и этот процесс занимает некоторое время, причем при снижении питающего напряжения, время разогрева увеличивается [2; рис. 3]. Причем, например, при питающем напряжении, пониженном до 150 В, КЛЛ без термистора после ее включения зажжется не более чем через четверть секунды, а с

термистором – не менее чем через секунду, что легко определяется «на глаз».

Итак, мы считаем, что полученные в ходе исследований результаты целесообразно учитывать как при разработке и производстве электронных ПРА для КЛЛ (и КЛЛ в целом), так и при проверке наличия термистора в этих ПРА торговыми предприятиями и конечными потребителями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзенберг, Ю. Б. Задача стимулирования производства и применения энергоэффективных светотехнических изделий / Ю. Б. Айзенберг // Светотехника. – 2009. – № 2. – С. 46–47.
2. Ашрятов, А. А. Исследование характеристик компактных люминесцентных ламп со встроенным электронным ПРА / А. А. Ашрятов // Светотехника. – 2009. – № 2. – С. 41–42.
3. Рохлин, Г. Н. Разрядные источники света: 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
4. Справочная книга по светотехнике (3-е изд., перераб. и доп.) / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. – Москва : Знак, 2006. – 972 с.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Ашрятов Альберт Аббасович, кандидат технических наук, профессор кафедры источников света факультета светотехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), ashryatov@rambler.ru

Для цитирования: Ашрятов, А. А. Об особенностях эксплуатации компактных люминесцентных ламп / А. А. Ашрятов // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 98–103.

REFERENCES

1. Aisenberg Y. B. Zadacha stimulirovaniya proizvodstva i primeneniya jenergoeffektivnyh svetotekhnicheskikh izdelij [The task of stimulation of production and use of energy-efficient lighting products]. *Svetotekhnika – Light engineering*. 2009, no. 2, pp. 46 – 47.
2. Spravochnaja kniga po svetotekhnike [Handbook on light engineering], under ed. by Y. B. Aisenberg. Moscow, Znak Publ., 2006, 972 p.
3. Rokhlin G. N. Razjadyne istochniki sveta [Discharging light sources]. 2nd ed.. Moscow, Jenergoatomizdat, 1991, 720 p.
4. Ashryatov A. A. Issledovanie harakteristik kompaktnyh ljuminescentnyh lamp so vstroennym jelektronnym PRA [Research of characteristics of compact fluorescent lamps with electronic ballasts]. *Svetotekhnika – Light engineering*. 2009, no. 2, pp. 41 – 42.

About the authors:

Ashryatov Al'bert Abbyasovich, professor of Light Sources chair of Light Engineering Department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in technical sciences, docent, ashryatov@rambler.ru

For citation: Ashryatov A. A. Ob osobennostjah jekspluatatsii kompaktnyh ljuminescentnyh lamp [On specifics of employment of compact fluorescent lamps]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta – Mordovia University Bulletin*. 2014, no. 1, pp. 98 – 103.

УДК 006.83-053.2

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ТОВАРОВ ДЛЯ ДЕТЕЙ

Е. Н. Канинина

В статье рассматривается круг вопросов, посвященных надзору за производством и реализацией детских игр и игрушек; определяется ряд задач, направленных на недопущение продажи опасных игрушек, не соответствующих установленным требованиям.

Ключевые слова: игрушка, стандарт, технический регламент, надзор, санитарно-эпидемиологические требования.

TOPICAL ISSUES OF CONFORMITY OF GOODS FOR CHILDREN

E. N. Kaninina

The article addresses the range issue, dedicated to the supervision of production and realization of children's games and toys. The quality and safety of a significant part of toys sold on the consumer market, does not meet the requirements. Determined by the range of tasks required for decisions to prevent the sale of the dangerous toys.

Keywords: toy, standard, technical regulation, supervision, sanitary and epidemiological requirements, the certificate of conformity.

В 2003 г. в России произошли серьезные изменения законодательства в области подтверждения соответствия продукции и услуг. С принятием Федерального закона «О техническом регулировании» все стандарты на продукцию и услуги перешли в статус добровольных для исполнения. На сегодняшний день производители обязаны выполнять только требования технических регламентов. Не включенные в технические регламенты требования к продукции не могут носить обязательный характер.

С 1 июля 2003 г. по 1 июля 2010 г. действовал переходный период, в течение которого допускалось использование существовавшей нормативной базы.

К 2010 г. было запланировано разработать 500 технических регламентов, однако к окончанию переходного периода из них приняли лишь 13.

Безопасность большинства детских игрушек, продаваемых в России, не соответствовала требованиям санитарного законодательства. 15 декабря 2010 г. в Государственной думе Российской Федерации состоялись парламентские слушания на тему «Законодательное регулирование в сфере игровой и цифровой продукции для детей: проблемы и решения». В ходе обсуждения было отмечено, что государственный санитарно-эпидемиологический надзор за

производством и реализацией детских игр и игрушек, в том числе импортируемых, планоно осуществлялось во всех регионах Российской Федерации [1].

Однако, несмотря на принятые меры, качество значительной части игрушек не соответствовало требованиям законодательства. Основными причинами изъятия игрушек из оборота явились: отсутствие документов, подтверждавших их качество и безопасность; нарушение требований по маркировке; несоответствие игрушек требованиям безопасности по санитарно-химическим, токсикологическим и звуковым показателям.

При поведении контрольно-надзорных мероприятий специалистами Роспотребнадзора в 2010 г. по выявленным нарушениям были назначены административные наказания в виде штрафа на сумму более 2,2 млн руб. [3]. В суд было направлено 48 дел.

Эти и другие инциденты усилили беспокойство специалистов по поводу опасности токсичных веществ в игрушках и других детских товарах, многие из которых производились в Китае. В связи с этим основными вопросами, подлежащими решению в обозначенной области на территории единого экономического пространства Таможенного союза, стали разработка и утверждение технического регламента «О безопасности товаров для детей».

Так, решением Комиссии Таможенного союза от 23 сентября 2011 г. был утвержден технический регламент «О безопасности игрушек», разработанный с целью установления на единой таможенной территории Таможенного союза единых обязательных для применения и исполнения требований к игрушкам [2] и обеспечения их свободного перемещения.

В соответствии с положениями указанного технического регламента маркировка игрушек должна содержать следующую информацию:

- наименование игрушки;
- наименование страны-изготовителя;
- наименование и местонахождение изготовителя (уполномоченного изгото-

вителем лица), импортера, контактная информация;

- товарный знак изготовителя (при наличии);

- минимальный возраст ребенка, для которого предназначена игрушка, или пиктограмма, обозначающая возраст ребенка;

- основной конструкционный материал (для детей до 3 лет) (при необходимости);

- способы ухода за игрушкой (при необходимости);

- дата изготовления (месяц, год);

- срок службы или срок годности (при их установлении);

- условия хранения (при необходимости) [2].

Как мы видим, приведенные положения не содержат требований к указанию на игрушке точного химического состава материала, из которого она изготовлена. Всем известно, что дети в современном обществе подвержены возникновению сильнейших аллергических реакций даже на незначительное содержание каких-либо химических веществ. Подобная ситуация, когда родители не знают, что покупают своему ребенку, нередко приводит к плачевным результатам.

В связи с этим мы считаем, что одним из требований технического регламента по маркировке игрушек должно быть указание на точный химический состав материалов, из которых они изготовлены.

В Федеральном законе «О техническом регулировании» также прописаны две формы обязательного подтверждения соответствия: обязательная сертификация и принятие декларации о соответствии. Принятие декларации осуществляется на основании собственных доказательств изготовителя соответствия продукции требованиям безопасности. Обязательная сертификация всегда проводится с участием третьей независимой стороны – органа по сертификации, который на основании результатов испытаний принимает решение о соответствии

продукции требованиям технического регламента и выдаче сертификата соответствия. В связи с этим в техническом регламенте «О безопасности игрушек» в качестве формы подтверждения соответствия совершенно обоснованно избрана обязательная сертификация.

В процессе проведения процедур подтверждения соответствия игрушек должны применяться схемы сертификации с анализом состояния производства независимо от наименования и месторасположения изготовителя. Однако, к сожалению, даже принятие и утвержде-

ние технического регламента не может в полной мере обеспечить качество и безопасность товаров для детей. Для достижения этой цели необходим дополнительный комплекс мер по надзору за продукцией, продаваемой на малых рынках.

Необходимо также массовое информирование потребителя о возможных последствиях покупки игрушек на «базаре» за «бесценок». Родители должны помнить об ответственности за будущее своих детей, быть внимательными и осторожными при покупке детских товаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качество жизни российских детей зависит от нас [Электронный ресурс]. – Москва, 2010. – URL: <http://www.riastk.ru/news/archive.php?day=16&month=12&year=2010> (дата обращения 10.11.2013).
2. О безопасности игрушек : техн. регламент Тамож. союза 008/2011. – 2011. 23 сент. – № 798.
3. Роспотребнадзор контролирует качество детских игр и игрушек [Электронный ресурс]. – Москва, 2010. – URL: <http://rg.ru/2010/12/15/igrushki-anons.html> (дата обращения 10.11.2013).

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторе:

Канинина Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), elena-kaninina@yandex.ru

Для цитирования: Канинина, Е. Н. Актуальные вопросы подтверждения соответствия товаров для детей / Е. Н. Канинина // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 104–106.

REFERENCES

1. Kachestvo zhizni rossijskih detej zavisit ot nas [The quality of life for Russian children depends on us]. URL: <http://www.riastk.ru/news/archive.php?day=16&month=12&year=2010>
2. Technical regulations of the Customs Union TR TC 008/2011. O bezopasnosti igrushek [On safety of toys]. Approved by the Commission of the Customs Union on September 23, 2011, no. 798.
3. Rospotrebnadzor kontroliruet kachestvo detskih igr i igrushek [Rospotrebnadzor controls the quality of children's toys]. Available at: <http://rg.ru/2010/12/15/igrushki-anons.html>

About the author:

Kaninina Elena Nikolaevna, senior lecturer of Department of Metrology, Standardization and Certification, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), elena-kaninina@yandex.ru

For citation: Kaninina, E. N. Aktual'nye voprosy podtverzhdenija sootvetstvija tovarov dlja detej [Topical issues of conformity of goods for children]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 104 – 106.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

**С. А. Панфилов, В. М. Каликанов,
Ю. А. Фомин, О. С. Панфилова**

В статье рассматриваются результаты исследования конкурентоспособности однофазных источников бесперебойного питания мощностью 1 000 Вт (критерии оценки основаны на предпочтениях, высказанных потребителями продукции); приводятся рекомендации для повышения конкурентоспособности отечественной продукции.

Ключевые слова: источник питания, квалиметрия, показатель качества, конкурентоспособность, потери.

POWER SOURCES ANALYSIS

**S. A. Panfilov, V. M. Kalikanov,
Yu. A. Fomin, O. S. Panfilova**

The paper discusses the research results of competitiveness of phase uninterruptible power supply with capacity of 1000 watts. Quality control unit was used for comparison. Evaluation criteria are based on the preferences stated by consumers. The article contains recommendations for the direction of works to improve the competitiveness of domestic products.

Keywords: power supplies, qualimetry, quality score, competitiveness, losses.

Обязательными требованиями для успешного выпуска конкурентоспособной продукции являются постоянный мониторинг и анализ качества продукции, а также обоснованный выбор внешних поставщиков. В этом же ключе сформулированы требования стандарта ГОСТ 15001-88, согласно которому изделия должны оцениваться в «Карте технического уровня и качества продукции» относительно лучших отечественных и зарубежных образцов. В настоящей работе обсуждается методика сравнительной квалиметрической оценки конкурентоспособности продукции, выпускаемой ведущими производителями из разных стран.

Квалиметрия является разделом метрологии, в котором качество количественно определяется как степень выполнения требований потребителей продукции или услуги. Квалиметрический подход заключается в том, что в процессе оцен-

ки получают единичные относительные безразмерные показатели качества (конкурентоспособности), нормированные в диапазоне [0–1]. На шкале качества значение показателя качества, равное единице, означает полное выполнение требований потребителя, равное нулю – невыполнение требований и промежуточное значение – частичное выполнение. Единичные показатели далее объединяются в комплексные и интегральные, характеризующие качество продукции в определенной области, например по показателям назначения, и далее в целом. Ориентируясь на мнение потребителей, возможно применение весовых коэффициентов (коэффициентов важности) в процессе объединения единичных показателей качества.

В качестве объекта исследования в методике сравнительной оценки выполнения требований потребителей выберем изделия, активно востребованные на рынке

электротехнической продукции – однофазные источники бесперебойного питания (ИБП) вычислительной аппаратуры мощностью 1кВт семи различных фирм. Приведем сведения о типах и фирмах-производителях ИБП электронной аппаратуры:

- № 1 – APC Smart – UPS 1000 (фирма American Power Conversion);
- № 2 – APC Smart – UPS XL (фирма American Power Conversion);
- № 3 – Eaton Powerware 5115 (фирма Powercom);
- № 4 – Smart King Pro SKP-1000 (фирма Powercom);
- № 5 – СБП XX 230-50-1/1 (ОАО Конвертор);
- № 6 – Powerman – Real Smart (фирма Powerman);
- № 7 – Liebert – Power Sure (фирма Emerson Network Power);

Исходные данные с паспортными характеристиками источников питания различных производителей представлены в табл. 1.

При анализе конкурентоспособности параметров ИБП применяемая методика ориентировалась на требования к продукции, принятые потребителями

за оптимальные. Сравнение выполнялось по характеристикам, которые пользователи источников питания признали наиболее важными из представленных в паспортах на изделия: максимальное входное напряжение, диапазон входного напряжения, КПД при работе от сети, диапазон выходного напряжения, время переключения на аккумуляторную батарею (АБ) и др. (см. табл. 1). При формировании меры оценки использовалась широко применяемая методика, согласно которой в качестве оптимальных значений каждого из параметров, вошедших в требования к продукции, были выбраны лучшие значения из представленных паспортных данных для оцениваемых образцов продукции.

Результаты формирования единичных и комплексных показателей, оценивающих конкурентоспособность ИБП (1-фазных с выходным напряжением 220 В и мощностью 1 кВт) в информационной системе, иллюстрированы диаграммой на рис. 1, где представлены комплексные показатели выполнения требований потребителей (конкурентоспособности) ИБП в порядке убывания.

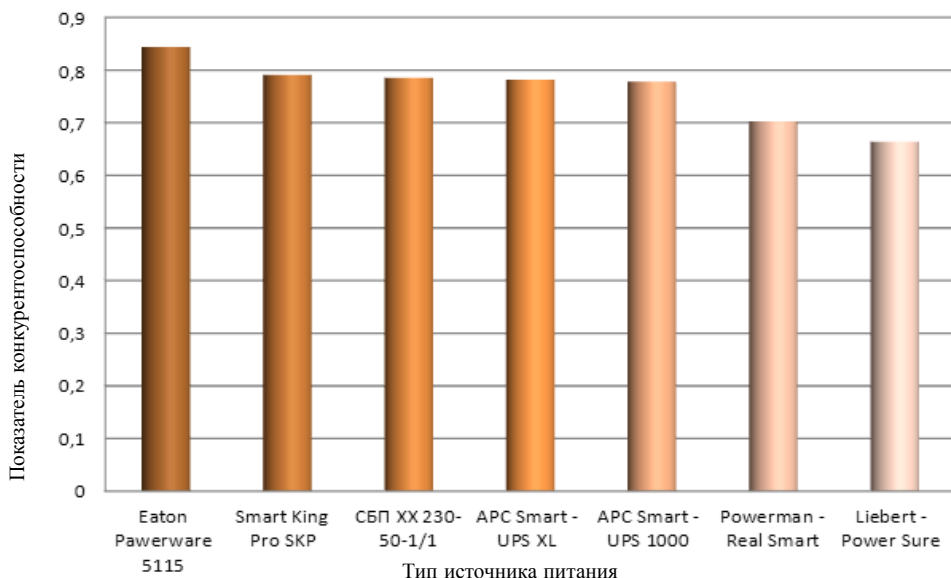


Рис. 1. Комплексная оценка выполнения требований потребителей ИБП

Таблица 1

Исходные данные ИБП

Объект	ИБП однофазные / 1кВт										
	Макс. входное напряжение, В	Диапазон входного напряжения, В	КПД от сети, %	Диапазон выходного напряжения, В	Время перекл. на АБ, мс	Время работы АБ, мин	Время подзарядки АБ до 90 %, ч	Диапазон температур окр. среды, °С	Вес, кг	Габариты, мм ³	Гарантия, лет
№ признака	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Требование	286	126	96	67	4	12	3	48	13,0	7 353 750	2
1	286	126	93	45	9	6	3	40	18,9	16 120 080	2
2	286	126	93	45	9	12	4	40	27,2	16 120 080	2
3	276	92	96	36	5	5	3	40	13,0	7 353 750	2
4	275	110	90	22	4	5	4	48	15,0	12 818 400	2
5	272	106	90	62	6	5	3	40	19,7	18 155 460	2
6	275	110	90	22	4	5	8	40	16,0	37 382 400	2
7	245	88	90	67	5	12	10	35	44,0	40 244 160	1

Из диаграммы на рис. 1 видно, что наиболее высокими показателями обладает ИБП Eaton Powerware 5115, а наиболее низкими ИБП Liebert – Power Sure. Разработка отечественного источника питания СБП ХХ 230-50-1/1 производства ОАО «Конвертор» (г. Саранск) находится на достойном третьем месте, однако прогнозный анализ выявляет наиболее важные критические па-

раметры, изменение которых позволит отечественной продукции занять лидирующие позиции.

Для улучшения показателя конкурентоспособности источника питания СБП ХХ 230-50-1/1 необходимо выяснить, по каким показателям данный производитель отстает от своих конкурентов (табл. 2).

На основании полученных данных строим диаграмму Парето (рис. 2).

Т а б л и ц а 2

Значимость потерь ИБП производства ОАО «Конвертор»

ИБП СБП ХХ 230-50-1/1			
Характеристики	Показатель конкурентоспособности	Потери	Значимость потерь, %
Максимальное входное напряжение, В	0,95	0,05	2,07
Диапазон входного напряжения, В	0,84	0,16	6,71
КПД от сети, %	0,94	0,06	2,64
Диапазон выходного напряжения, В	0,93	0,07	3,16
Время переключения на АБ, мс	0,66	0,33	14,10
Время работы АБ, мин	0,41	0,59	24,68
Время подзарядки АБ до 90%, ч	1,00	0,00	0,00
Диапазон температуры работы окружающей среды, °С	0,83	0,17	7,05
Вес, кг	0,66	0,34	14,39
Габариты, мм ³	0,41	0,59	25,17
Гарантия, лет	1,00	0,00	0,00

Из рис. 2 видно, что параметрами, вызывающими наибольшие потери конкурентоспособности отечественного ИБП, являются сравнительно большие габариты (см. табл. 1, признак № 10) и непродолжительная работа при питании от АБ (признак № 6).

Для снижения потерь конкурентоспособности ИБП, а следовательно, улучшения его потребительских свойств, необходимо уменьшить габари-

ты ИБП и увеличить время работы при питании от АБ. В связи с этим необходимы дополнительные конструкторские и технологические решения, направленные на совершенствование анализируемых технических характеристик ИБП СБП ХХ 230-50-1/1.

Выполнение таких изменений по результатам анализа изменит соотношение показателей конкурентоспособности в пользу отечественной продукции (рис. 3).

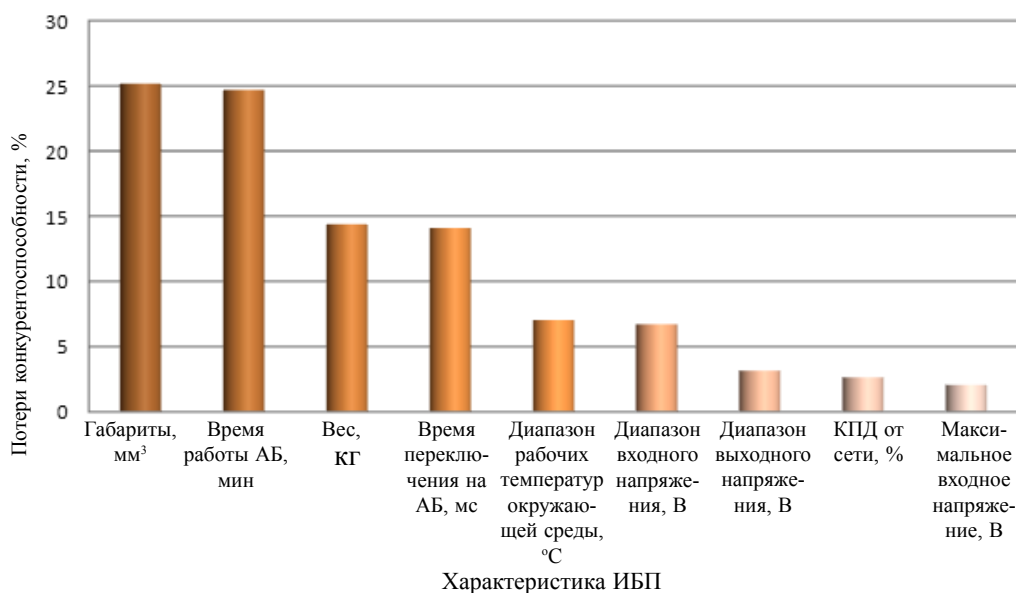


Рис. 2. Значимость потерь конкурентоспособности для ИБП СБП XX 230-50-1/1

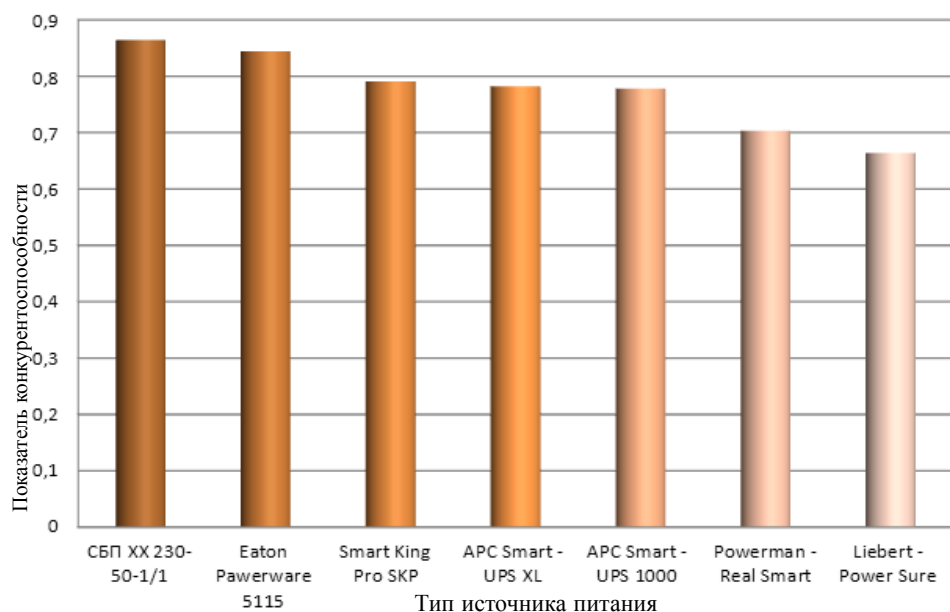


Рис. 3. Прогнозная оценка конкурентоспособности продукции по результатам анализа

Таким образом, в результате проведенного анализа были выявлены характеристики ИБП отечественного производителя, улучшение которых обеспечит повышение конкурентоспособности продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Панфилова, О. С.** Анализ состоятельности комплексных показателей качества объектов / О. С. Панфилова // Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества : труды IX Международной научной конференции. – Москва, 2010. – С. 144–146.
2. **Грин М., Камерон, Э.** Управление изменениями / М. Грин, Э. Камерон ; пер. с англ. – Москва : Добрая книга, 2006. – 360 с.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Панфилов Степан Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), panphilovsa@gmail.com

Фомин Юрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), panphilovsa@gmail.com

Панфилова Ольга Степановна, кандидат экономических наук, преподаватель Саранского государственного промышленно-экономического колледжа (г. Саранск, Россия), panphilovsa@gmail.com

Каликанов Валерий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), panphilovsa@gmail.com

Для цитирования: Панфилов, С. А. Анализ характеристик источников питания / С. А. Панфилов [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 107–112.

REFERENCES

1. Panfilova O. S. Analiz sostojatel'nosti kompleksnyh pokazatelej kachestva ob'ektov [Solvency analysis of complex indices of quality objects «Application of multivariate statistical analysis in economics and quality assessment»]. *Primenenie mnogomernogo statisticheskogo analiza v jekonomike i ocenke kachestva : tr. IX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* – Proceedings of the IX International Scientific Conference. Moscow, 2010, pp. 144 – 146.
2. Green M., Cameron E. Upravlenie izmenenijami [Change Management]. Moscow, Good Book, 2006, 360 p.

About the authors:

Panfilov Stepan Aleksandrovich, head of Theoretical and General Electrical Engineering chair of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Doktor Nauk degree holder in Engineering sciences, professor, panphilovsa@gmail.com

Fomin Jurij Andreevich, associate professor (docent) of Theoretical and General Electrical Engineering chair of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Engineering sciences, docent, panphilovsa@gmail.com

Panfilova Ol'ga Stepanovna, lecturer of Saransk State Industrial and Economic College (Saransk, Russia), panphilovsa@gmail.com

Kalikanov Valerij Mihajlovich, associate professor (docent) of Theoretical and General Electrical Engineering chair of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Engineering sciences, docent, panphilovsa@gmail.com

For citation: Panfilov S. A., Kalikanov V. M., Fomin Ju. A., Panfilova O. S. Analiz harakteristik istochnikov pitaniya [Power sources analysis]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 107 – 112.

УСТРОЙСТВО ВВОДА ИНФОРМАЦИИ В ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

Т. А. Попов, В. В. Родин

В статье рассматривается устройство ввода аналоговой информации в персональный компьютер; приводится блок-схема программы микроконтроллера для преобразования данных; описывается принципиальная электрическая схема устройства ввода информации.

Ключевые слова: устройство, информация, компьютер, схема, преобразование.

INPUT DEVICES FOR PERSONAL COMPUTERS

T. A. Popov, V. V. Rodin

We consider an input analog data into a personal computer. Block diagram of the program the microcontroller to convert the data is provided. A circuit diagram of input devices is described.

Keywords: device, information, computer, scheme, conversion.

Ввод аналоговой информации в персональный компьютер на сегодняшний день является актуальной проблемой. Решение этой задачи осуществляется специализированными платами сбора информации, подключаемыми к портам расширения компьютера [2, с. 10]. Они используются совместно с программными комплексами, созданными на высокоуровневых объектно-ориентированных языках [5, с. 67].

В качестве устройства ввода данных предлагается использовать канал преобразования аналоговой информации в цифровой код на основе микроконтроллера (МК) ATmega16 фирмы Atmel [1, с. 15]. Он имеет встроенный АЦП последовательного приближения, дифференциальный усилитель с программно выбираемым коэффициентом усиления, универсальный синхронный и асинхронный приемопередатчик (УСАПП). Входы АЦП могут объединяться попарно для формирования каналов передачи информации. Имеется возможность предварительного усиления аналогового

сигнала. В качестве источника опорного напряжения АЦП используется напряжение питания МК или внутренний (внешний) источник опорного напряжения. На входе АЦП установлен 8-канальный аналоговый мультиплексор.

Работа АЦП МК определяется заданием битов регистров ADCSRA, SFIOR и ADMUX. Для включения АЦП логическая 1 записывается в бит ADEN регистра ADCSRA, а для выключения – в бит, соответственно, записывается логический 0. Запуск каждого преобразования в режиме одиночного преобразования, а также запуск первого преобразования в режиме непрерывного преобразования осуществляется установкой логической 1 в бит ADSC регистра ADCSRA. Запуск преобразования по прерыванию осуществляется установкой 1 в флаге необходимого прерывания. При этом бит ADSC регистра ADCSRA аппаратно устанавливается в 1. Запуск преобразования в этих режимах может быть также осуществлен установкой логической 1 в бит ADSC регистра ADCSRA.

В режимах одиночного и непрерывного преобразований цикл обработки аналогового сигнала начинается по первому фронту тактового сигнала после установки бита ADSC. При использовании запуска по прерыванию цикл преобразования начинается по первому фронту тактового сигнала после установки соответствующего флага прерывания. В момент его установки происходит сброс предделителя модуля АЦП, обеспечивая фиксированную задержку между генерацией запроса на прерывание и началом цикла преобразования. Преобразование запускается при установке необходимого флага, даже если прерывание запрещено. Длительность цикла преобразования составляют 13 тактов при использовании несимметричного входа и 14 тактов – при дифференциальном входе (определяется работой схемы синхронизации). Выборка и запоминание аналогового сигнала осуществляются за 1,5 и 2,5 такта соответственно. После окончания преобразования бит ADSC сбрасывается в 0 (при одиночном преобразовании). Полученный цифровой код сохраняется в регистре данных АЦП, который физически состоит из двух регистров ввода/вывода ADCH:ADCL. После включения МК в них содержится нулевое значение. Результат преобразования может доопределяться выравниванием вправо (старшим 6 битам регистра ADCH присваиваются нулевые значения) или влево (младшим 6 битам регистра ADCL присваиваются нулевые значения). Управление выравниванием результата преобразования осуществляет бит ADLAR регистра ADMUX. Если он установлен в 1, то результат преобразования выравнивается по левой границе 16-битного слова, если сброшен в 0, то по правой границе. Считывание данных регистров ADCH и ADCL для получения результата преобразования выполняется в определенной последовательности. Первым считывается регистр ADCL, а затем ADCH.

После преобразования устанавливается флаг прерывания ADIF регистра

ADCSR и генерируется запрос на прерывание. Флаг ADIF сбрасывается при запуске подпрограммы обработки прерывания аппаратно от АЦП или программно. Разрешение прерывания осуществляется установкой в логическую единицу бита ADIE регистра ADCSR при установленном флаге I регистра SREG.

В режиме непрерывного преобразования новый цикл начнется после записи результата в регистр АЦП. В режиме одиночного преобразования новое преобразование может быть запущено после сброса бита ADSC. Реально цикл преобразования начинается только через один такт после окончания текущего преобразования.

Величина частоты дискретизации преобразования аналогового определяется с помощью предделителя частоты АЦП, коэффициент деления которого определяется состоянием битов ADPS2, ADPS1, ADPS0 регистра ADCSRA/ADCSR. Наибольшая точность преобразования достигается при тактовой частоте модуля АЦП в диапазоне от 50 Гц до 200 кГц.

Номера выводов МК, подключаемых через мультиплексор к входу АЦП, определяются состоянием битов MUX3, MUX4 регистра ADMUX. Для каналов с дифференциальным входом указанные биты определяют также коэффициент предварительного усиления входного сигнала.

Предварительный усилитель, используемый каналами с дифференциальным входом, имеет встроенную схему коррекции напряжения смещения. Оставшаяся после коррекции величина смещения может быть устранена программно. Для этого входы дифференциального усилителя подключаются к одному и тому же выводу МК. Полученная величина синфазного сигнала вычитается из результата полученных преобразований аналогового сигнала. Ошибка смещения может быть снижена до величины, меньшей 1 младшего значащего разряда АЦП [3, с. 69].

Программа работы МК создана в среде AVR-Studio на языке программи-

рования Assembler. Блок-схема алгоритма программы МК приведена на рис. 1.

После подачи питания на МК происходит его инициализация. Настраиваются стек МК, таблица прерываний, производится предварительная настройка АЦП (определение скорости преобразования, выбор источника опорного напряжения). Затем происходит конфигурирование модуля УСАПП. Выбираются скорость ра-

боты и формат кадра (количество битов данных в кадре, количество стоп-битов, настройка бита четности). Далее в программе реализуется цикл ожидания приема режима работы устройства. В случае получения кода режима регистратора устройство переходит в режим регистратора. В случае получения кода осциллографа выполняется подпрограмма работы устройства в режиме осциллографа.

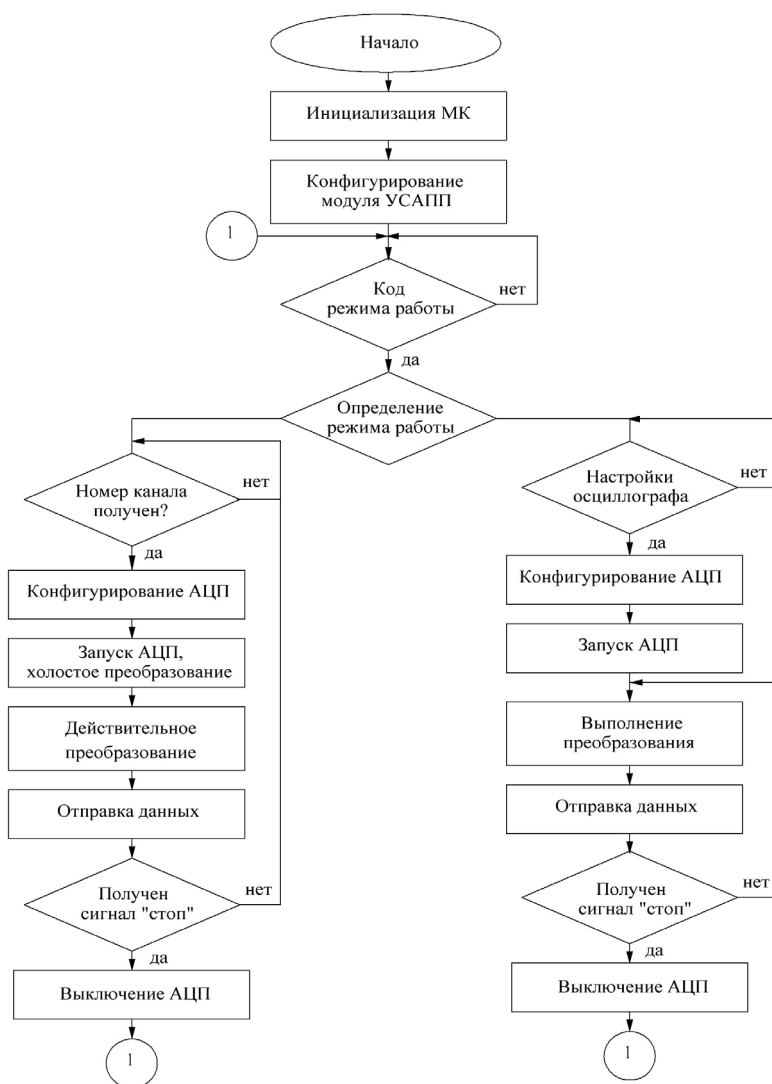


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы МК

Подпрограмма режима регистратора начинается с цикла ожидания приема номера канала, на котором необходимо произвести измерения. После получения номера канала осуществляется конфигурирование АЦП (выбирается режим одиночного преобразования, устанавливается выбранный канал мультимплексора). После завершения конфигурирования АЦП-программа выполняет одно холостое преобразование. Это действие необходимо для повышения точности преобразования. Затем программа выполняет первое корректное преобразование и отправляет данные в персональный компьютер.

Подпрограмма режима осциллографа начинается с цикла ожидания настроек. После получения настроек выполняется конфигурирование АЦП (устанавливаются дифференциальный, или несимметричный, режим, коэффициент усиления предусилителя, номер канала, режим непрерывного преобразования). Далее программа запускает АЦП, отправляет данные в ПЭВМ и осуществляет проверку сигнала «стоп», в случае получения последнего программа переведет устройство в режим ожидания следующей операции. Если сигнал «стоп» не принят, то цикл измерения и отправки данных повторяется.

На рис. 2 представлена принципиальная электрическая схема устройства ввода аналоговой информации [4, с. 434]. Основой предлагаемого устройства служит МК ATmega16 со встроенным АЦП и интерфейсом УСАПП. Питание МК осуществляется от стабилизатора напряжения на микросхеме DA1 (KP142EH5A). Она формируется напряжением 5 В, которое используется для питания всех элементов схемы и в качестве опорного напряжения АЦП. Конденсаторы C1, C2, C3 и C5 используются для лучшей стабилизации напряжения питания.

Тактовая частота МК задается конденсаторами C6, C7 и кварцевым резонатором Z1 номиналом 12 МГц. Емкость C6 и C7 должна составлять от 12 до 22 пФ в соответствии с описанием МК. Частота кварцевого резонатора обеспечивает высокую производительность МК и скорость передачи данных 115 200 бит/с с минимальным количеством ошибок.

Данные на персональный компьютер передаются по интерфейсу RS232. Интерфейс RS232 использует диапазон напряжения от -12 до +12 В. Логическому нулю соответствует диапазон напряжений от +3 до +12 В, логической единице – от -3 до -12 В. Интерфейс УСАПП МК использует уровни напряжения ТТЛ, где логическому нулю соответствует диапазон напряжений от 0,0 до +0,4 В, а логической единице – от +2,4 до +5,0 В. Преобразователь уровней RS232-ТТЛ реализован на транзисторах VT1-KT3107, VT2-KT3102, резисторах R1-R4 номиналом 4,7 кОм, диодах VD1, VD2 – 1N4148 и конденсаторе C4 номиналом 10 мкФ.

Выводы МК MOSI, MISO, SCK и RESET используются для записи в контроллер микропрограммы. Код микропрограммы может быть изменен без отключения МК от схемы.

Устройство может измерять напряжение в диапазоне от 0 до 5 В с частотой в диапазоне от 25 до 2000 Гц. Погрешность измерения напряжения не превышает 2,0 %, погрешность измерения частоты не превышает 0,1 %, в диапазоне температур от 0 до 40 °С. В режиме регистратора реализована возможность измерять одновременно до 8 сигналов. Минимальный интервал измерений в режиме регистратора составляет 1 с. Исследуемый сигнал подключается к одному из выводов МК ADC0-ADC7. Питание схемы осуществляется от любого источника постоянного тока с напряжением от 7 до 15 В и мощностью не менее 1 Вт.

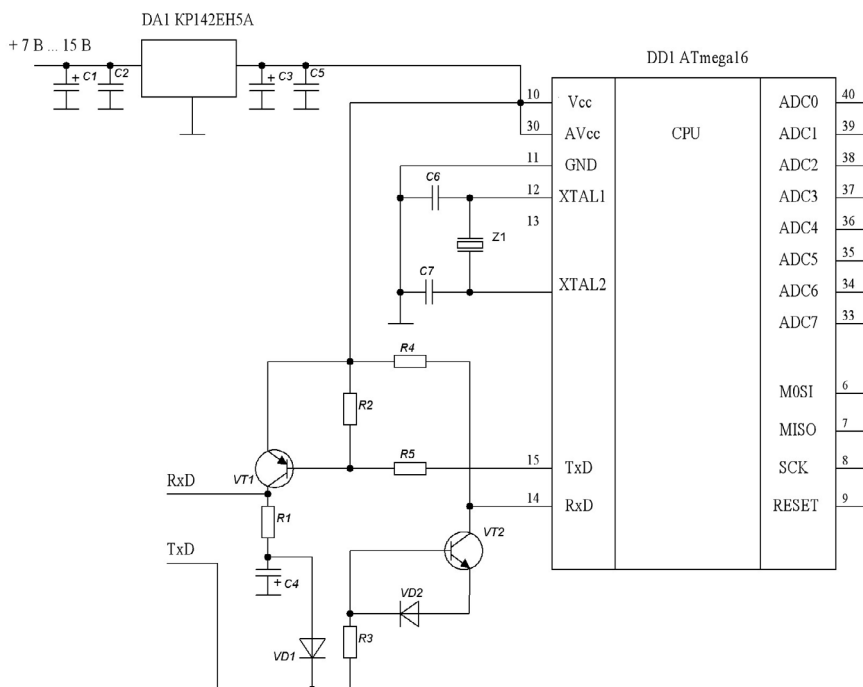


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема

Разработанное устройство предполагается использовать в учебном процессе, а также при проведении многоканальных точных измерений в заводских и лабораторных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстифеев, А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega : Руководство пользователя / А. В. Евстифеев. – Москва : Додэка -XXI, 2007. – 587 с.
2. Пей, Ан. Сопряжение ПК с внешними устройствами / Ан Пей. – Москва : ДМК-Пресс, 2001. – 320 с.
3. Попов, Т. А. Устройство ввода аналоговой информации в ПЭВМ / Т. А. Попов, В. В. Родин // Учебный эксперимент в высшей школе. – 2009. – № 1. – С. 67–76.
4. Попов, Т. А. Устройство ввода информации в ПЭВМ / Т. А. Попов, В. В. Родин // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции в рамках II Всероссийского светотехнического форума с международным участием (г. Саранск, 3–4 дек. 2013 г.). – Саранск : Афанасьев В. С., 2013. – С. 433–435.
5. Родин, В. В. Канал ввода информации в ПЭВМ / В. В. Родин, О. Б. Шекера, В. Н. Ширчков // Учебный эксперимент в высшей школе. – 2005. – № 1. – С. 66–73.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Попов Тимофей Андреевич, инженер, Администрация Главы Республики Мордовия (г. Саранск, Россия), popovta@yandex.ru

Родин Вячеслав Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), clava30@rambler.ru

Для цитирования: Попов, Т. А. Устройство ввода информации в персональный компьютер / Т. А. Попов, В. В. Родин // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 113–118.

REFERENCES

1. Evstifeev A. V. Mikrokontrollery AVR semejstva Mega. Rukovodstvo pol'zovatelja [AVR microcontrollers, Mega family. User Guide]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2007, 587 p.
2. An Pei. Sopryazhenie PK s vneshnimi ustroystvami [PC interfacing with external devices]. Moscow, DMK Press Publ., 2001, 320 p.
3. Popov T. A., Rodin V. V. Ustrojstvo vvoda analogovoj informacii v PZVM [Analog information input device for PC]. *Uchebnyj jeksperiment v vysshej shkole* – Educational experiment in higher education. 2009, no. 1, pp. 67 – 76.
4. Popov T. A., Rodin V. V. Ustrojstvo vvoda informacii v PJeVM [Input device information to PC]. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoj svetotekhniki, jelectrotehniki i jenergetiki: sb. nauch. tr. XI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. v ramkah II Vserossijskogo svetotekhnicheskogo foruma s mezhdunar. uchastiem (g. Saransk, 3-4 dekabrya 2013 g.)* – Problems and prospects of development of domestic lighting, electrical engineering and energy: Proceedings of XI International Conference under the II All-Russian lighting forum with international participation (Saransk, December 3-4, 2013), Saransk, 2013, pp. 433 – 435.
5. Rodin V. V., Shekera O. B., Shirkov V. N. Kanal vvoda informacii v PJeVM [Information input channel for PC]. *Uchebnyj jeksperiment v vysshej shkole* – Educational experiment in higher education. 2005, no. 1, pp. 66 – 73.

About the authors:

Popov Timofej Andreevich, engineer of Head of Mordovian Republic Administration (Saransk, Russia), popovta@yandex.ru

Rodin Vyacheslav Viktorovich, associate professor (docent), chair of Methodology, Standardization and Certification of Light Engineering Department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, clava30@rambler.ru

For citation: Popov T. A., Rodin V. V. Ustrojstvo vvoda informacii v personal'nyj komp'yuter [Input devices for personal computers]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 113 – 118.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ИНВЕРТОРОВ С БЕЗЫНЕРЦИОННЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ОПОРНЫХ СИНУСОИД

В. Г. Щукин

В статье рассматривается параллельная работа инверторов с безынерционным формированием опорных синусоид по общей шине нагрузки; описываются принцип синхронизации, общий алгоритм системы управления инвертора, диаграммы токов и напряжений на элементах схемы и нагрузке, полученные при моделировании.

Ключевые слова: инвертор, параллельная работа инверторов, синхронизация, алгоритм, система бесперебойного питания.

PARALLEL OPERATION OF INVERTORS WITH INERTIA-FREE FORMATION OF REFERENCE SINEWAVES

V. G. Shchukin

Inverters parallel operation with inertia-free forming of reference sinewaves on common load-bus is considered in this article. The research includes description of synchronization principle, general inverter control algorithm, curves of currents and voltages existing on scheme components and power consumers which were read during simulation.

Keywords: inverter, inverters parallel operation, synchronization, algorithm, uninterruptable power system.

Основные тенденции развития систем бесперебойного питания (СБП) в настоящее время заключаются в увеличении надежности и отказоустойчивости, а также снижении затрат на их разработку и производство. Одним из способов достижения этих целей является организация модульной архитектуры системы. Данная архитектура, с одной стороны, позволяет исключить работу источника бесперебойного питания (ИБП) избыточной мощности на малую нагрузку, организовать любую схему резервирования по любому из принципов обеспечения резерва, с другой – позволяет существенно снизить затраты на разработку и производство ИБП, так как пропадает необходимость разработки устройств широкого диапазона мощностей. При этом необходимая мощность достигается

за счет параллельного соединения модулей малой мощности. В модельных рядах зарубежных компаний уже имеются модели ИБП, позволяющие на их базе собирать параллельные СБП (например, модели Powerware 9155, Powerware 9355, BladeUPS компании Eaton, работающие по технологии HotSync) [1; 3]. Независимо от применяемого принципа построения системы, главной проблемой реализации параллельной модульной структуры является синхронизация параллельно работающих инверторов.

Существующие принципы синхронизации основаны на синфазной синхронизации задающих генераторов инверторов. Наиболее простым способом является прямая импульсная синхронизация, при которой каждый модуль получает синхроимпульс от управляю-

© Щукин В. Г., 2014

шего устройства или ведущего модуля, являясь при этом ведомым модулем. К минусам данного принципа можно отнести наличие шины синхронизации между модулями и наличие ведущего, или управляющего, модуля, так как каждый из этих элементов может являться единой точкой отказа для всей системы.

Следующим методом синхронизации является фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ). При использовании данного принципа возможно обойтись без наличия общей шины синхронизации. Данный метод часто применяется в одномодульных ИБП с двойным прео-

бразованием для синхронизации с входной сетью. Недостатками данного метода являются сравнительно большое время, необходимое для выравнивания фаз модулей, а также постоянное изменение частоты каждого модуля, обусловленное самим принципом синхронизации за счет отрицательной обратной связи. Негативным эффектом от описанных недостатков является возникновение встречных токов инверторов.

Нами предложен новый принцип синхронизации инверторов, основанный на безынерционной жесткой взаимной синхронизации (рис. 1).

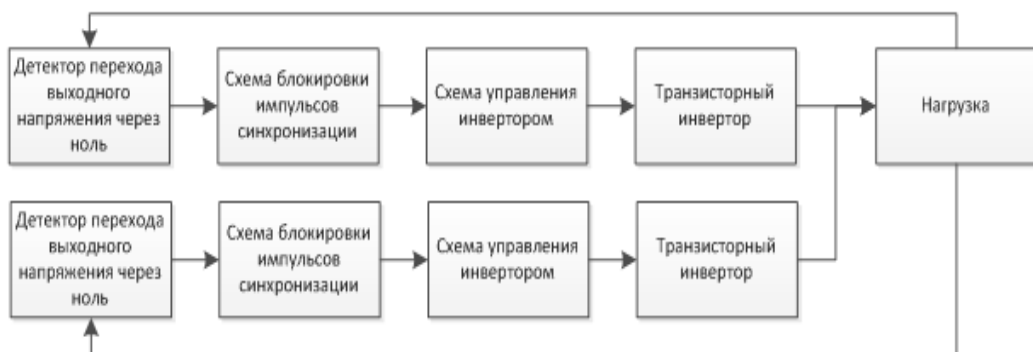


Рис. 1. Функциональная схема системы из двух модулей инверторов, соединенных параллельно

При данном принципе синхронизации отсутствуют выделенная шина синхронизации и разделение на ведущий и ведомый модули. Синхронизация осуществляется от общей шины нагрузки. Этот способ имеет сходство с прямой импульсной синхронизацией, но в качестве синхроимпульса каждым модулем детектируется переход напряжения на нагрузке через ноль. Момент смены полярности выходного напряжения является также стартовым синхроимпульсом одновременно для всех инверторов. При этом каждые 1/2 периода происходят перезапуск задающего генератора инвертора и корректировка частоты каждого модуля. При этом нет необходимости в назначении ведущих и ведомых модулей, так как при этом каждый модуль одновременно

является и ведущим, и ведомым. Опережающий модуль автоматически является ведущим для остальных, так как переход его выходного напряжения через ноль первым формирует общий синхросигнал. При этом возможный «разбег фаз» выходных напряжений модулей обнуляется каждые 10 мс, чем обеспечивается минимальная инерционность синхронизации. Для анализа данного принципа синхронизации проведем моделирование системы, состоящей из двух инверторов, включенных параллельно (рис. 2) [2].

Для понимания особенностей принципа синхронизации рассмотрим упрощенный алгоритм взаимной синхронизации. Алгоритм можно разделить на 3 процедуры: поиск синхросигнала, синхронизация и формирование опорного синуса (рис. 4–6).

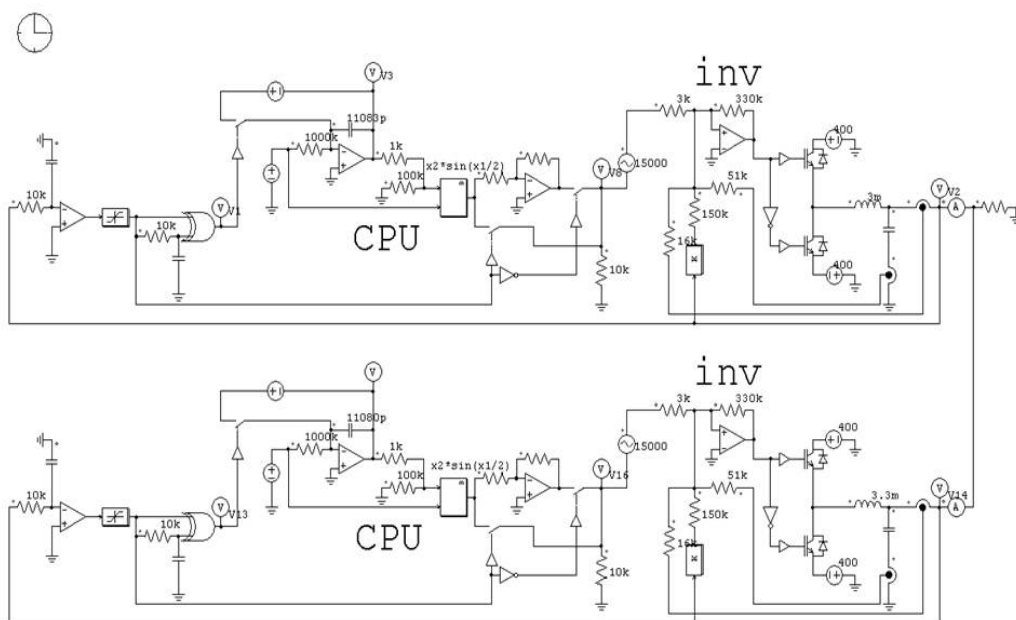


Рис. 2. Модель параллельной работы двух инверторов с безынерционным формированием опорных синусоид

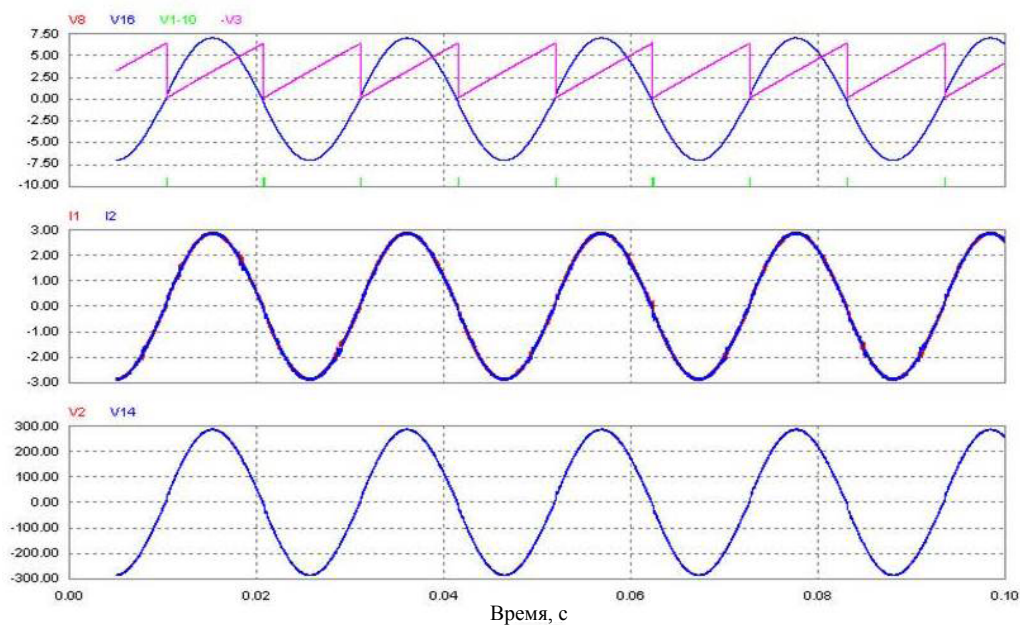


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений, полученных при моделировании

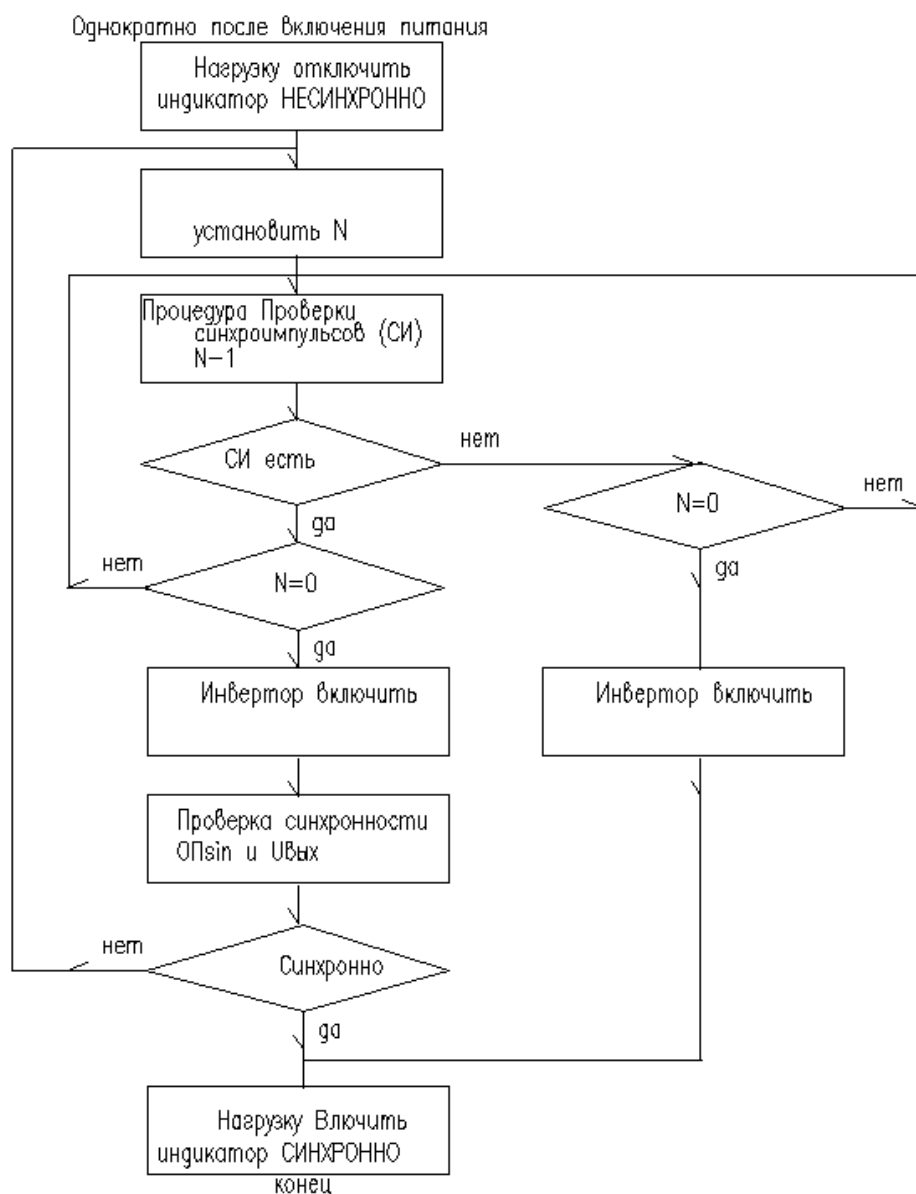


Рис. 4. Процедура поиска синхросигнала

Поиск синхросигнала выполняется однократно, при включении питания. С помощью данной операции определяется, работают ли другие модули, под-

ключенные параллельно, чтобы стартовать синхронно с ними, или же производится запуск при отсутствии напряжения на общей шине нагрузки.

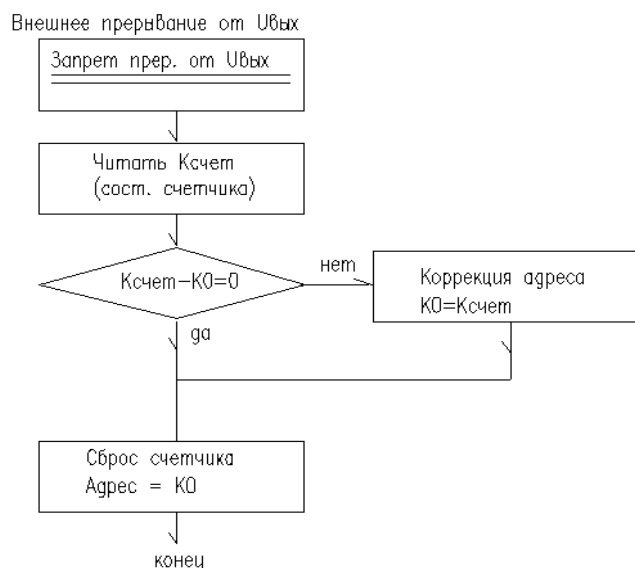


Рис. 5. Процедура синхронизации

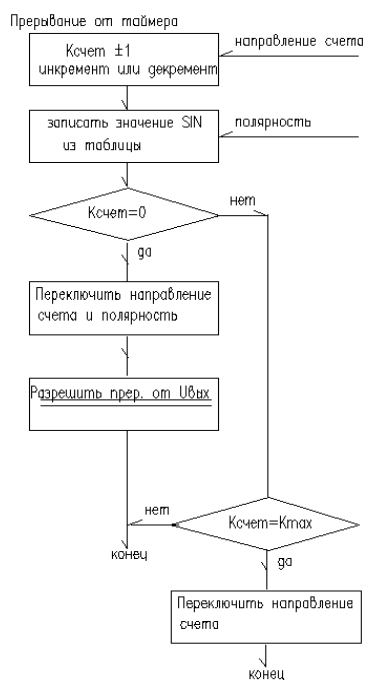


Рис. 6. Процедура формирования опорного синуса

Для исключения влияния помех применяется временная задержка детектирования синхроимпульсов от датчика перехода напряжения через ноль, в качестве которого применяется компаратор. Сразу после получения синхроимпульса блокируется прием последующих импульсов на время, немного меньшее длительности одного полупериода выходного сигнала. Ширина выделенных «временных ворот» в конце полупериода выходного напряжения выбирается из условия максимально возможного разбега фаз за текущий период синхронизации и максимально допустимого фазового скачка напряжения при воздействии возможной помехи. После этого система управления модуля

ожидает перехода напряжения нагрузки через ноль, замеряя время расхождения между выходными сигналами модулей. После возникновения синхроимпульса производится пересчет и корректировка выходной частоты каждого модуля, кроме являющегося на данный момент ведущим, формирование опорного синуса для инвертора и блокировки приема синхроимпульсов. В результате получается система, состоящая из параллельно работающих инверторов, в которой единственной связью между модулями является общая шина нагрузки, при этом в этой системе отсутствуют единые точки отказа, так как она не имеет единых управляющих устройств и шины синхронизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жилкина, Н. Резервы для защиты ответственных приложений / Н. Жилкина // Журнал сетевых решений/ LAN. – 2002. – № 10.
2. URL: <http://powersimtech.com> (дата обращения 02.10.2013).
3. URL: <http://powerquality.eaton.ru/Russia/Technology-Applications/Technology-Leadership/RU-ups-paralleling.asp> (дата обращения 02.10.2013).

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторе:

Щукин Владимир Геннадьевич, аспирант ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), Shch.vg@gmail.com

Для цитирования: Щукин, В. Г. Параллельная работа инверторов с безынерционным формированием опорных синусоид / В. Г. Щукин, Ю. С. Игольников // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 119–124.

REFERENCES

1. Zhilkina N. Rezervy dlja zashhity otvetstvennyh prilozhenij [Backup for critical applications protection]. *Zhurnal setevyh reshenij LAN* [Zhurnal setevih resheniy LAN] 2002, no. 10.
2. Powering Your Design. Powersim. Available at: <http://powersimtech.com/>
3. Obedinenie IBP v parallel' s pomoshh'ju tehnologii Hot Sync® [UPS parallel combination using Hot Sync® technology]. Available at: <http://powerquality.eaton.ru/Russia/Technology-Applications/Technology-Leadership/RU-ups-paralleling.asp>

About the author:

Shchukin Vladimir Gennad'evich, post-graduate student of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), shch.vg@gmail.com

For citation: Shchukin V. G., Igonnikov Yu. S. Parallel'naja rabota invertorov s bezynercionnym formirovaniem opornyh sinusoid [Parallel operation of inverters with inertia-free forming of reference sinewaves]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 119 – 124.

РАЗВИТИЕ СХЕМОТЕХНИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ КОЛЬЦЕВОЙ СХЕМЫ

Ю. С. Игольников, А. А. Курганов

В статье рассматривается развитие схемотехники выпрямителей на базе новой кольцевой схемы с уравнительным реактором, обеспечивающей как 6-пульсный, так и 12-пульсный режимы выпрямления; приводятся результаты моделирования и экспериментальной проверки этих схем.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, уравнительный реактор, вентиль, моделирование, напряжение, ток.

CIRCUITRY RECTIFIERS DEVELOPMENT BASED ON CIRCULAR PATTERNS

Yu. S. Igo'nikov, A. A. Kurganov

This paper considers the development of circuitry rectifiers based on the new ring circuit with smoothing reactor providing both six-pulse and twelve-pulse modes of rectification. The results of modeling and experimental validation of these schemes are presented.

Keywords: three-phase transformer, current-balancing reactor, gate, modelling, voltage, current.

В выпрямительной технике широко известна кольцевая схема [3], позволяющая получить длительность протекания тока через вентиль в течение 60 эл. град. при амплитуде тока, равной току нагрузки. Однако такая форма тока вентиля не является оптимальной из-за коэффициента формы. На основе этой схемы впервые была создана 6-фазная кольцевая схема с уравнительным реактором (УР) [2; 1] (рис. 1). Ее достоинством является протекание тока через вентиль в течение 120 эл. град. при амплитуде тока, равной половине тока нагрузки.

Согласно рис. 1, кольцевая схема с УР содержит следующее: 3-фазный силовой трансформатор с двумя вторичными обмотками, каждая из которых соединена в звезду; шесть вентилях, соединенных в замкнутое кольцо так, что каждая фаза одной вторичной обмотки через вентили связана с разноименными фазами второй вторичной обмотки; УР, выполненный

в виде трех обмоток со средней точкой, расположенных на одном магнитопроводе (средняя точка каждой обмотки реактора подключена к одной из фазных обмоток одной группы вторичных обмоток трансформатора, а сама обмотка реактора последовательно соединена с одноименными электродами двух вентилях, через которые указанная фазная обмотка соединена с разноименными фазами второй вторичной обмотки. Обмотки реактора соединены между собой через вентили по схеме треугольника).

Формирование напряжения u_d на нагрузке R_d-L_d осуществляется на основе очередного выравнивания с помощью УР двух анодных ЭДС одной и другой звезд. Данная схема была промоделирована в программе P-SIM [4] в неуправляемом и управляемом режимах и проверена экспериментально. Результаты моделирования приведены на рис. 2, осциллограммы ее экспериментальной проверки – на рис. 3.

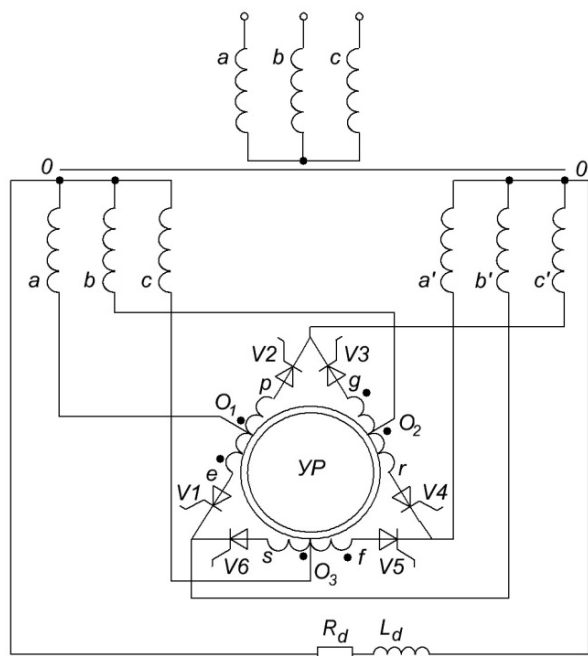
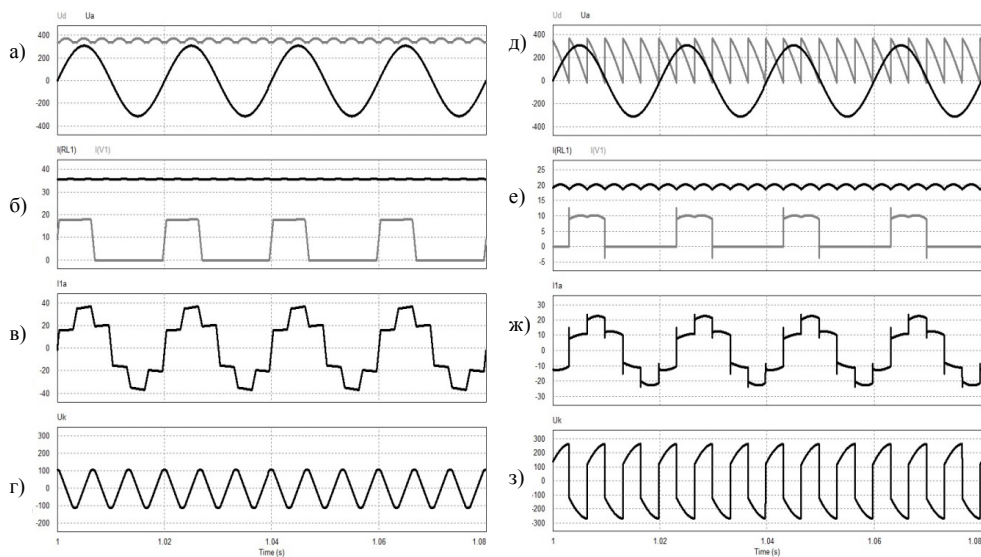


Рис. 1. Кольцевая схема с УР



а) u_d – напряжение на нагрузке при $\alpha=0$, u_a – фазное напряжение вторичной обмотки при $\alpha=0$; б) i_{RL1} – ток нагрузки при $\alpha=0$, i_{V1} – ток вентиля при $\alpha=0$; в) i_{1a} – ток первичной обмотки при $\alpha=0$; г) u_k – напряжение обмотки реактора при $\alpha=0$; д) u_d – напряжение на нагрузке при $\alpha=60$, u_a – фазное напряжение вторичной обмотки при $\alpha=60$; е) i_{RL1} – ток нагрузки при $\alpha=60$, i_{V1} – ток вентиля при $\alpha=60$; ж) i_{1a} – ток первичной обмотки при $\alpha=60$; з) u_k – напряжение обмотки реактора при $\alpha=60$

Рис. 2. Диаграммы токов и напряжений на элементах схемы, полученные при моделировании

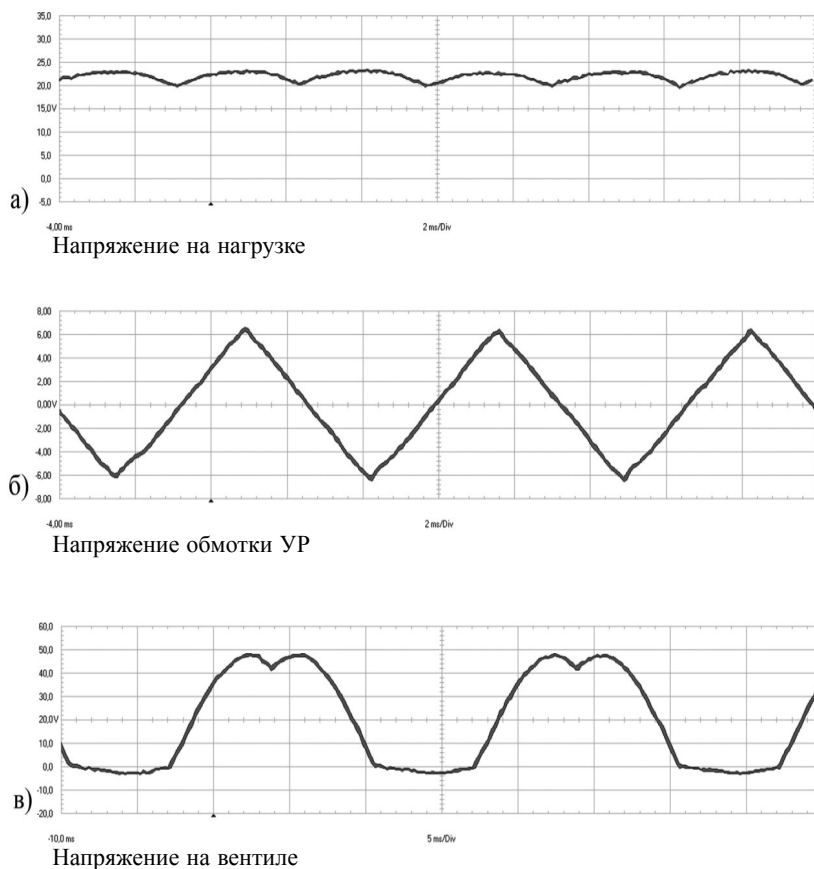


Рис. 3. Диаграммы токов и напряжений на элементах схемы, полученные при экспериментальной проверке $\alpha=0$

Как моделирование, так и экспериментальная проверка подтвердили работоспособность схемы в соответствии с теоретическим анализом. Дальнейшим развитием кольцевой схемы с УР стало создание 12-пульсной схемы (рис. 4).

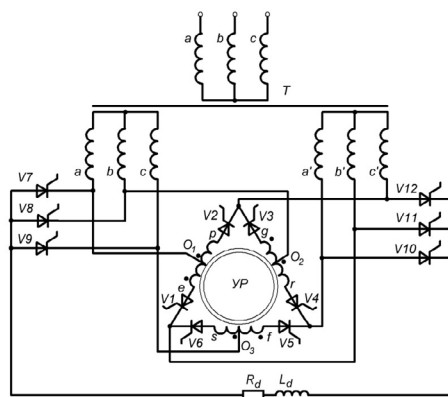
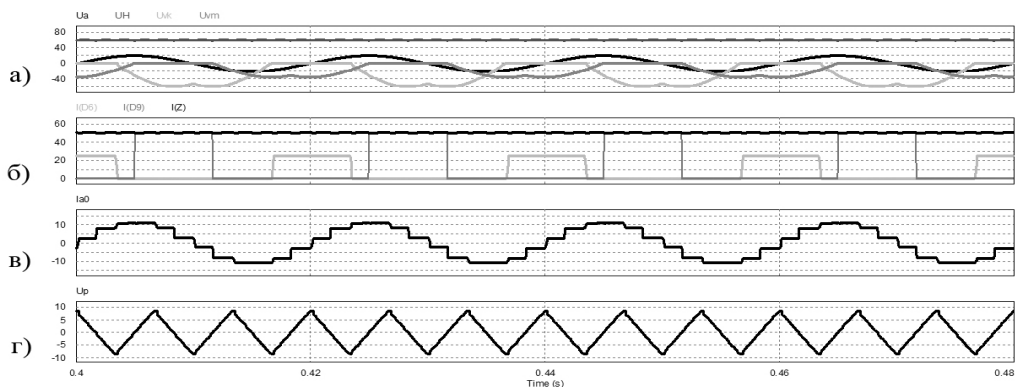


Рис. 4. 12-пульсная схема с УР

Эта схема была промоделирована в программе P-SIM и проверена экспериментально. Диаграммы напряжений и

токов, полученные в результате моделирования и экспериментальной проверки на макете, приведены, на рис. 5–6.



а) u_a – фазное напряжение вторичной обмотки, u_H – напряжение на нагрузке, u_{vk} – напряжение на кольцевой группе вентилей, u_{vm} – напряжение на мостовой группе вентилей; б) i_{D6} – ток вентиля кольцевой группы, i_{D9} – ток вентиля мостовой группы, i_Z – ток нагрузки; в) i_{a0} – ток первичной обмотки трансформатора; г) u_p – напряжение обмотки уравнивающего реактора

Рис. 5. Диаграммы токов и напряжений на элементах 12-пульсной схемы, полученные при моделировании.

Экспериментальная проверка схемы проводилась на макете, состоявшем из силового 3-фазного трансформатора с двумя вторичными обмотками габаритной мощностью 3 кВА, трех блоков вентилей, соединенных согласно схеме (см. рис. 4), УР и нагрузки из реостата и дросселя. Питание первичных обмоток осуществлялось от лабораторной 3-фазной сети 220В, фазное напряжение вторичных обмоток составляло 24В. Транс-

форматор и реактор были изготовлены из магнитопроводов.

Диаграммы напряжений, полученные в результате эксперимента, полностью подтвердили результаты теоретического анализа и моделирования.

Напряжение на нагрузке (см. рис. 6) формировалось путем сложения двух фазных напряжений одной звезды с фазным напряжением другой звезды и напряжением обмоток УР.

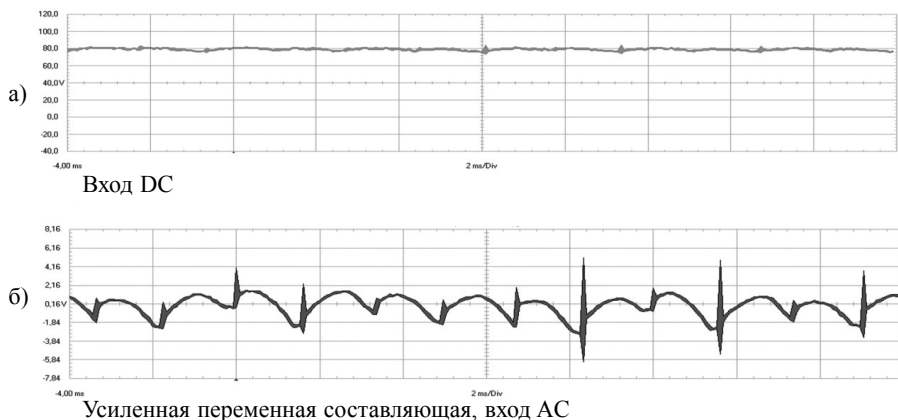


Рис. 6. Диаграммы выпрямленного напряжения на нагрузке

Согласно диаграмме спектра выпрямленного напряжения (рис. 7), в выпрямленном напряжении при преобладающей двенадцатикратной частоте

пульсаций содержатся и другие частоты, что обусловлено некоторой асимметрией вторичных фазных напряжений в трансформаторе.

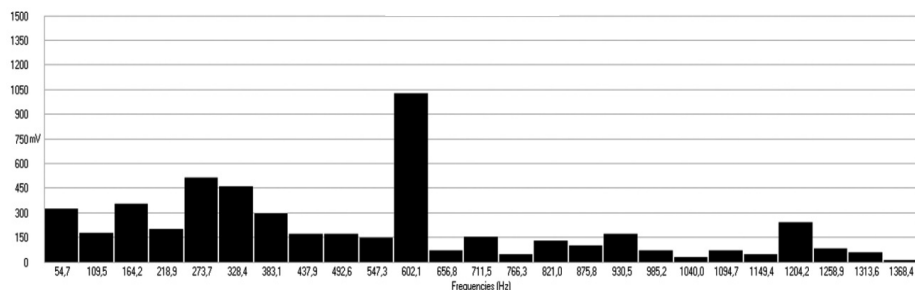


Рис. 7. Диаграмма спектра выпрямленного напряжения на нагрузке 12-пульсного выпрямителя

Двенадцатикратная частота пульсаций получалась путем сложения напряжений мостовой и кольцевой схем с УР, сдвинутыми на 30 эл. град. за счет работы УР. При увеличении тока нагрузки выходное напряжение выравнивалось, что объ-

ясняется лучшей работой УР. При этом напряжение на УР имело вид, представленный на рис. 8. В ходе эксперимента были выявлены также некоторые особенности в работе реактора, обусловленные коммутацией вентильных элементов.

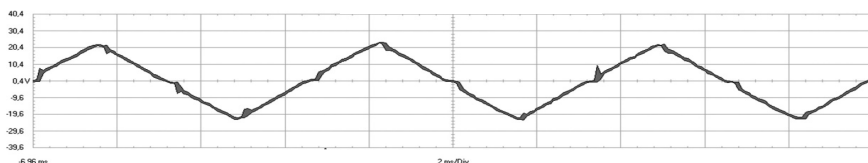


Рис. 8. Диаграммы напряжения на полуобмотке УР

Из диаграмм напряжения на вентильях разных групп (рис. 9) следует, что все вентили проводят ток в течение 120 эл. град. и начало проводимости разных групп вентилях смеще-

но на 30 эл. град. При этом величина обратного напряжения вентилях моста и кольца отличается в 2 раза, но не превышает величины выпрямленного напряжения на нагрузке.

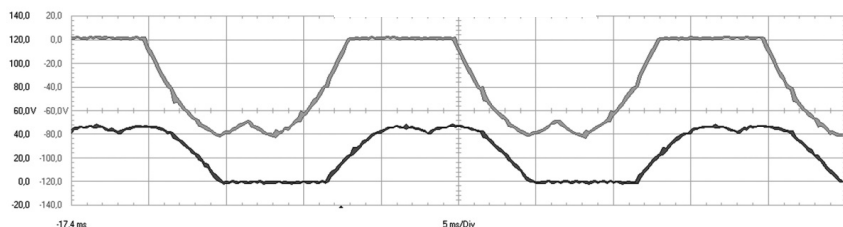


Рис. 9. Диаграммы напряжений на вентильях разных групп

Проверялась также работа схемы с двумя нагрузками (см. рис. 4): одна из них подключалась на выход 12-пульсной схемы, другая – к нулевым точкам звезд, что показало возможность подключения двух нагрузок без их влияния друг на друга.

Таким образом, основные параметры схемы полностью соответствуют моделям и расчетным данным. Это схемотехническое решение имеет ряд

преимуществ по сравнению с классическими схемами (два моста, соединенных последовательно), используемыми в таких преобразователях, как В-ТПЕД и В-ТППТ и предназначенными для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог фирмы «ESTEL» (г. Таллин). Моделирование и экспериментальная проверка подтвердили работоспособность схемы и обеспечение требуемых параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Игольников, Ю. С.** Кольцевая схема выпрямителя с уравнительным реактором / Ю. С. Игольников, А. А. Курганов // *Электротехника*. – 2013. – № 5.
2. Патент 2325025 Российская Федерация, МПК H02M7/06. Преобразователь трехфазного переменного напряжения в постоянное / Ю. С. Игольников ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т. 2007110012/09 ; заявл. 19.03.2007 ; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14.
3. Патент 265254 СССР, МПК H 02 m. Трехфазный выпрямитель / Ю. И. Горлов ; заявитель и патентообладатель Гос. ордена Труд. Крас. Знамени завод «Электрик» ; №1057256/24-7; заявл. 14.02.1966 ; опубл. 09.03.1970, Бюл. № 10.
4. PSIM User Manual/ Canada: Powersim Technologies Inc., 1999.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Игольников Юрий Соломонович, кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (Саранск, Россия), I.US@mail.ru

Курганов Андрей Александрович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (Саранск, Россия), Neiml@mail.ru

Для цитирования: Игольников, Ю. С. Развитие схемотехники выпрямителей на базе кольцевой схемы / Ю. С. Игольников, А. А. Курганов // *Вестник Мордовского университета*. – 2014. – №1. – С. 125–131.

REFERENCES

1. Igolnikov Yu. S., Kurganov A. A. Kol'cevaja shema vyprjamitelja s uravnitel'nym reaktorom [Ring circuit rectifier smoothing reactor]. *Jelektrotehnika* – Electrical Engineering. 2013, no. 5.
2. Igolnikov Yu. S., patent 2325025, Rossiyskaya Federazija, MPC H02M7/06 Preobrazovatel trehfaznogo peremennogo naprazynheniya v postoyannoye [Patent 2325025, Russia, MPC H02M7/06, Three-phase inverter AC to DC], applicant and patentee – muzzle. Red. Univ. 2007110012/09, claimed 19.03.2007, published 20.05.2008, Bul. no. 14.
3. Gorlov Yu. I., patent 265254 SSSR, MPC H02m Trehfaznii vipryamitel [Patent 265254, Russia, MPC H02m Three-phase rectifier], no. 1057256/24-7, claimed 14.02. 1966, published 09.03.1970, Bul. no. 10.
4. PSIM User Manual. Canada, Powersim Technologies Inc. Publ., 1999.

About the authors:

Igol'nikov Yuriy Solomonovich, associate professor (docent) of Power Electronics, Automation, Protection and Diagnostic System chair of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, I.US@mail.ru

Kurganov Andrey Alexandrovich, postgraduate student of Light Engineering department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Neiml@mail.ru

For citation: Igol'nikov Ju. S., Kurganov A. A. Razvitie shemotehniki vyprjamitelej na baze kol'cevoj shemy [Circuitry rectifiers development based on circular patterns]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 125 – 131.

УДК 519.8

ЗАДАЧА ОТСЕЧЕНИЯ И ПРОИЗВОЛЬНОЕ ВЫПУКЛОЕ ОКНО

А. Г. Смольянов, Е. Г. Смольянова

В статье предлагается подход к решению задачи отсечения в случае плоского выпуклого окна. Подход основан на определенной классификации вершин произвольной плоской фигуры относительно выпуклого окна. Такая классификация позволяет во многих случаях избежать ненужных вычислений, связанных, в частности, с определением координат точек пересечения сторон произвольной фигуры со сторонами выпуклого окна.

Ключевые слова: задача отсечения, выпуклое окно, компьютерная программа.

CLIPPING PROBLEM AND PLANAR CONVEX POLYGON

A. G. Smol'yanov, E. G. Smol'yanova

The paper provides the clipping algorithm for planar convex polygon problem. The algorithm is based on the classification of the vertices of an arbitrary planar figure relative to a convex polygon. In many cases this classification allows to avoid unnecessary calculations such as calculating of coordinates for points of the intersection of arbitrary figure sides with polygon sides.

Keywords: clipping problem, convex polygon, computer program.

Задача о выпуклом окне известна, и подходы к ее решению упоминаются во многих публикациях [1; 3–5]. Если использовать идею с кодами, которые вычисляются для случая «правильного» четырехугольного окна [2], то задача о выпуклом окне окажется про-

сто обобщением задачи с треугольным окном.

Для определения принадлежности некоторой точки (x_0, y_0) внутренней области треугольника с вершинами $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ и $C(x_3, y_3)$ воспользуемся следующим кодом:

```
function Znak(xx1,yy1,xx2,yy2,x,y: real): integer;
var f: real;
begin
  f:=(yy2-yy1)*x+(xx1-xx2)*y+(xx2*yy1-xx1*yy2);
  if abs(f) < 1e-6 then Znak := 0
  else if f < 0 then Znak := -1 else Znak := 1
end;
```

© Смольянов А. Г., Смольянова Е. Г., 2014

Построим код для некоторой точки относительно заданного треугольника (m=3):

```
function KOD (x0,y0: real) : string;
var i : integer;
    v : string;
begin
    v := '';
    for i := 1 to m-1 do
        case Znak (fig [i]. x, fig [i]. y, fig [i+1]. x, fig [i+1]. y, x0, y0) of
            -1: v := v+'-';
            0: v := v+'0';
            1: v := v+'+';
        end;
        case Znak (fig [1]. x, fig [1]. y, fig [m]. x, fig [m]. y, x0, y0) of
            -1: v := v+'-';
            0: v := v+'0';
            1: v := v+'+';
        end;
        result := v
    end;
```

Визуализируем некоторую точку (x_0, y_0) на плоскости относительно заданного треугольного окна. Символьное представление кода показано на рис. 1. Обозначим такой код через КОД (x_0, y_0) . Заметим, что на основе этого

кода возможно построение его числового аналога. Полученный код далее можно использовать для определения принадлежности некоторой точки плоскости внутренней области заданного треугольника.

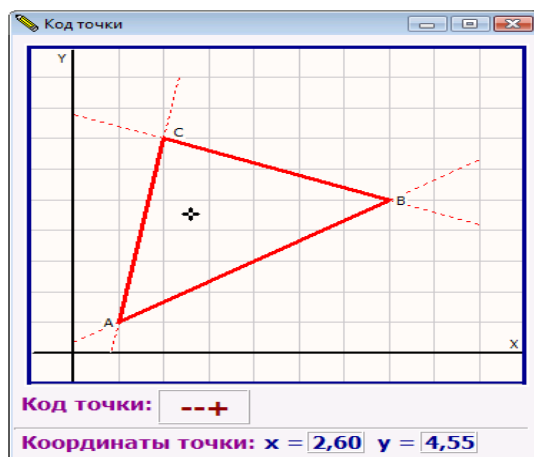


Рис. 1. Символьный код точки

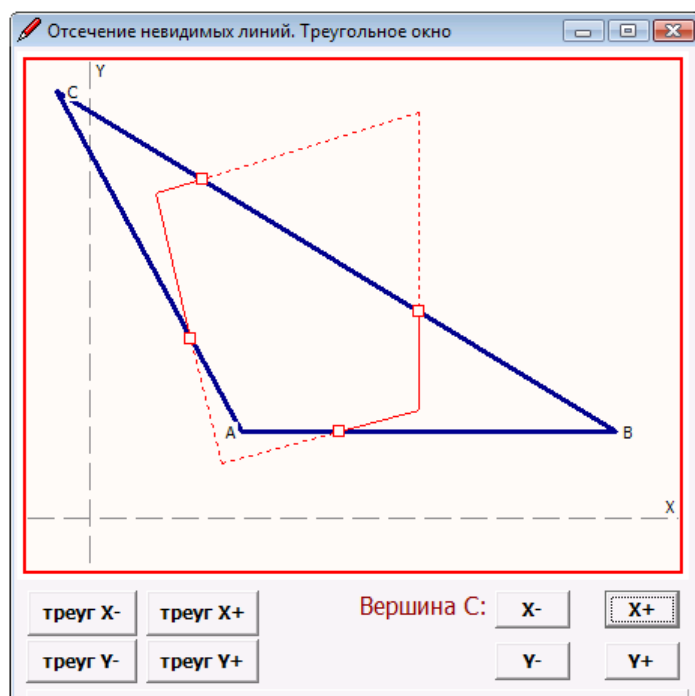


Рис. 2. Результат работы компьютерной программы, треугольное окно

С целью выявления и устранения возможных ошибок в создаваемой программе необходимо проделать следующие действия: вывести только видимые части сторон произвольной

плоской фигуры относительно треугольного окна (рис. 3); вывести только невидимые части сторон произвольной плоской фигуры относительно треугольного окна (рис. 4).

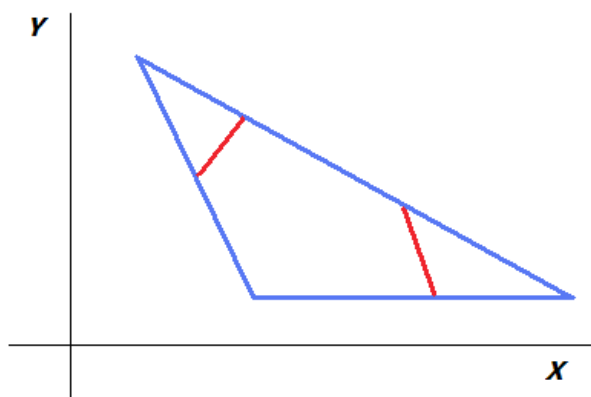


Рис. 3. Отображение видимых линий

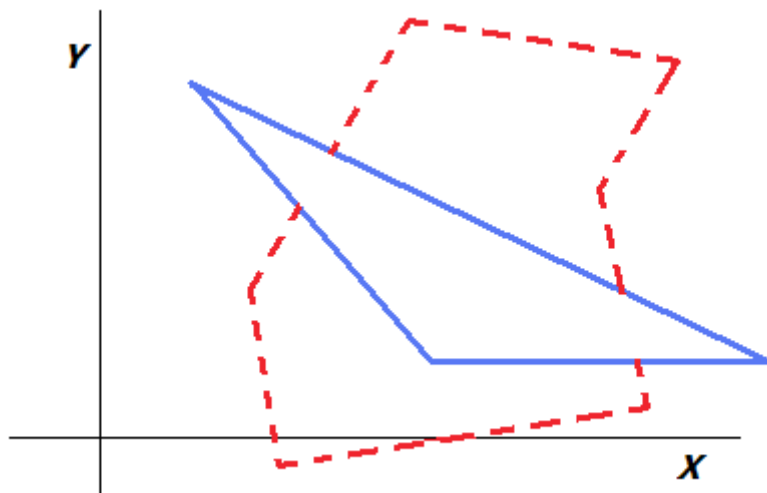


Рис. 4. Отображение невидимых линий

С точки зрения алгоритмизации, в рамках данной задачи нет проблем с переходом от треугольного окна к произвольному выпуклому окну. При рассмотрении произвольного выпуклого окна выделим ряд ситуаций, показанных на рис. 5–8. На первом из них не-

которая вершина выпуклого окна лежит на прямой, образованной одной из сторон $(x_1, y_1)-(x_2, y_2)$ произвольной фигуры. Назовем эти случаи ситуациями «одного нуля». Для их обработки достаточно проанализировать коды $\text{КОД}(x_1, y_1)$ и $\text{КОД}(x_2, y_2)$.

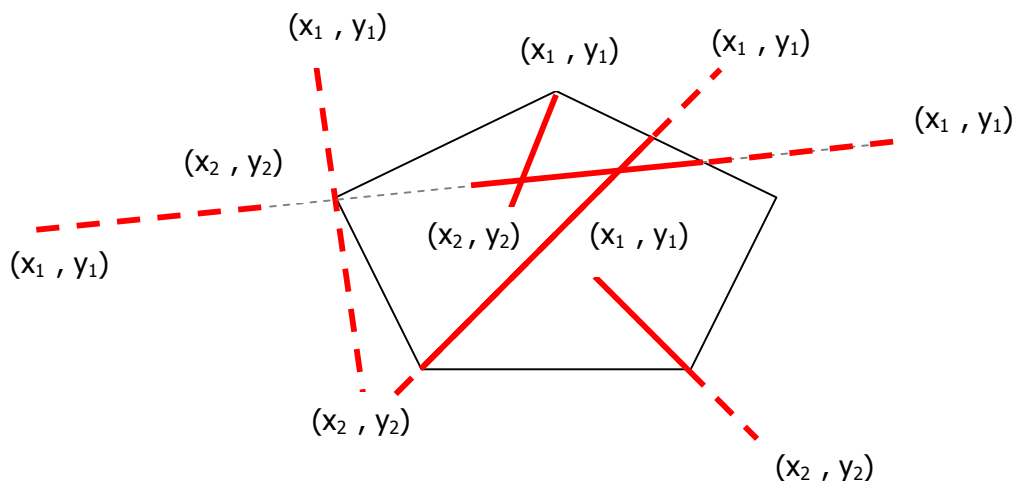


Рис. 5. Ситуации «одного нуля»

На рис. 6 показаны случаи 1–4, когда на прямой линии, определяемой стороной $(x_1, y_1)-(x_2, y_2)$ произвольной фигуры, лежат две соседние вершины заданного выпуклого окна. По аналогии эти случаи назовем ситуациями

«двух соседних нулей». Для выявления этих ситуаций достаточно обращения к функции $ZNAK(x_1, y_1, x_2, y_2, F_x, F_y)$, где (F_x, F_y) – одна из двух соседних вершин заданного выпуклого окна, лежащих на указанной прямой.

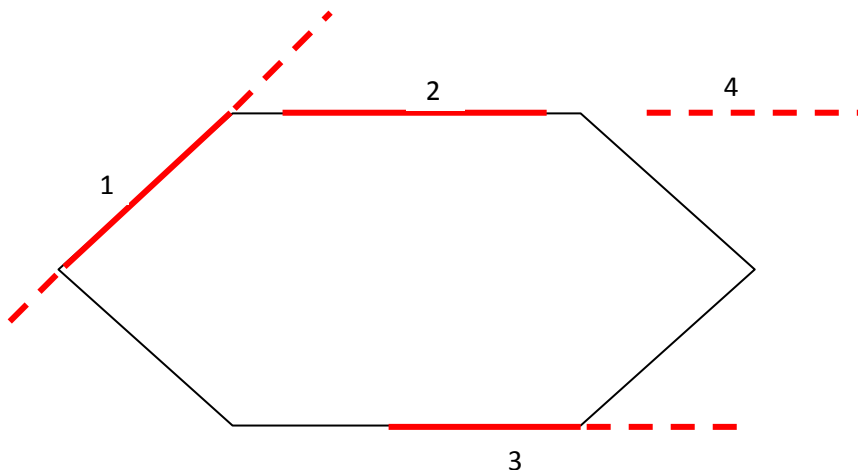


Рис. 6. Ситуации «двух соседних нулей»

На рис. 7 показаны случаи 1–4, когда на прямой линии, определяемой стороной $(x_1, y_1)-(x_2, y_2)$ произвольной фигуры, лежат две не соседние вершины заданного выпуклого окна. Эти случаи назовем ситуациями «двух несоседних

нулей». Для выявления этих ситуаций вновь достаточно обращения к функции $ZNAK(x_1, y_1, x_2, y_2, F_x, F_y)$, где (F_x, F_y) – одна из двух несоседних вершин заданного выпуклого окна, лежащих на указанной прямой.

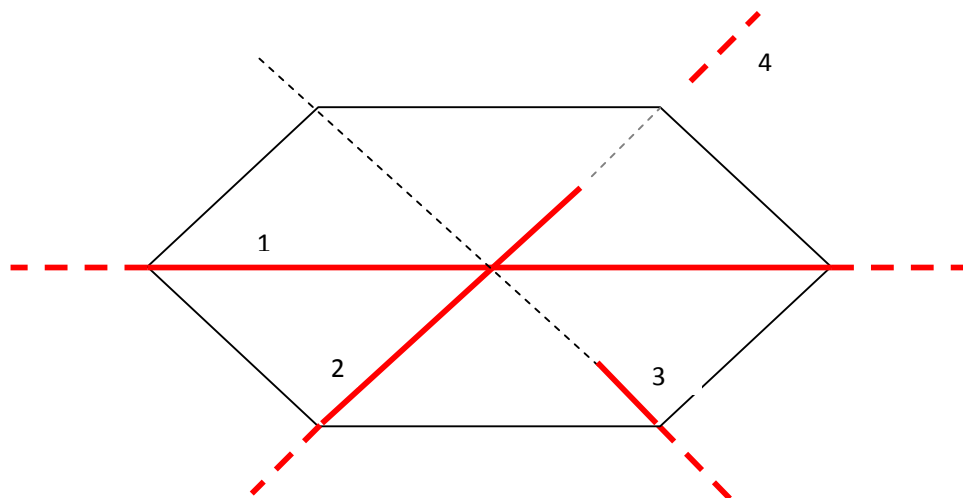


Рис. 7. Ситуации «двух несоседних нулей»

Рис. 8 иллюстрирует случаи 1–5, когда на прямой линии, определяемой стороной $(x_1, y_1)-(x_2, y_2)$ произвольной фигуры, не лежат вершины заданного выпуклого окна. Эти случаи объединим в ситуации «ноль нулей».

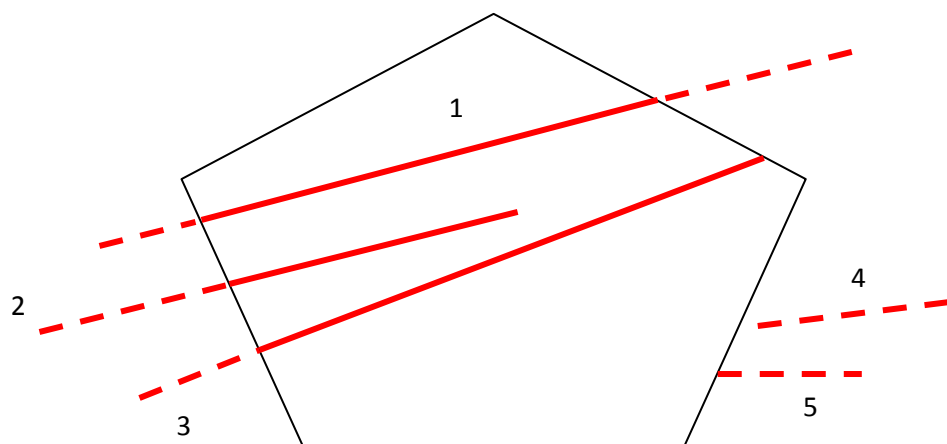


Рис. 8. Ситуации «ноль нулей»

В итоге получаются четыре независимые алгоритмические ветви. Результат работы программы в случае произвольного выпуклого окна представлен на рис. 9.

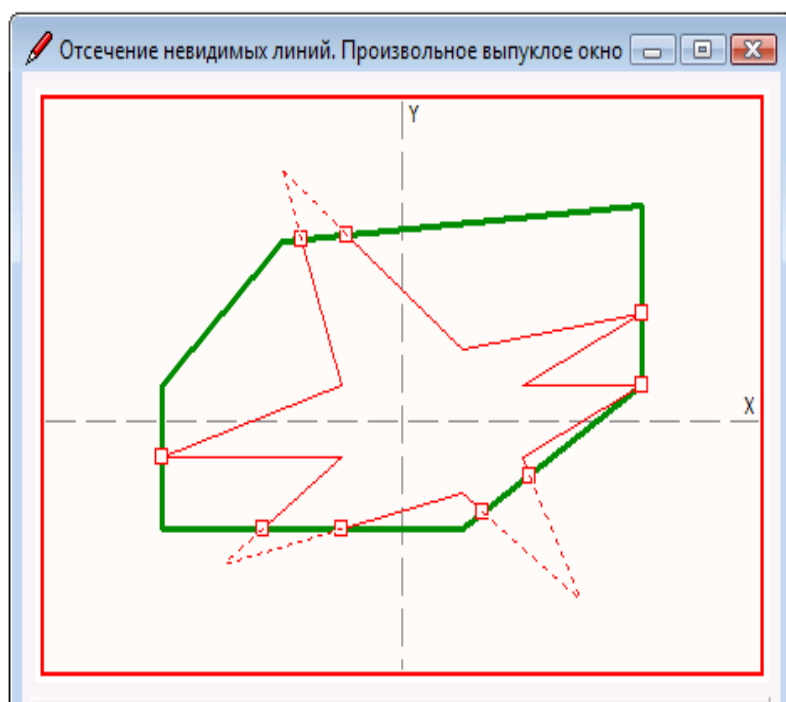


Рис. 8. Произвольное выпуклое окно

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. AlgoList – алгоритмы, методы, исходники. Графика. Отсечение многоугольника [Электронный ресурс]. – URL: http://algolist.manual.ru/graphics/clip_poly.php (дата обращения 18.11.2013).
2. **Аммерал, Л.** Принципы программирования в машинной графике / Л. Аммерал ; пер. с англ. – Москва : СолСистем, 1992. – 224 с.: ил.
3. **Куликов, А.** Алгоритмические основы современной компьютерной графики. Лекция 5 : Отсечение (клиппирование) геометрических примитивов / А. Куликов, Т. Овчинникова [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/70/70/lecture/1077?page=3> (дата обращения 18.11.2013).
4. Компьютерная графика. Лекция №7 : Отсечение многоугольника [Электронный ресурс]. – URL: http://ermak.cs.nstu.ru/kg_rivs/graf07.html (дата обращения 18.11.2013).
5. **Роджерс, Д.** Алгоритмические основы машинной графики / Д. Роджерс ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1989. – 512 с.

Поступила 04.12.2013 г.

Об авторах:

Смолянов Андрей Григорьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой фундаментальной информатики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), ivt@math.mrsu.ru

Смолянова Елена Григорьевна, доцент кафедры математического анализа факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), janovaeg@mail.ru

Для цитирования: Смолянов, А. Г. Задача отсечения и произвольное выпуклое окно / А. Г. Смолянов, Е. Г. Смолянова // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 132–138.

REFERENCES

1. AlgoList – algoritmy, metody, iskhodniki. Grafika. Otsecheniye mnogougolnika [AlgoList – algorithms, methods, source code. Graphics. Polygon clipping]. Available at: http://algolist.manual.ru/graphics/clip_poly.php
2. Ammeral L. Printsipy programmirovaniya v mashinnoy grafike [Programming principles for computer graphics]. Moscow, Sol Sistem Publ. 1992, 224 p.
3. Kulikov A., Ovchinnikova T. Algoritmicheskiye osnovy sovremennoy kompyuternoy grafiki. Lektsiya 5: Otsecheniye (klippirovaniye) geometricheskikh primitivov. Natsionalny Otkryty Universitet «INTUIT» [Algorithmical bases of a present-day computer graphics. Lecture 5: geometrical primitives clipping. National open university “Intuit”]. Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/70/70/lecture/1077?page=3>
4. Kompyuternaya grafika. Lektsiya №7. : Otsecheniye mnogougolnika [Computer Graphics course. Lecture №. 7. : Polygon Clipping]. Available at: http://ermak.cs.nstu.ru/kg_rivs/graf07.htm
5. Rodzhers D. Algoritmicheskiye osnovy mashinnoy grafiki [Algorithmical bases of computer graphics]. Moscow, Mir Publ., 1989, 512 p.

About the authors:

Smol'yanov Andrey Grigoryevich, associate professor (docent), head of Fundamental Informatics chair of Mathematics and Information Technology Department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, ivt@math.mrsu.ru

Smol'yanova Elena Grigoryevna, associate professor (docent) of Mathematical Analysis chair of Mathematics and Information Technology department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), janovaeg@mail.ru

For citation: Smol'yanov A. G., Smol'yanova E. G. Zadacha otsecheniya i proizvol'noe vypukloe okno [Clipping problem and planar convex polygon]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 132 – 138.

ИГРА С «ЛИНИЕЙ ЖИЗНИ». СЛУЧАЙ ПОТОЧЕЧНОЙ ВСТРЕЧИ

В. Д. Ширяев, Е. В. Анощенко

В статье рассматривается игра преследования с «линией жизни» в квадрате $S = \{(x, y) | -d \leq x \leq d, -d \leq y \leq d\}$; приводится решение игры с предположением, что преследуемый игрок (Е) использует кусочно-постоянные стратегии, а преследователь (Р) – стратегии с дискриминацией, при этом строятся сечения выигрывающих множеств игроков Р и Е.

Ключевые слова: игра, «линия жизни», стратегия, дискриминация игрока, зона безопасности, выигрывающее множество, огибающая.

«LIFE LINE» GAME. LINE OF PURSUIT MEETING

V. D. Shiryayev, E. V. Anoshchenko

The object of the research is a game of pursuit with squared «life line» $S = \{(x, y) | -d \leq x \leq d, -d \leq y \leq d\}$. A solution of the game of pursuit is constructed on the following basis: assume an evader (Player E) uses piecewise constant strategies, whereas a pursuer (Player P) uses discrimination strategies. Under these conditions, sections of winning sets of players P and E are built.

Keywords: game of pursuit, «life line», strategy, discrimination for player, safety zone, winning set, envelope.

Предположим на плоскости задано некоторое множество S . Две точки – преследователь P и преследуемый E , обладая ограниченными по модулю линейными скоростями, перемещаются в множестве S , имея при этом возможность в каждый момент времени изменять направление движения (простое движение). В начальный момент времени игроки находятся во множестве S . Преследуемый E считается пойманным, как только расстояние между ним и преследователем P достигнет значения, меньшего или равного l ($l \geq 0$). Число l называется радиусом встречи, а процесс поимки – l -встречей. Целью игрока P является поимка игрока E до достижения последним «линии жизни» – границы множества S . Игрок E преследует противоположную цель, т. е. стремится достичь «линии жизни» до l -встречи.

Будем рассматривать игры с дискриминацией игрока E , в которых E использует кусочно-постоянные стратегии $v_\sigma \in E$, а P использует стратегии с дискриминацией из $P+(\bar{u})$. Стратегией с дискриминацией (констратегией) игрока P называется любая вектор-функция

$$u = \{u_1, u_2\} = \left\{ \begin{array}{l} u_1(t, x_1, y_1, x_2, y_2, v), \\ u_2(t, x_1, y_1, x_2, y_2, v) \end{array} \right\},$$

определенная для всех $t \geq 0$, x_1, y_1, x_2, y_2 и векторов $v = \{v_1, v_2\}$, $v_1^2 + v_2^2 \leq \beta^2$, а также удовлетворяющая условию $u_1^2 + u_2^2 \leq \alpha^2$ ($P+$ – множество всех констратегий игрока P).

Пусть $z_1(t)$ ($z_2(t)$) траектория игрока P (E) в ситуации $\{u, v_\sigma\} \in P+ \times E$, ис-

ходящая из начальной точки $z_1^0(z_2^0)$, и пусть

$$t_S^E = \inf \{t : z_2(t) \in S\},$$

$t_p = \min \{t : \rho(z_1(t), z_2(t)) \leq l\}$ (если таких t_p не существует, то t_p полагаем равным ∞). Тогда выигрыш игрока E равен:

$$K(z_1, z_2, u, v_\sigma) = \begin{cases} -1, & 5A: 8 \quad t_p < t_S^E, t_p < \infty, \\ 0, & 5A: 8 \quad t_p = t_S^E = \infty, \\ 1, & 5A: 8 \quad t_p \geq t_S^E, t_S^E < \infty. \end{cases}$$

Определение 1. Выигрывающим множеством $W_P(W_E)$ игрока $P(E)$ называется множество всех точек $\{z_1; z_2\} \in R^4$, таких, что

$$\min_{u \in P^+} \max_{v_\sigma \in E} K(z_1, z_2, u, v_\sigma) = -1$$

$$(\max_{v_\sigma \in E} \min_{u \in P^+} K(z_1, z_2, u, v_\sigma) = +1).$$

Таким образом, если преследование начинается из точек z_1, z_2 , удовлетворяющих условию $\{z_1; z_2\} \in W$, то игрок P всегда может поймать игрока E до достижения им «линии жизни». Аналогично, если преследование начинается из точек, таких, что $\{z_1; z_2\} \in W_E$, то игрок E может достичь «линии жизни» до момента l -встречи независимо от действий преследователя.

Определение 2. Сечение $W_P(z_2^0)$ выигрывающего множества $W_P \subset R^4$ игрока P плоскостью $z_2 = z_2^0$ – зоной встречи в позиции z_2^0 , а сечение $W_E(z_1^0)$ выигрывающего множества $W_E \subset R^4$ плоскостью $z_1 = z_1^0$ называется зоной убегания в позиции z_1^0 .

Зоны встречи и убегания, являющиеся множествами на плоскости, дают более наглядное представление о воз-

можностях игроков, чем выигрывающие множества в четырехмерном пространстве.

Пусть $\bar{u}$ – некоторая фиксированная стратегия игрока P , обладающая свойством в любой ситуации $\{\bar{u}, v_\sigma\} \in P^+ \times E$ обеспечивать l -встречу с игроком E во всей плоскости, если в момент времени $t = 0$ игроки находятся в точках $z_1^0 = (x_{p^0}; y_{p^0})$, $z_2^0 = (x_{e^0}; y_{e^0})$.

Обозначим через $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$ множество всевозможных положений игрока E в момент l -встречи в ситуации $\{\bar{u}, v_\sigma\}$ для различных $v_\sigma \in E$ (местоположение игрока E в момент l -встречи называется «точкой встречи»). Очевидно, что если множество $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$ имеет непустое пересечение с дополнением множества S , то игрок P , используя стратегию $\bar{u}$, не может гарантировать l -встречи с игроком E в множестве S .

Определим структуру множества $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$, с тем чтобы получить уравнения границ зоны встречи и зоны убегания. Имея явное выражение для границ множества $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$ и зная границу множества S , можно геометрически достаточно просто построить границу выигрывающего множества игрока E в позиции $P^0 = z_1^0$ как множество точек $z_2 \in S$, для которых граница множества $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$ касается границы множества S . Аналогично, имея явное выражение для границы множества $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$ и зная границу множества S , можно геометрически построить границу выигрывающего множества игрока P в позиции $E^0 = z_2^0$ как множества точек $z_1 \in S$, для которых граница множества $C_u^-(z_1^0, z_2^0)$ касается границы множества S .

Приведем решение игры в случае поточечной поимки ($l = 0$) в предположении, что игроки движутся с макси-

мальной скоростью. Ясно, что игроки Р и Е, преследующие противоположные цели, должны использовать все свои возможности, в частности, они должны двигаться с максимальной скоростью. В этом случае уравнения движения имеют следующий вид:

$$\dot{x}_1 = u_1, \quad \dot{y}_1 = u_2, \quad u_1^2 + u_2^2 = \alpha^2,$$

$$\dot{x}_2 = v_1, \quad \dot{y}_2 = v_2, \quad v_1^2 + v_2^2 = \beta^2.$$

Будем считать, что скорость преследователя больше скорости убегающего ($\alpha > \beta$), в противном случае всегда выигрывает игрок Е.

Известно, что если Е выбирает любое прямолинейное движение, то при параллельном сближении множество точек встречи являются окружностью Аполлония — границей круга $\rho(z, z_1^0)w \geq \rho(z, z_2^0)$, $w = \beta / \alpha$, [1]:

$$S_0 = \{z \mid \rho(z, z_1^0)w = \rho(z, z_2^0)\}.$$

$$\begin{cases} F(x, y, t) = (x - x(t))^2 + (y - y(t))^2 - w^2[(x_1^0 - x(t))^2 + (y_1^0 - y(t))^2] = 0, \\ -\frac{1}{2}F_t(x, y, t) = \frac{dx(t)}{dt}(x - x(t)) + \frac{dy(t)}{dt}(y - y(t)) + w^2[\frac{dx(t)}{dt}(x(t) - x_1^0) + \\ + \frac{dy(t)}{dt}(y(t) - y_1^0)] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Пусть К — прямая, $z_1^0 = \{0; b\}$,

$$K: x(t) = t, \quad y(t) = 0, \quad -\infty < t < +\infty.$$

Система (2) имеет вид

$$\begin{cases} (x - t)^2 + y^2 = w^2(t^2 + b^2), \\ -(x + t) = w^2t. \end{cases}$$

Исключим параметр t ($t = x / (1 - w^2)$):

$$\left(x - \frac{x}{1 - w^2}\right)^2 + y^2 = w^2 \left(\frac{x^2}{(1 - w^2)^2} + b^2\right),$$

$$\frac{w^4}{(1 - w^2)^2} x^2 + y^2 = \frac{w^2}{(1 - w^2)^2} x^2 + w^2 b^2,$$

Пусть К — «линия жизни». Рассмотрим семейство окружностей

$$\{C(a, \rho(z_1^0, a)w)\}_{a \in K} \quad (1)$$

с центрами на «линии жизни» и радиусами. Огибающей (или расширенной огибающей) семейства (1) будем называть кривую, которая в каждой своей точке касается хотя бы одной окружности $C(a, \rho(z_1^0, a)w)$, $a \in K$.

Теорема [1]. Если граница $F(z_1^0)$ зоны убегания $W_E(z_1^0)$ является гладкой кривой, то она совпадает с частью огибающей семейства (1).

Пусть «линия жизни» является гладкой и задана параметрически

$$K: x = x(t), \quad y = y(t), \quad t \in [t_1, t_2], \quad (1)$$

тогда огибающая семейства определяется системой уравнений:

$$y^2 - \frac{w^2}{1 - w^2} x^2 = w^2 b^2,$$

$$\frac{y^2}{w^2 b^2} - \frac{x^2}{(1 - w^2) b^2} = 1.$$

$$\text{Итак, } \frac{y^2}{w^2 b^2} - \frac{x^2}{(1 - w^2) b^2} = 1. \quad (3)$$

Огибающая (3) является гиперболой при $b \neq 0$ и вырождается в пару прямых при $b = 0$ (рис.1). Огибающая (3) совпадает с границей зоны убегания $W_E(z_1^0, K)$.

Направленная вверх ветвь гиперболы (3) совпадает с границей зоны убегания $W_E(z_1^0, CS)$ в игре с «линией жизни»

в полуплоскости $S(-\infty < x < +\infty, y \geq 0)$.

Заметим, что абсцисса точки касания окружности Аполлония для началь-

ных положений $z_1^0 = \{0; b\}$, $z_2 = \{x_E; y_E\}$ равна $x = \frac{x_E}{1-w^2}$.

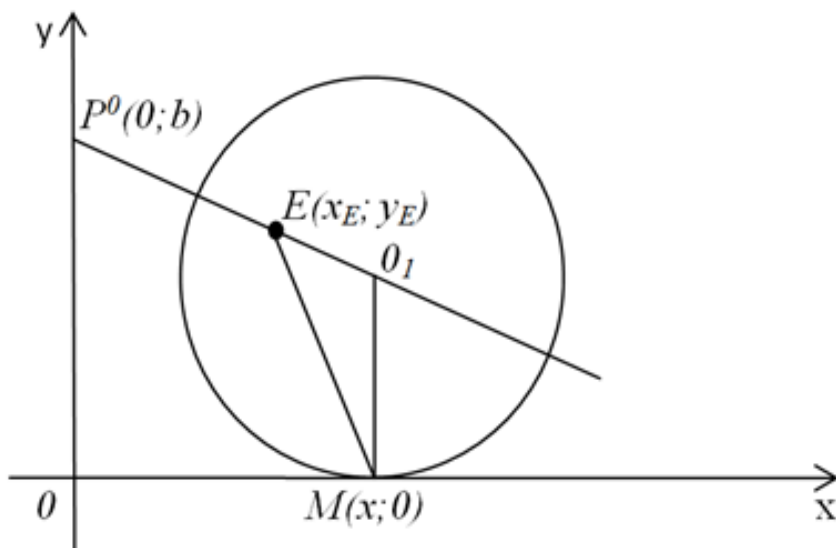


Рис. 1.

Аналогично можно показать, что при поточечной поимке зона встречи $W_P(z_2^0)$ ($z_2^0 = \{0; b\}$) совпадает с областью, ограниченной эллипсом

$$\frac{x^2}{\frac{1-w^2}{w^2}b^2} + \frac{y^2}{\frac{1}{w^2}b^2} = 1.$$

Внутренняя часть эллипса, лежащая в полуплоскости S , является выигрывающим множеством игрока P в позиции E^0 (рис. 2). Заметим, что в данном случае абсцисса точки касания окружности Аполлония для начальных положений

$$z_1 = \{x_P; y_P\}, \quad z_2^0 = \{0; b\} \quad x = -\frac{w^2}{1-w^2}x_P.$$

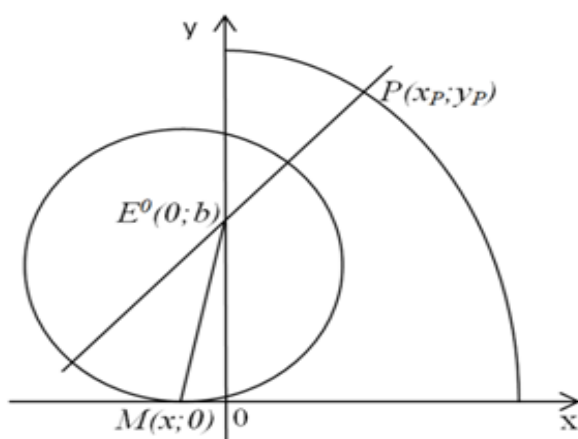


Рис. 2.

Рассмотрим случай, когда S является квадратом

$$(S = \{(x; y) \mid -d \leq x \leq d, -d \leq y \leq d\}).$$

$$1) S = \{(x; y) \mid -\infty < x < +\infty, 0 \leq y \leq d\}.$$

В этом случае K – прямая, $Z_1^0 = \{0; 0\}$,

$$K : x(t) = t, y(t) = d, -\infty < t < +\infty.$$

Система (2) имеет вид

$$\begin{cases} (x-t)^2 + (y-d)^2 = w^2(t^2 + d^2), \\ -(x+t) = w^2 t. \end{cases}$$

Исключив параметр t ($t = x / (1 - w^2)$), получим

$$\frac{(y-d)^2}{w^2 d^2} - \frac{x^2}{(1-w^2)d^2} = 1. \quad (4)$$

Направленная вверх ветвь гиперболы (4) совпадает с границей зоны убегания

ния $W_E(z_1^0, CS)$ в игре с «линией жизни» в области $S(-\infty < x < +\infty, 0 \leq y \leq d)$.

$$2) S = \{(x; y) \mid -\infty \leq x \leq +\infty, -d \leq y \leq 0\}.$$

Граница выигрывающего множества игрока E определяется аналогично и имеет вид

$$\frac{(y+d)^2}{w^2 d^2} - \frac{x^2}{(1-w^2)d^2} = 1.$$

Объединяя оба рассмотренных случая, получаем решение поставленной задачи в полосе $-\infty < x < +\infty, -d \leq y \leq d$. Граница выигрывающего множества игрока E в этом случае имеет вид

$$\frac{(y \pm d)^2}{w^2 d^2} - \frac{x^2}{(1-w^2)d^2} = 1. \quad (5)$$

Вид границы выигрывающего множества игрока E при $d=2, w=1/2$ приведен на рис. 3.

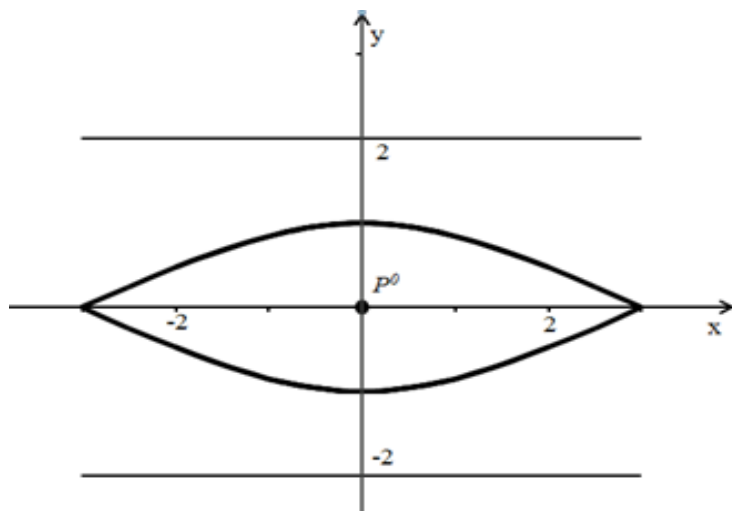


Рис. 3.

3) Рассмотрим случай, когда «линией жизни» игрока E является прямая $x = d$, т. е. $S = \{(x; y) \mid 0 \leq x \leq d, -\infty < y < +\infty\}$.

В этом случае K – прямая, $z_1^0 = \{0; 0\}$

$$K : x(t) = d, y(t) = t, -\infty < t < +\infty.$$

Система (2) имеет вид

$$\begin{cases} d^2 + (y-t)^2 = w^2(d^2 + t^2), \\ -(y+t) = w^2 t. \end{cases}$$

Исключив параметр t ($t = x / (1 - w^2)$), получим

$$\frac{(x-d)^2}{w^2 d^2} - \frac{y^2}{(1-w^2)d^2} = 1. \quad (6)$$

Часть полуплоскости S , расположенная правее линии (6), является выигрывающим множеством игрока E .

$$4) S = \{(x; y) \mid -d \leq x \leq 0, -\infty < y < +\infty\}.$$

Граница выигрывающего множества игрока E определяется аналогично и имеет вид

$$\frac{(x+d)^2}{w^2 d^2} - \frac{y^2}{(1-w^2)d^2} = 1.$$

Объединяя оба рассмотренных случая, получим решение поставленной нами задачи в рамках полосы $-d \leq x \leq d, -\infty < y < +\infty$. Граница выигрывающего множества игрока E в этом случае имеет вид

$$\frac{(x \pm d)^2}{w^2 d^2} - \frac{y^2}{(1-w^2)d^2} = 1. \quad (7)$$

Вид границы выигрывающего множества игрока E при $d = 2, w = 1/2$ приведен на рис.4.

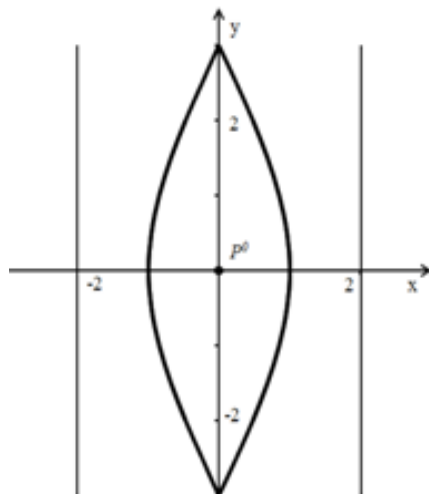


Рис. 4.

Далее решаем игру в квадрате. Граница выигрывающего множества игрока E в случае $S = \{(x; y) \mid -d \leq x \leq d, -d \leq y \leq d\}$ получается как граница пересечения выигрывающих множеств игрока E , определяемых соотношениями (5) и (7).

Вид этой границы при $d = 2, w = 1/2$ приведен на рис. 5.

Аналогично определяется граница выигрывающего множества игрока P ($z_2^0 = \{0; 0\}$).

$$1) S = \{(x; y) \mid -\infty < x < +\infty, 0 \leq y \leq d\}.$$

Зона встречи $W_p(z_2^0)$ совпадает с областью, ограниченной эллипсом

$$\frac{x^2}{\frac{1-w^2}{w^2}d^2} + \frac{(y-d)^2}{\frac{1}{w^2}d^2} = 1.$$

$$2) S = \{(x; y) \mid -\infty < x < +\infty, -d \leq y \leq 0\}.$$

Зона встречи $W_p(z_2^0)$ совпадает с областью, ограниченной эллипсом

$$\frac{x^2}{\frac{1-w^2}{w^2}d^2} + \frac{(y+d)^2}{\frac{1}{w^2}d^2} = 1.$$

Объединяя оба случая, получаем решение поставленной задачи в полосе $-\infty < x < +\infty, -d \leq y \leq d$. Граница выиг-

рывающего множества игрока Р в этом случае имеет вид:

$$\frac{x^2}{\frac{1-w^2}{w^2}d^2} + \frac{(y \pm d)^2}{\frac{1}{w^2}d^2} = 1. \quad (8)$$

Вид границы выигрывающего множества игрока Р при $d = 2, w = 1/2$ приведен на рис. 6.

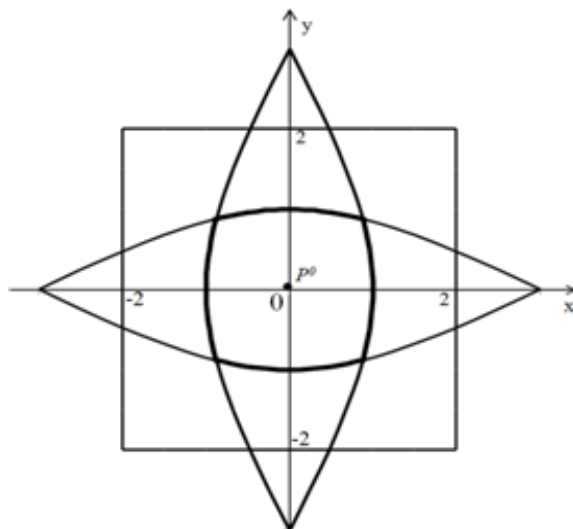


Рис. 5.

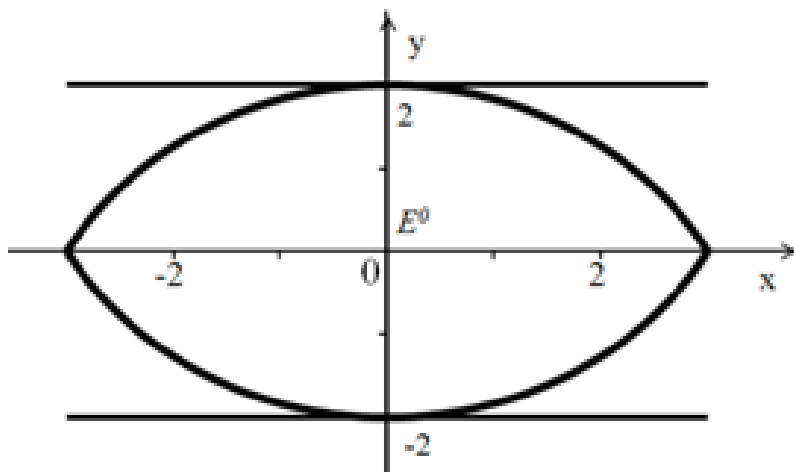


Рис. 6

$$3) S = \{(x; y) \mid 0 \leq x \leq d, -\infty < y < +\infty\}.$$

Зона встречи $W_p(z_2^0)$ совпадает с областью, ограниченной эллипсом

$$\frac{(x-d)^2}{\frac{1}{w^2}d^2} + \frac{y^2}{\frac{1-w^2}{w^2}d^2} = 1.$$

$$4) S = \{(x; y) \mid -d \leq x \leq 0, -\infty < y < +\infty\}.$$

Зона встречи $W_p(z_2^0)$ совпадает с областью, ограниченной эллипсом

$$\frac{(x+d)^2}{\frac{1}{w^2}d^2} + \frac{y^2}{\frac{1-w^2}{w^2}d^2} = 1.$$

Объединяя оба случая получаем решение поставленной задачи в полосе

$-d \leq x \leq d, -\infty < y < +\infty$. Граница выигрывающего множества игрока Р в этом случае имеет следующий вид:

$$\frac{(x \pm d)^2}{\frac{1}{w^2}d^2} + \frac{y^2}{\frac{1-w^2}{w^2}d^2} = 1. \quad (9)$$

Вид границы выигрывающего множества игрока Р при $d = 2$, $w = 1/2$ приведен на рис. 7.

Далее решаем игру в квадрате. Граница выигрывающего множества игрока Р в случае $S = \{(x; y) \mid -d \leq x \leq d, -d \leq y \leq d\}$ получается как граница объединения выигрывающих множеств игрока Р, определяемых соотношениями (8) и (9).

Вид этой границы при $d = 2$, $w = 1/2$ приведен на рис. 8.

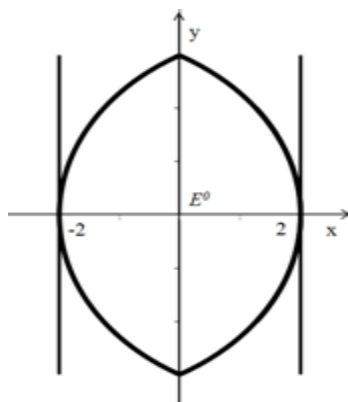


Рис. 7

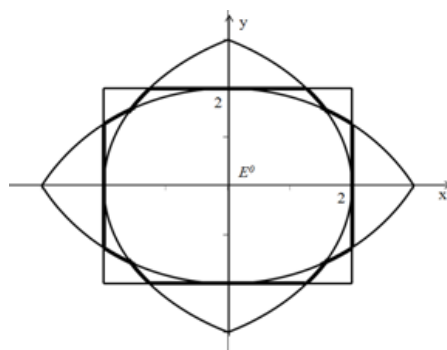


Рис. 8

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петросян, Л. А.** Геометрия простого преследования / Л. А. Петросян, Г. В. Томский. – Новосибирск : Наука, 1983. – 144 с.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Ширяев Виктор Дмитриевич, профессор кафедры фундаментальной информатики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), shiryaevvd@mail.ru

Анощенко Екатерина Васильевна, преподаватель кафедры фундаментальной информатики факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), anoshchenkovaev@mail.ru

Для цитирования: Ширяев, В. Д. Игра с «линией жизни» : Случай поточной встречи / В. Д. Ширяев, Е. В. Анощенко // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С.139–147.

REFERENCES

1. Petrosyan L. A., Tomskey G. V. Geometrija prostogo presledovaniya [Geometry of simple prosecution]. Novosibirsk, Science Publ., 1983, 144 p.

About the authors:

Shiryaev Victor Dmitriyevich, professor, chair of Fundamental Informatics, department of Mathematics and Information Technologies, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Physical and Mathematical sciences, shiryaevvd@mail.ru

Anoshchenkova Ekaterina Vasilyevna, lecturer, chair of Fundamental Informatics, department of Mathematics and Information Technologies Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), anoshchenkovaev@mail.ru

For citation: Shirjaev V. D., Anoshchenkova E. V. Igra s «liniej zhizni» : Sluchaj potочноj vstrechi [«Life line» game. Line of pursuit meeting]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 139 – 147.

УДК 004.925.84

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ В СРЕДЕ SOLIDWORKS НА БАЗЕ API

М. В. Чугунов, А. В. Щёкин

В статье рассматривается подход к автоматизированному проектированию элементов механических передач, основанный на параметрическом 3D-моделировании деталей машин с учетом их жесткостных и прочностных характеристик. В качестве средства 3D-моделирования используется CAD-система SolidWorks. При этом создание 3D-модели реализуется автоматически в соответствии с набором заданных параметров. Для анализа прочности и жесткости элементов механических передач, представленных расчетной схемой бруса, используются стержневые конечноэлементные модели, максимально адаптированные к расчетным схемам данного типа (одномерным и односвязным). В тех случаях, когда деталь не может быть представлена стержневой моделью, применяются стандартные инженерные методики расчета в виде эмпирических зависимостей.

Основной целью работы является разработка программного обеспечения, дополняющего штатный функционал SolidWorks эффективными и экономичными инструментами анализа напряженно-деформированного состояния конструкций рассматриваемого класса. Для этого используется программный интерфейс приложения API (Application Program Interface) SolidWorks.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, механические передачи, 3D-моделирование, API-программирование, COM, SolidWorks, объектно-ориентированное проектирование, CAD/CAM/CAE.

3D-MODELLING AND ANALYSIS FOR MECHANICAL TRANSMISSION ELEMENTS IN SOLIDWORKS SOFTWARE BASED ON API

M. V. Chugunov, A. V. Shchyokin

An approach to creation of software, based on API SolidWorks so, that it extends the basic SolidWorks functionality, concerning 3D-modelling for mechanical transmissions elements. 3D-model has been created automatically, according to user defined parameters. API (Application Program Interface) is the general tool for this problem solving.

Results: It is shown, that considered approach is effective for SolidWorks users for following reasons: fully automated style for this model creation, not very expensive analysis for the stress-deformed behavior, based on 1D FEM-model.

Keywords: computer aided design, mechanical transmissions, 3D-modelling, API-programming, COM-technology, SolidWorks, object-oriented design, CAD/CAM/CAE.

SolidWorks – CAD/CAM/CAE-система автоматизированного проектирования, инженерного анализа и подготовки производства. Специализированный модуль SolidWorks Simulation (в более ранних версиях – CosmosWorks) позволяет осуществлять анализ прочности, жесткости, устойчивости и выносливости изделий широкого спектра сложности и назначения.

Математическим обеспечением SolidWorks Simulation является метод конечных элементов (МКЭ). К его достоинствам относят высокую точность решения и наглядность представления результатов, к недостаткам (в рассматриваемом контексте) – вычислительную трудоемкость или необходимость формирования специфической для этого метода расчетной схемы конструкции, отличающейся от общепринятой в инженерной практике. Кроме этого, в составе SolidWorks имеются специализированные библиотеки стандартных элементов ToolBox, используемых в контексте сборки, которые наряду с возможностью построения параметрических твердотельных моделей, как правило, обладают дополнительной функциональностью, присущей CAE-системам, т. е. на начальных этапах проектирования позволяют осуществлять анализ состояния конструкции на основе упрощенных инженерных методик (сопротивление материалов и др.). Такой подход позволяет получить решение в кратчайшие сроки, но не гарантирует высокой точности результатов.

На наш взгляд, актуальной является проблема разработки библиотек ToolBox на базе использования моделей МКЭ, адаптированных к особенностям конструкций рассматриваемого класса так, что реализация

метода не требует дополнительных действий от пользователя, кроме задания исходных данных общего характера, не имеющих отношения к МКЭ как методу решения. В нашей работе такой подход используется при создании параметрических моделей элементов механических передач с последующим анализом проектных решений с точки зрения прочности, жесткости и выносливости с использованием стержневых конечных элементов. Такой вариант МКЭ не предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам, но избавляет от трудностей, связанных со статической неопределимостью рассматриваемой системы и с особенностями наложения граничных условий. Кроме того, будучи встроенным внутри библиотеки, МКЭ может быть скрыт от пользователя и не требовать обращения к специальному интерфейсу, а также формирования конечно-элементной модели и расчетной схемы.

Средством решения поставленной задачи является интерфейс прикладного программирования API (Application Programming Interface), входящий в состав базовой конфигурации SolidWorks. API содержит сотни вызываемых из программ пользователя функций, которые позволяют разрабатывать многофункциональные приложения на платформе SolidWorks [1].

На рис. 1–2 показаны элементы разработанного нами пользовательского интерфейса, применяемого на этапе формирования твердотельной модели конструкции. В нем задаются участки вала разного геометрического типа (цилиндрические, конические и др.), определяются посадочные места подшипников и, в зависимости от их типа, автоматически формируются граничные условия по перемещениям.

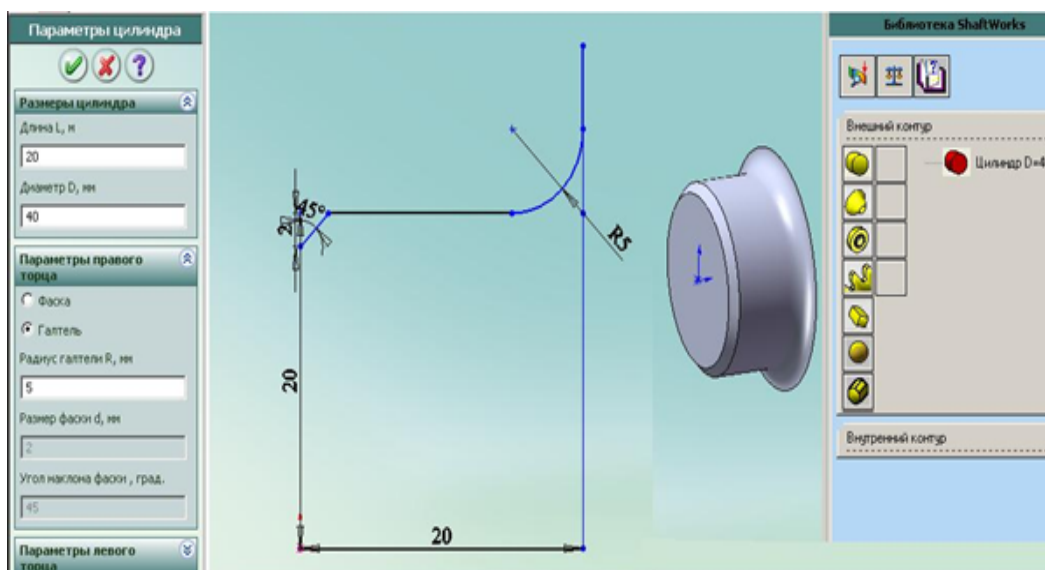


Рис. 1. Элемент пользовательского интерфейса на этапе создания цилиндрического участка вала

Особенностями пользовательского интерфейса является его встроенность в окна SolidWorks (Property

Manager Page и TaskPane), а также динамическое редактирование данных.

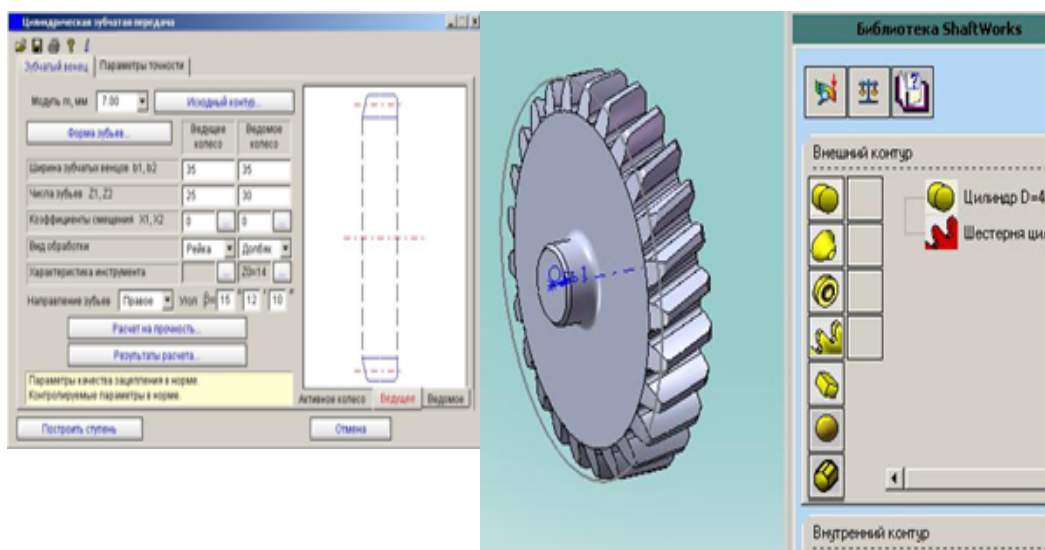


Рис. 2. Элемент пользовательского интерфейса на этапе создания зубчатого колеса

На рис. 3 представлен фрагмент панели для задания динамических и кинематических параметров передач. Внешние силовые воздействия на вал

определяются по этим параметрам автоматически, а набор исходных данных соответствует стандартным инженерным методикам.



Рис. 3. Фрагмент панели для задания динамических и кинематических параметров передачи

Рис. 4 иллюстрирует вариант вывода и коэффициента запаса по усталостной прочности. Все представленные графические объекты являются 3D-эскизами SolidWorks и рассматриваются в качестве элементов дерева конструирования модели.

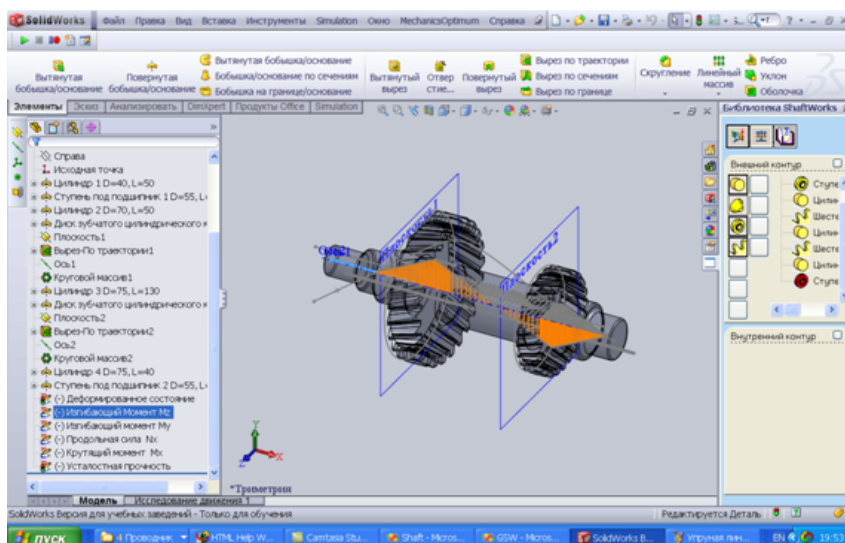


Рис. 4. Пример графического вывода результатов напряженно-деформированного состояния вала

Программно данный подход был реализован в виде пяти динамических библиотек: Mechanics (AddIn-модуль, организующий программный интерфейс с SolidWorks), ShaftWorks (для формирования модели вала), GearCylWorks (для формирования модели цилиндрического зубчатого колеса), GearConWorks (для фор-

мирования модели конического зубчатого колеса) и ShaftSimulation (для реализации МКЭ). Проекты создавались в среде Visual Studio C++, структуры решений для которых представлены на рис. 5. Проекты GearCylWorks, GearConWorks и ShaftWorks являются аналогичными, рисунок иллюстрирует решение GSW для GearCylWorks.

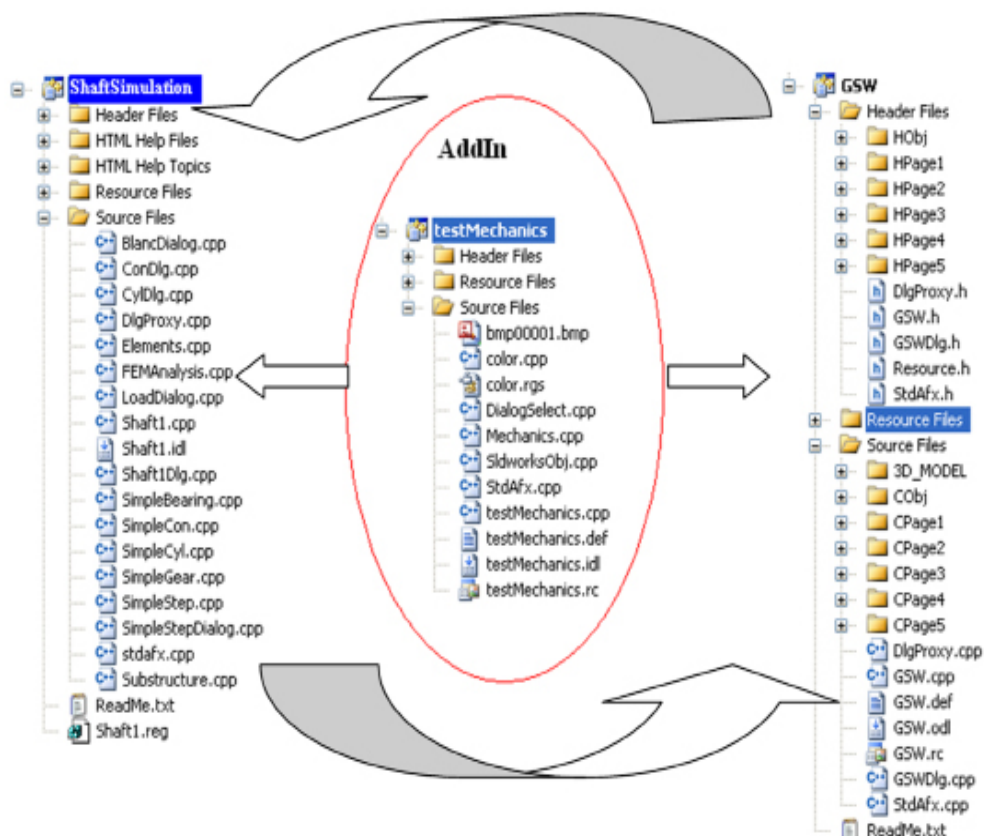


Рис. 5. Решения проектов

Функции основного класса МКЭ CFEMAnalysis для ShaftSimulation реализуют дискретизацию системы, ансамблирование, решение СЛАУ и обратный ход. Классы CSubstructure и CElement предназначены для создания матриц жесткости конечных элементов и под-

конструкций [2], а CLoadPage обеспечивает формирование панелей диалога и ввод исходных данных. Обмен данными между библиотеками и AddIn-модулем осуществляется посредством специально созданного массива структур DataSolve.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Аведьян, А. Б.** SolidWorks API – универсальная платформа для интеграции инженерных и бизнес-приложений / А. Б. Аведьян, Е. Е. Викентьев // САПР и графика. – 2011. – № 6. – С. 32–40.

2. **Максимовский, Д. Е.** Программная реализация МКЭ для стержневых конструкций на основе объектно-ориентированного подхода / Д. Е. Максимовский, М. В. Чугунов // Технологии Microsoft в теории и практике программирования : материалы Всероссийской научно-практической конференции; под ред. Р. Г. Стронгина. – Нижний Новгород, 2008. – С. 409–410.

Поступила 04.12.2013 г.

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин Рузаевского института машиностроения (филиал) ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), m.v.chugunoc@mail.ru

Щёкин Александр Васильевич, инженер кафедры МРСиК Рузаевского института машиностроения (филиал) ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), Schekin@inbox.ru

Для цитирования: Чугунов, М. В. Моделирование и анализ элементов механических передач в среде SolidWorks на базе API / М. В. Чугунов, А. В. Щёкин // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 148–153.

REFERENCES

1. Avedian A. B., Vikentiev E. E. SolidWorks API – universal'naya platforma dlia integratsii inzhenernikh i biznes-prilozheniy [SolidWorks API – universal base for integration of engineering and business applications]. *SAPR I grafika – CAD and graphics*. 2011, no. 6, pp. 32 – 40.

2. Maksimovsky D. E. Programmnaya realizatsiya MKE dlia sterzhnevikh konstruksiy na baze obiektno-orientirovannogo podhoda [Program realization FEM for beam-frame structures, based on object-oriented approach]. *Tekhnologii Microsoft v teorii i praktike programmirovaniya: materialy Vseros. Nauchno-prakt. Konf. Pod red. R. G. Strongina* – Microsoft technologies in theory and practice of programming: Russian Federation academic conference proceedings edited by R.G.Stringin. Nizhny Novgorod, 2008, pp. 409 – 410.

About the authors:

Chugunov Mikhail Vladimirovich, head of the department of Technical Disciplines, Ruzaevka Machine Engineering Institute, OgarevMordovia State University (Ruzaevka, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Engineering sciences, mvchugunoc@mail.ru

Shchyokin Alexander Vasilyevich, engineer, Ruzaevka Machine Engineering Institute, Ogarev Mordovia State University (Ruzaevka, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Engineering sciences, Schekin@inbox.ru

For citation: Chugunov M. V., Shchyokin A. V. Modelirovanie i analiz jelementov mehanicheskikh peredach v srede SolidWorks na baze API [3D modelling and analysis for mechanical transmission elements in SolidWorks software based On API]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 148 – 153.

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ КОРПУСА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SOLIDWORKS SIMULATION

**И. Ф. Душин, С. Е. Маскайкина,
Н. И. Полуешина, Н. Г. Ваваева**

В статье анализируется конструкция корпуса шестеренного насоса с использованием расчета на статическую прочность, учитывающего конкретные условия и режимы эксплуатации. Прочностные расчеты проводились с помощью метода конечных элементов, реализуемого системой автоматизированного проектирования SolidWorks Simulation. Для определения прочности корпуса использовались его твердотельная и конечно-элементная модели с наложенными граничными условиями, выявленными на основе анализа конструкции и расчета силовых зависимостей, действовавших в процессе работы насоса. Представлены эпюры напряжений и коэффициента запаса прочности, позволяющие оценить прочность детали и выработать рекомендации по созданию более рациональной конструкции корпуса в конкретных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: шестеренный насос, корпус, система SolidWorks Simulation, 3D-модель, прочность, коэффициент запаса прочности.

COMPUTER ANALYSIS FOR STRENGTH OF CASE FOR GEAR PUMP USING SOLIDWORKS SIMULATION

**I. F. Dushin, S. E. Maskaykina,
N. I. Polueshina, N. G. Vavaeva**

The problem for case gear pump design, using FEM (finite elements method) is considering in this article. FEM realized in CAD/CAE SolidWorks Simulation software with revealed boundary conditions.

The results are presented in the diagram form for stress and strain behavior and can be used in engineering practice for optimal parameters defining in weight minimization problem.

Keywords: the gear pump, the case, CAD/CAE SolidWorks Simulation, 3D model, durability, assurance factor.

Выбор корпуса осуществляется на заключительном этапе проектирования шестеренного насоса и заключается в выборе габаритных вариантов, геометрических параметров, монтажных размеров типовых конструкций, основным критерием при разработке которых, как правило, является возможность применения менее трудоемких способов изготовления конструкций, в большей степени универсальных относительно условий и режимов эксплуатации

насосов [2, с. 115; 4, с. 166]. По этой причине конструкции корпусов часто бывают нерациональными с точки зрения использования материала.

Расчет на статическую прочность корпуса шестеренного насоса является одним из ключевых этапов проектирования наиболее рациональной конструкции корпуса с учетом конкретных условий и режимов его эксплуатации. Прочностной расчет корпуса при проектировании шестеренных насосов производится крайне

редко и ограничивается применением эмпирических зависимостей, так как связан, во-первых, с большим объемом трудоемких аналитических расчетов нагрузок, действующих на корпус, во-вторых, с тем, что аналитические методы, используемые для определения напряженно-деформированного состояния конструкции, сложны, трудоемки и ограничены примитивной геометрией и простыми схемами нагружения [2, с.118; 4, с. 165].

Необходимость и целесообразность прочностных расчетов такого сложного объекта, как корпус насоса, становится очевидной при применении систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа (например, SolidWorks Simulation), реализующих численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела, в част-

ности, метод конечных элементов, не ограниченные ни формой конструкции, ни способом приложения нагрузки.

Моделирование осуществлялось с реальными техническими параметрами эксплуатации шестеренного насоса: номинальное рабочее давление составляло $p = 4$ МПа, мощность на ведущем валу $N = 10$ кВт, частота вращения ведущего вала $n = 1\,000$ об/мин. Помимо корпуса, модель включала крышку насоса, так как нагрузки, возникавшие в процессе эксплуатации, прикладывались в расчетной модели к поверхностям посадки валов в корпусе и крышке и наличие крышки существенно влияло на распределение и величину напряжений в корпусе. На рис. 1 представлена твердотельная модель рассчитываемой конструкции, а на рис. 2 – конечно-элементная.

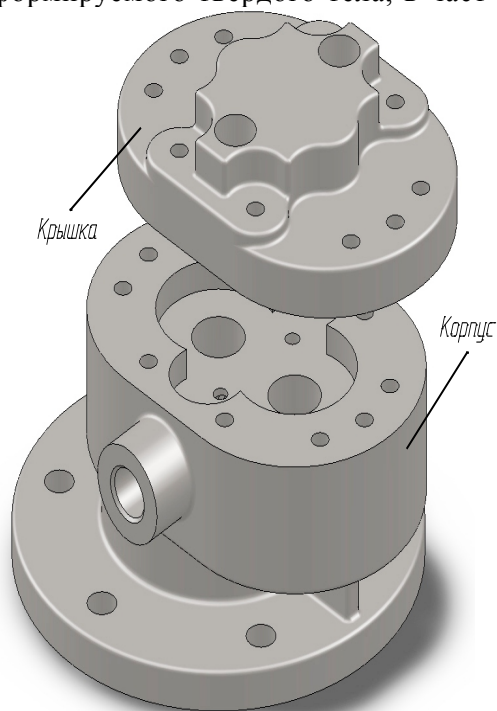


Рис. 1. Твердотельная модель

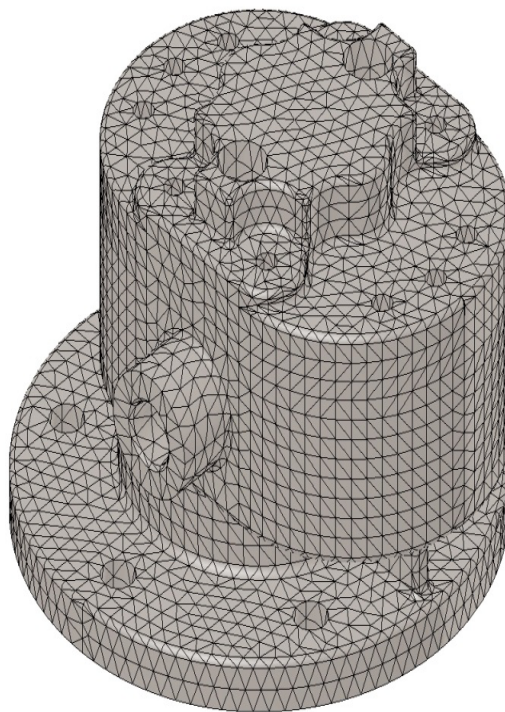


Рис. 2. Конечно-элементная модель

Конечно-элементная модель содержит 122 445 элементов (187 568 узлов). Материал корпуса – серый чугун, моделировался линейной, упругой, изотропной моделью поведения материала, характеризующейся модулем Юнга и коэффициентом Пуассона. В модели прикладываются 2 вида нагрузок: действующие на поверхностях корпуса и крышки под посадку валов и воспринимаемые цилиндрическими поверхностями корпуса в уплотняемой зоне по периферии шестерен. Указанные нагрузки рассчитывались аналитически.

Величина радиальной нагрузки, прикладываемой к каждой поверхности под посадку вала, равна величине реакции от усилия, действующего на опоры насоса при его эксплуатации.

В практике проектирования шестеренных насосов для определения усилия, действующего на опоры насоса, чаще всего используются приближенные зависимости, занижающие величины нагрузок [2, с. 91]. В работе расчет ведется согласно зависимостям, предполагающим, что закон распределения давления в зазоре по периферии шестерен носит нелинейный характер, является параболическим и результирующее усилие будет характеризоваться суммой усилий от действия распределенной гидравлической нагрузки в периферийном зазоре, давлением в зоне нагнетания и усилием от передаваемого крутящего момента:

$$P = P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)},$$

где $P^{(1)}$ – величина равнодействующей распределенной гидравлической нагрузки в периферийной зоне, Н;

$P^{(2)}$ – величина усилия, определяемого действием полного рабочего давления в зоне нагнетания на криволинейные участки поверхности шестерен, Н;

$P^{(3)}$ – величина усилия, определяемого действием передаваемого крутящего момента, Н [Там же, с. 92].

Расчет сводится к определению проекций результирующего усилия на каждый вал. Величины искомых усилий зависят только от рабочего давления насоса и геометрических параметров зацепления шестерен. Величина давления в зоне нагнетания насоса (p , МПа), принималась за 8 МПа, что превышает номинальное рабочее давление насоса в 2 раза, согласно рекомендациям при расчете корпусов насоса на статическую прочность [4, с. 165].

В SolidWorks Simulations имеется возможность приложения радиальной нагрузки, распределенной по закону передачи радиального усилия, через цилиндрическую поверхность. В системе такое граничное условие называется «рабочая нагрузка». Распределенная нагрузка в периферийном зазоре в SolidWorks Simulation моделировалась как неравномерно распределенная по определенному закону в полярных координатах с равнодействующей $p_{\text{н(рез)}}$, приложенной к соответствующим поверхностям модели, приводя закон изменения давления к классическому уравнению кривой второго порядка в полярных координатах.

Кроме нагрузок, модель включала следующие ограничения: фиксирование от перемещений по всем направлениям поверхностей отверстий под болты, моделирующее болтовое соединение; ограничение от вертикальных перемещений нижней поверхности корпуса («ограничение на плоской грани» со значением «нулевые перемещения по оси Y»). Граничные условия для контактирующих поверхностей – «связанные» (поверхности с общими узлами) представлены на рис. 3.

Согласно цели расчета, анализу подлежат эпюры распределения коэффициента запаса прочности (КЗП). Для его оценки необходимо принять критерий прочности.

Эпюры эквивалентных напряжений по Мизесу и эпюры главных напряжений представлены на рис. 4.

Значения рассматриваемых напряжений в характерных узлах раскрываются в табл. 1.

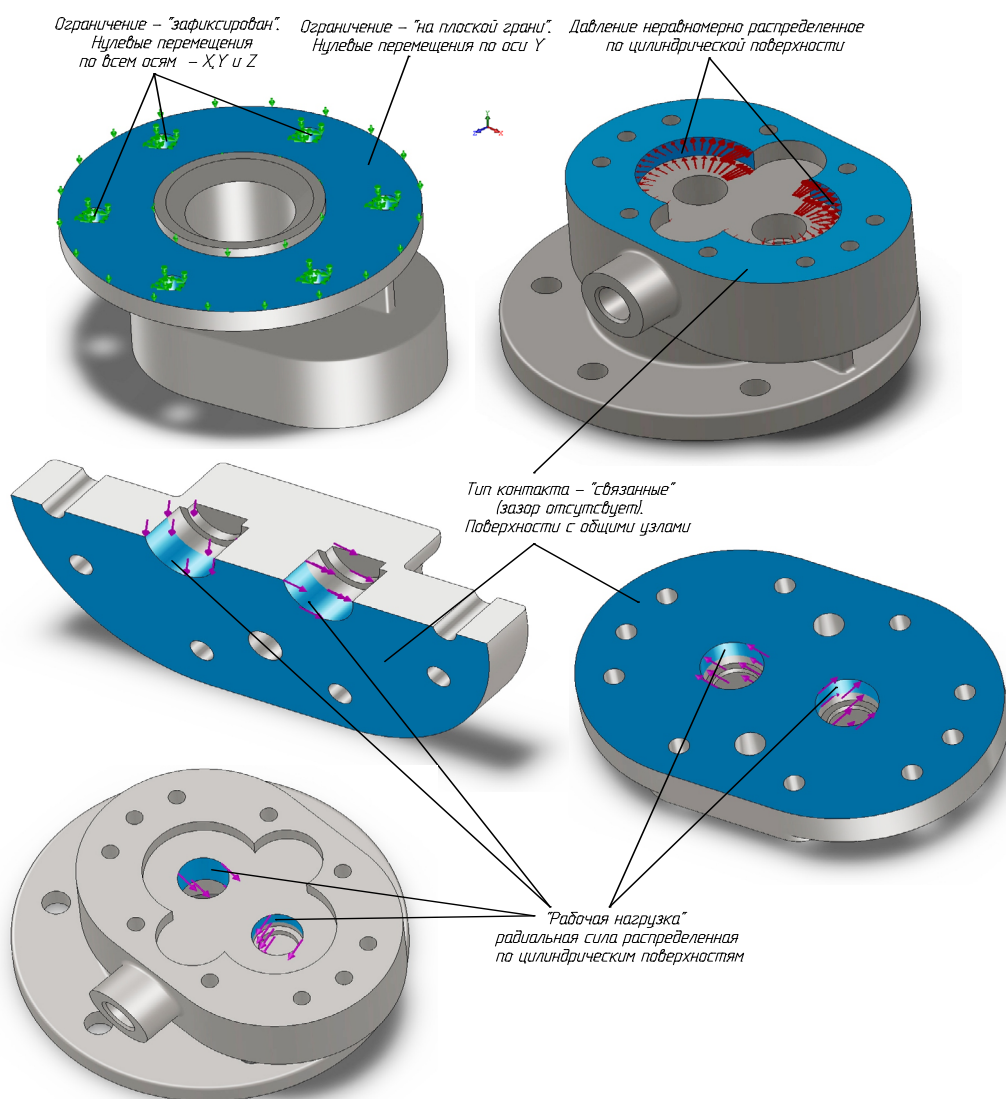


Рис. 3. Граничные условия в модели

Т а б л и ц а 1

Значения напряжений в характерных узлах модели

Узел	Напряжение, МПа			
	$\sigma_{\text{эк}}$	σ_1	σ_2	σ_3
A	38,7 (max)	3,1	-2,1	-37,9(max)
B	13,2	15,2(max)	4,7	0,3
C	14,0	3,2	-7,9(max)	-12,5

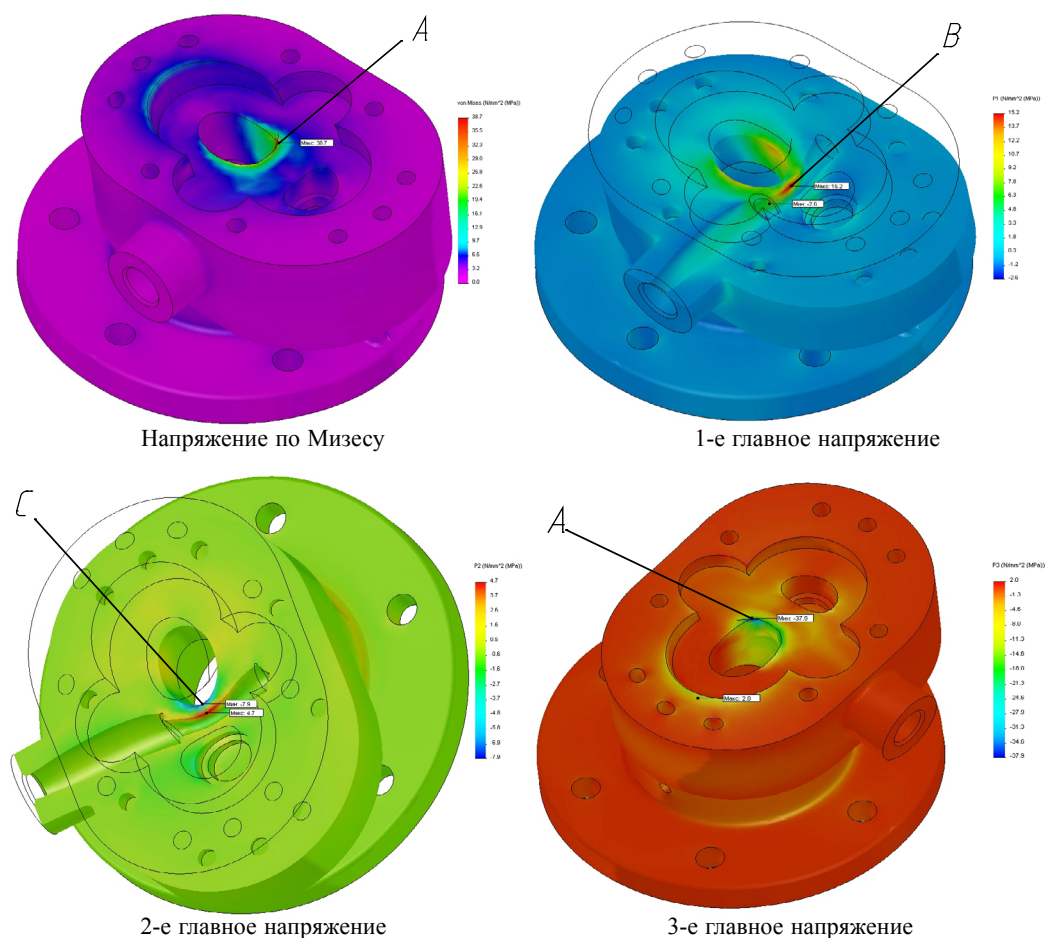


Рис. 4. Граничные условия в модели

Согласно табл. 1, максимальным напряжением в конструкции является напряжение по Мизесу. Однако критерий Мизеса при оценке прочности в данном случае применять нецелесообразно. Это объясняется тем, что при расчете коэффициента запаса прочности в качестве допускаемого напряжения будет принят минимальный предел прочности чугуна (σ_p – предел прочности при растяжении), в то время как максимальным из всех главных напряжений является σ_3 – третье главное напряжение (см. табл. 1). С учетом того, что для чугуна предел прочности при

сжатии ($\sigma_c = 572$ МПа) значительно превышает предел прочности при растяжении ($\sigma_p = 151$ МПа), очевидно, что получится заниженный коэффициент запаса прочности.

В данном случае целесообразно применение критерия Мора-Кулона, позволяющего оценить прочность материалов, обладающих разным сопротивлением растяжению и сжатию. Эпюра КЗП представлена на рис. 5.

Согласно рис. 5, минимальное значение КЗП составляет 9,19 в узле D. Напряжения в узле с минимальным КЗП представлены в табл. 2.

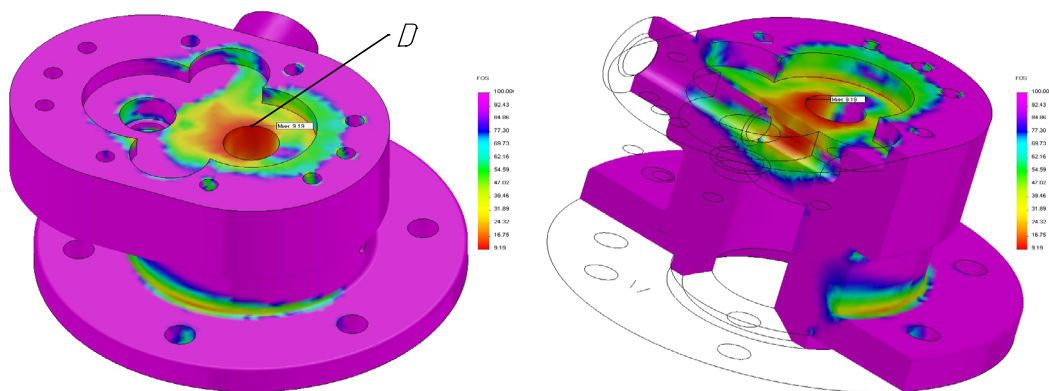


Рис. 5. Эпюра коэффициента запаса прочности

Таблица 2

Напряжения в узле с минимальным КЗП

Узел	Напряжение, МПа			
	$\sigma_{\text{эк}}$	σ_1	σ_2	σ_3
D	21	13,7	2,1	-10,5

Согласно табл. 2, ни одно из рассматриваемых напряжений в этом узле не является максимальным для конструкции (см. табл. 1). Этот факт подтверждает то, что недопустимо оценивать прочность, руководствуясь только максимальными значениями напряжений, без рассмотрения эпюры распределения КЗП.

Оценивая прочность корпуса, заметим, что область конструкции с минимальным КЗП не требует «усиления», поскольку значение КЗП является до-

статочным для заданных условий эксплуатации. Кроме того, в детали имеются значительные области со значением КЗП, стремящимся к бесконечности – ненагруженные участки конструкции.

Таким образом, результаты выполненного прочностного расчета могут являться ключевым аспектом при разработке новой конструкции детали, более рациональной, с точки зрения использования материала, в конкретных условиях эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Алямовский, А. А.** Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.
2. **Рыбкин, Е. А.** Шестеренные насосы для металлорежущих станков / Е. А. Рыбкин, А. А. Усов. – Москва : МашГиз, 1960. – 186 с.
3. **Чугунов, М. В.** САЕ-системы предварительного анализа объектов машиностроения. Часть 1 : Линейная статика / М. В. Чугунов. – Рузаевка : Рузаев. печатник, 2003. – 44 с.
4. **Юдин, Е. М.** Шестеренные насосы : Основные параметры и их расчет / Е. М. Юдин. – Москва : Машиностроение, 1964. – 234 с.
5. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.

Поступила 21.11.2013 г.

Об авторах:

Душин Игорь Федорович, ассистент кафедры общетехнических дисциплин Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), i.f.dushin@mail.ru

Маскайкина Светлана Егоровна, доцент кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов (МОСиК) Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), smaska63@mail.ru

Полуешина Наталья Ивановна, доцент кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов (МОСиК) Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), polueshina_ni@mail.ru

Ваваева Наталья Геннадьевна, студент ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), polueshina_ni@mail.ru

Для цитирования: Душин, И. Ф. Прочностной расчет корпуса шестеренного насоса с использованием SolidWorks Simulation / И. Ф. Душин [и др.] // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 154–160.

REFERENCES

1. Alyamovsky A. A. Inzhenernye raschety v SolidWorksSimulation [Engineering analysis in SolidWorksSimulation]. Moscow, DMK Press Publ., 2010, 464 p.
2. Rybkin E. A., Usov. A. A. Shesterennye nasosy dlja metallorezhushhih stankov [Gear pumps for metal-cutting machine tools]. Moscow, MashGiz Publ, 1960, 186 p.
3. Chugunov M. V. CAE-sistemy predvaritel'nogo analiza ob'ektov mashinostroenija. Chast' 1. Linejnaja statika [CAE-systems of the preliminary analysis of objects of mechanical engineering. A part 1. Linear statics]. Ruzaevka, Ruzaevskiy Pechatnik Publ., 2003, 44 p.
4. Yudin E. M. Shesterennye nasosy: Osnovnye parametry i ih raschet [Gear pumps: Basic parameters and their analysis]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 234 p.
5. Alyamovsky A. A., Sobachkin A. A., Odincov E. V., Haritonovich A. I., Ponomarev N. B. SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike [Computer modelling in an engineering practice]. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2008, 1040 p.

About the authors:

Dushin Igor' Fedorovich, teaching assistant of Technical Disciplines chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus) of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), i.f.dushin@mail.ru

Maskajkina Svetlana Egorovna, associate professor (docent) of Machine Tools and Systems chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus) of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), smaska63@mail.ru

Polueshina Natal'ja Ivanovna, associate professor (docent) of Machine Tools and Systems chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus) of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), polueshina_ni@mail.ru

Vavaeva Natal'ja Gennad'evna, student of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), polueshina_ni@mail.ru

For citation: Dushin I. F., Maskajkina S. E., Polueshina N. I., Vavaeva N. G. Prochnostnoj raschet korpusa shesterennogo nasosa s ispol'zovaniem SolidWorks Simulation [Strength prediction for gear pump using SolidWorks simulation]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 154 – 160.

ПОСТПРОЦЕССОР СИСТЕМЫ ЧПУ «МАЯК 600Т» ДЛЯ САМ-ПРИЛОЖЕНИЯ «МОДУЛЬ ЧПУ» ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА»

А. В. Щёкин, С. П. Сульдин, Э. В. Митин

В статье представлен способ постпроцессирования, обеспечивающий эффективную возможность включения в управляющую программу токарных циклов систем ЧПУ; рассматривается возможность автоматической разбивки области припуска на геометрические фигуры станочных циклов.

Ключевые слова: САМ-система, КОМПАС-3D, управляющая программа, постпроцессор, станочный цикл, режущий инструмент, твердотельная модель, Python, визуализация.

POST-PROCESSOR OF NC SYSTEM «MAYAK 600T» FOR CAM-APPLICATION

A. V. Schekin, S. P. Suldin, E. V. Mitin

This article describes a method for post-processing, which provides an efficient opportunity of including machine cycles in NC-programs. We have considered the possibility of the automated breakdown of machining allowance to geometrical figures of machine cycles.

Keywords: CAM, KOMPAS-3D, NC-program, post-processor, machine cycle, cutting tool, 3D-model, Python, visualization.

«Модуль ЧПУ. Токарная обработка» [1; 3–4] – это первая прикладная библиотека для системы КОМПАС-3D в области автоматизации разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. Библиотека разработана с использованием инструментальных средств API системы КОМПАС-3D и полностью интегрирована в его рабочую среду. Приложение работает с конструкторской моделью детали, построенной в системе КОМПАС-3D, и поддерживает все этапы создания управляющей программы для токарного станка, а именно:

- визуальное формирование контуров обработки в окне КОМПАС-3D;
- генерация управляющей программы в промежуточном формате;
- постпроцессирование;
- симуляция и контроль процесса обработки.

На этапе постпроцессирования осуществляется перевод управляющей

программы с промежуточного языка ЧПУ, принятого внутри САМ-системы, на язык конкретной стойки управления станком, который выполняется с помощью специальной программы – постпроцессора. Все САМ-системы вынуждены поддерживать постпроцессирование, так как производители систем ЧПУ не приняли единого стандарта кодировки. В библиотеке в качестве промежуточного языка выбран стандарт ISO 7bit, понятный большинству технологов и операторов станков с ЧПУ. Стандарт ISO 7bit – это советский ГОСТ 20999-83, который после развала отечественного станкостроения прекратил свое развитие. Аналогичный международный стандарт известен как ISO 6983 (в Германии – DIN 66025).

В библиотеке «Модуль ЧПУ...» постпроцессор представляет собой скрипт на

языке программирования Python. Язык Python является свободным и бесплатным средством для написания Web-приложений, а в данной библиотеке он нашел применение для разработки постпроцессоров в форме скриптов с открытым кодом. На вход скрипта поступает исходный файл программы в промежуточном коде, запускается интерпретатор языка Python, и скрипт, анализируя исходные кадры программы, выдает программу в кодах системы ЧПУ.

Одним из таких скриптов является постпроцессор для системы ЧПУ «Маяк 600Т» [2]. Данная система ЧПУ является одной из распространенных в России, устанавливается на токарные станки, фрезерные и токарно-фрезерные обрабатывающие центры. Структура постпроцессора включает в себя блок описания машинных циклов, функции получения кадров из исходного файла, формирования записей циклов и вывода кадров в выходной файл.

Библиотека «Модуль ЧПУ...» позволяет включать в управляющую программу токарные, токарно-сверлильные и резбонарезные циклы систем ЧПУ.

Для этого цикл должен быть описан в начале постпроцессора в специальном блоке комментария, предназначенном для описания машинных циклов (рис. 1). В постпроцессоре системы «Маяк 600Т» описаны следующие циклы для токарных станков:

G33 – многопроходный цикл нарезания резьбы резцом;

G73 – цикл нарезания торцевых (спиральных) резьб;

G83 – цикл нарезания резьбы вдоль оси Z;

G133 – цикл нарезания резьбы плашкой/метчиком;

G75 – цикл нарезания резьбы плашкой/метчиком;

G72 – цикл многопроходного точения с продольной подачей;

G81 – цикл многопроходного точения с продольной подачей;

G82 – цикл подрезки торцев;

G71 – профильный цикл продольного точения;

G77 – профильный цикл поперечного точения;

G74 – универсальный цикл глубокого сверления;

G84 – цикл сверления глубокого отверстия.

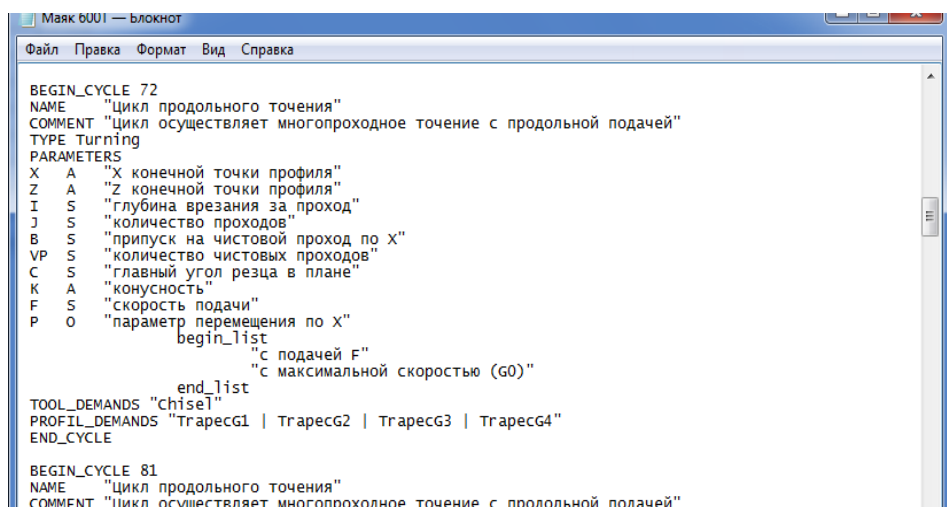


Рис. 1. Блок описания циклов в постпроцессоре «Маяк 600Т»

После описания в постпроцессоре циклы системы ЧПУ становятся доступными на панели свойств библиотеки (рис. 2).

На рисунке также представлен пользовательский интерфейс библиотеки, встроенный в окно системы КОМПАС-3D.

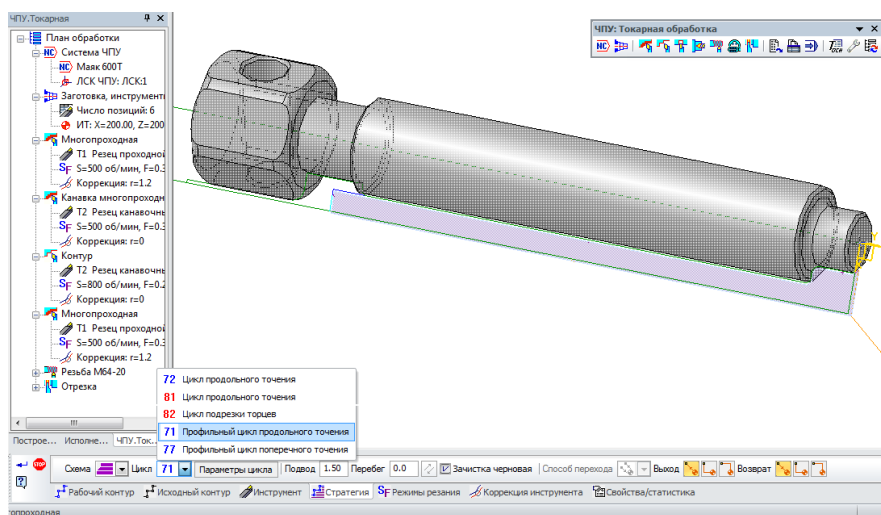


Рис. 2. Выбор токарного цикла системы ЧПУ «Маяк 600Т»

Конвертация программы из промежуточного языка в коды системы ЧПУ выполняется в момент запуска команды библиотеки «Программа ЧПУ» сразу

после генерации промежуточного кода (рис. 3). Полученная программа может быть сохранена в файл и отправлена на станок с ЧПУ.

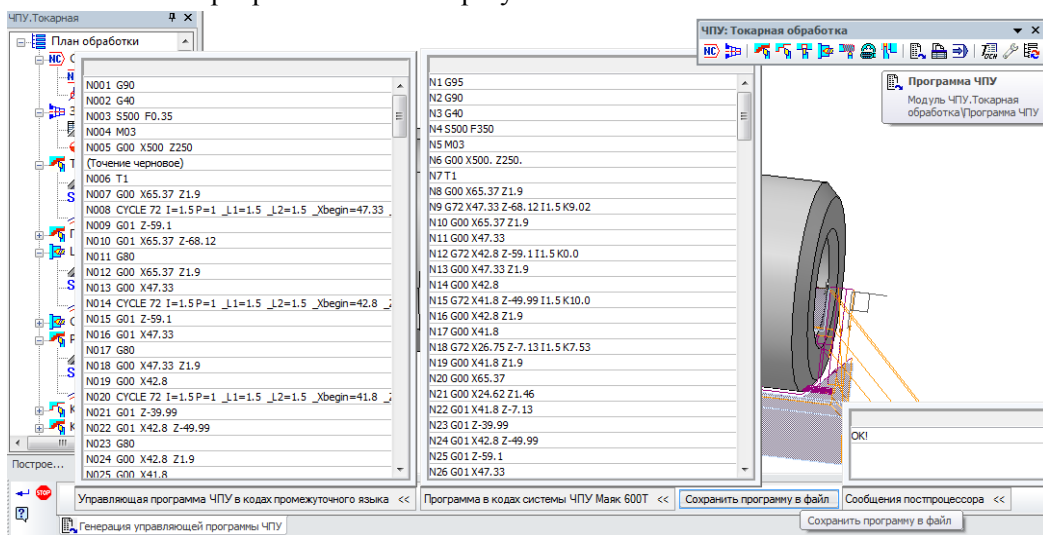


Рис. 3. Генерация программы ЧПУ

Во время конвертации постпроцессор проверяет корректность введенных пользователем параметров, допустимость контуров для обработки в циклах и формирует запись кадров на языке системы ЧПУ «Маяк 600Т». В зависимости от длины программы и производи-

тельности компьютера конвертация занимает от одной до нескольких секунд.

Работоспособность постпроцессора проверялась на токарном станке 16K20Ф3 на кафедре металлообрабатывающих станков и комплексов Мордовского государственного университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авторское свидетельство 2013611436 Российская Федерация. Модуль ЧПУ. Токарная обработка / А. В. Щёкин [и др.]. – № 2013611436 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 09.01.2013, Бюл. № 1. – 36 с. : ил.
2. Авторское свидетельство 2013616308 Российская Федерация. Постпроцессор для системы ЧПУ «Маяк 600 Т» / А. В. Щёкин [и др.]. – № 2013611898 ; заявл. 05.03.2013 ; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 9. – 18 с.
3. **Паньков, М.** Токарная обработка как начало САМ-истории в АСКОН / М. Паньков // САПР и графика. – №7. – 2013. – С. 37–43.
4. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ [Электронный ресурс]. – URL: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/items/?prcid=89&prpid=1217>.

Поступила 21.11.2013 г.

Об авторах:

Щёкин Александр Васильевич, инженер кафедры МРСиК Рузаевского института машиностроения (филиал) ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), Schekin@inbox.ru

Сульдин Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов Рузаевского института машиностроения (филиал) ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), rimstanok@mail.ru

Митин Эдуард Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Рузаевского института машиностроения (филиал) ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), rimnauka@rambler.ru

Для цитирования: Щёкин, А. В. Постпроцессор системы ЧПУ «МАЯК 600Т» для САМ-приложения «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» / А. В. Щёкин, С. П. Сульдин, Э. В. Митин // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 161–164.

REFERENCES

1. Schekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V. Avtorskoe svidetelstvo 2013611436 Rossyiskaya Federazia. Module CPU. Tokarnaya obrabotka [Certificate of authorship 2013611436. Russia. Module CNC. Turning], no. 2013611436, yayavl. 26.11.2012 ; opubl. 09.01.2013, Bul. no 1, 368s. : il.
2. Schekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V. Avtorskoe svidetelstvo 2013616308 Rossyiskaya Federazia. Postprocessor dlya system CPU Mayak 600T [Certificate of authorship 2013616308. Russia. Post-processor fore the control system 600T Lighthouse], no. 2013611898, yayavl. 05.03.2013, opubl. 20.09.2013, Bul. no. 9., 18s. : il.
3. Pankov, M. Tokarnaja obrabotka kak nachalo CAM-istorii v ASKON [Turning as the beginning of history in the CAM- ASCON]. *SAPR i grafika* – CAD and graphics. 2013, no. 7, pp. 37 – 43.
4. Modul' ChPU. Tokarnaja obrabotka [CNC module. Lathe machining]. Available at: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/items/?prcid=89&prpid=1217> .

About the authors:

Shhjokin Aleksandr Vasil'evich, engineer of Machine Tools and Systems chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus) of Ogarev Mordovia State University (Ruzaevka, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Engineering sciences, docent, Schekin@inbox.ru

Sul'din Sergej Petrovich, associate professor (docent) of Machine Tools and Systems chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus) of Ogarev Mordovia State University (Ruzaevka, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Engineering sciences, docent, rimstanok@mail.ru

Mitin Jeduard Valer'evich, engineer of Engineering Technology chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus) of Ogarev Mordovia State University (Ruzaevka, Russia), Kandidat Nauk degree holder in Engineering sciences, docent, rimnauka@rambler.ru

For citation: Schekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V. Postprocessor sistemy ChPU «MAJaK 600T» dlja CAM-prilozhenija «Modul' ChPU. Tokarnaja obrabotka» [Post-processor of NC system «MAJaK 600T» for CAM-application]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 161 – 164.

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ИНФОРМАЦИИ В ЛОКАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ ГИБКОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. М. Коленченко, Е. Н. Коленченко

В статье на основе аналитической модели сети, описываемой разностными стохастическими уравнениями состояния, указаны пути реализации динамических методов управления сетью: оптимального динамического управления распределением потоков информации по локальной сети, управления объемом входных потоков информации и управления топологией сети, что свидетельствует об универсальности данной модели и возможности построения на ее основе алгоритмов оптимального динамического управления третьего (сетевого) уровня по стандарту OSI.

Ключевые слова: локальная сеть, аналитическая модель сети, оптимальное динамическое управление, потоки информации, маршрутизация, топология сети, алгоритм.

CONTROL OF DATA FLOW IN THE LOCAL INDUSTRIAL NET OF FLEXIBLE AUTOMATIC PRODUCTION

A. M. Kolenchenko, E. N. Kolenchenko

In this article we have specified methods of network controlling realization on the basis of the analytical model of a network, which is described with the help of different stochastic state equations. Ways of implementation of dynamic methods of network management are shown. Those methods are: optimal dynamic controlling of data flows distribution in local network, the controlling of volume of entering data flows (management of access to a network) and management of network topology. All this testifies to the universality of given model and to the possibility of developing the algorithm of optimal dynamic management of the third (network) level according to the OSI standard on this basis.

Keywords: local network, analytical network model, optimal dynamic management, data flows, routing, network topology, algorithm.

В условиях гибкого автоматического производства (ГАП) реализуются безлюдные технологии, требующие автоматического поддержания заданного качества изготавливаемой продукции. Для недопущения снижения качества изготавливаемой продукции в ГАП реализуется непрерывный технический контроль качества выпускаемой продукции. Очевидно, что текущее отслеживание выполнения требуемых параметров работы автоматического оборудования, сделанных наладок и настроек требует передачи по локальной промышленной сети значительных объемов информации, поступающих в сеть от датчиков

автоматического оборудования и от вычислительных средств, управляющих процессом. Время реакции исполнительных органов автоматического оборудования, отвечающего за выполнение технических требований к выпускаемой продукции, зависит от времени и надежности передачи основной и служебной информации по локальной сети. Это, в свою очередь, зависит от эффективности реализованных на сети алгоритмов управления потоками информации.

Объектами управления в локальной промышленной сети являются ЭВМ (как в локальной вычислительной сети), а также локальные системы управления

(например, гибкие автоматизированные модули, станки с ЧПУ, роботизированные комплексы, автоматизированные транспортные системы), специализированные датчики информации и др. Для реализации технологических процессов и процессов управления потоками информации используется программное обеспечение управляющих ЭВМ (серверов), микроЭВМ, процессорных устройств оборудования с ЧПУ и др. Объекты сети (используя терминологию из теории информации, будем называть их узлами) соединены между собой с помощью передаточной среды (витой пары, коаксиального или оптоволоконного кабеля, которые будем называть линиями связи или ветвями).

Динамические методы управления третьего (сетевого) уровня по стандарту OSI «Эталонная модель соединения открытых систем» делятся на три группы, реализующие:

- управление объемом входных потоков информации, поступающих в сеть (управление доступом);
- управление распределением потоков информации, находящихся в сети (управление маршрутизацией информации, находящейся в сети);
- управление топологией (структурой) сети.

Данные методы обеспечивают функционирование сети в заданном режиме с соблюдением необходимых качественных требований при минимальных материальных затратах.

В [1, с. 115–118] разработана аналитическая модель локальной вычислительной сети, на основе которой решена задача реализации оптимального динамического управления распределением потоков информации, находящихся в сети. Покажем, что построенная модель является универсальной и позволяет, в частности, учесть управление объемом поступающей в сеть информации и топологией сети.

Пусть $G = \{I, J\}$ – связанный граф, описывающий допустимую топологию сети, где I – множество узлов, J – допу-

стимое множество ветвей (линий связи, соединяющих два узла). Множество J строится допустимым, чтобы исключить петли и эффект пинг-понга в путях передачи информации. Здесь и далее под допустимой топологией сети понимается такая топология, в которой путем ограничения использования ряда ветвей (исключения их и состоящих из них путей передачи информации) обеспечивается отсутствие петель и эффекта пинг-понга во всех остальных путях передачи информации. Обозначим $M_{p,q}(m)$ – множество путей без петель из узла $p \in I$ в узел $q \in I$ «длины» m , $m = 1, 2, \dots$ (под длиной пути понимается число ветвей, содержащихся в этом пути) графа $\{I, J\}$. Существуют стандартные алгоритмы построения этого множества. Обозначим через $a_{p,q}(m)$, $m = 1, 2, \dots$ множество ветвей, образующее множество путей $M_{p,q}(m)$. Предположим, что

$$A_{p,q}(k) = \bigcup_{m=1}^k a_{p,q}(m), \text{ где } k - \text{максимально}$$

допустимая длина пути. Множество $D_{p,q}(i) = \{j : ij \in A_{p,q}(k)\}$ и множество

$$D_{p,q}^{-1}(i) = \{j : ji \in A_{p,q}(k)\}$$

содержат номера узлов, принадлежащие допустимым путям, в которые, соответственно, возможна передача информации типа p, q из узла $i \in I$ и из которых возможен прием информации типа p, q в узел $i \in I$. Эти множества не содержат сочетаний индексов $p = q, i = j, j = p, i = q$. Множества $B_{ij} = \{p, q : ij \in A_{p,q}(k), p, q \in I\}$ и $B_{ji} = \{p, q : ji \in A_{p,q}(k), p, q \in I\}$ содержат номера пар узлов p, q сети, между которыми возможна передача информации с использованием ветви ij и ji соответственно.

Пусть на графе $G = \{I, J\}$ сети в моменты времени $\{t_n\}$, $n = 0, 1, \dots$, $(t_{n+1} - t_n = \tau \text{ для } \forall n)$ заданы уравнения движения информации в сети (предполагается, что время распространения сигналов в каналах связи и время обработки сообщений в вычислительных

устройствах сети в сумме не превосходят величины τ):

$$\begin{cases} x_i^{p,q}(n+1) = \\ = \left[x_i^{p,q}(n) + \sum_{k \in D_{p,q}^{-1}(i)} u_{ki}^{p,q}(n) - \sum_{k \in D_{p,q}(i)} u_{ik}^{p,q}(n) \right]^+ + \\ + \delta(p-i)Q_{i,q}(n+1), \\ x_q^{p,q}(n+1) \equiv 0, \quad n = 0, 1, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями $\{x_i^{p,q}(0)\}$ и ограничениями:

$$\begin{aligned} \sum_{p,q \in B_{ij}} u_{ij}^{p,q}(n) + \sum_{p,q \in B_{ji}} u_{ji}^{p,q}(n) &\leq C_{ij}; \\ u_{ij}^{p,q}(n) &\geq 0; \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad i, p, q \in I. \end{aligned}$$

Здесь $u_{ij}(n) = \{u_{ij}^{p,q}(n) : p, q \in I\}$ – система управлений ветвью $ij \in J$ в момент времени n ; C_{ij} – пропускная способность ветви $ij \in J$; $\delta(\cdot)$ – символ Кронекера.

Для сетей с ограниченными объемами буферных накопителей должны быть введены дополнительные ограничения:

$$x_i^{p,q}(n) \leq R_i \quad \text{для } \forall \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где R_i – объем буферного накопителя i -го узла.

Отсутствие в правой части уравнения состояния системы (1) величины $\lambda_{p,q}$ связано с тем, что скорость вывода информации из сети считается равной бесконечности (т. е. $\lambda_{p,q} = \infty$). Очевидно, что исключение из данного уравнения величины $\lambda_{p,q}$ с необходимостью приводит к записи в системе (1) равенства типа тождество $x_q^{p,q} \equiv 0$.

Необходимо найти последовательность управлений $u_{ij}(n) = \{u_{ij}^{p,q}(n) : p, q \in I\}$, $n = 0, 1, 2, \dots$, такую, чтобы время задержки информации, поступившей в сеть в момент времени n , было минимальным. В [2] на данной модели решена задача синтеза оптимальных управлений распределением потоков информации в сети.

Данная модель, наряду с управлением потоками, находящимися в сети, позволяет также учесть управление входными потоками, например, изоритмический метод управления, аналогичный применяемой в промышленной сети ДН-485 маркерной процедуре управления доступом в сеть.

Действительно, пусть N – общий пул «разрешений», циркулирующих в сети. Если компоненту входного потока $Q_{i,q}(n+1)$, находящуюся в правой части уравнения баланса, умножить на величину $1 \left(N_i(n) - \sum_{p,q \in I} x_i^{p,q}(n) \right)$,

где $N_i(n) = N_i((n), Y_i(n)) + M_i$ – пул «разрешений» в i -м центре сети в момент времени n , сформированный под действием служебной информации $Y_i(n)$ (M_i – постоянная составляющая пула «разрешений» в i -м центре сети, в более общем случае некоторая случайная величина), причем всегда $\sum_{i \in I} N_i(n) = N$

для $\forall n = 0, 1, 2, \dots$, то данное уравнение баланса наряду с учетом управления распределением потоков информации по сети учитывает также управление объемом поступающей информации (через управление пулом «разрешений»):

$$\begin{aligned} x_i^{p,q}(n+1) &= \\ &= \left[x_i^{p,q}(n) + \sum_{k \in D_{p,q}^{-1}(i)} u_{ki}^{p,q}(n) - \sum_{k \in D_{p,q}(i)} u_{ik}^{p,q}(n) \right]^+ + \\ &+ \delta(p-i) \cdot 1 \left(N_i(n) - \sum_{p,q \in I} x_i^{p,q}(n) \right) \times Q_{i,q}(n+1), \\ i, p, q &\in I. \end{aligned}$$

Если на каждом узле сети пул «разрешений» закреплен, то величина $\sum_{i \in I} N_i((n), Y_i(n)) = 0$, а общий пул «разрешений» равен $N = \sum_{i \in I} M_i$.

Покажем, как на данной модели сети может быть реализовано управле-

ние топологией сети, служащее для перераспределения имеющегося ресурса каналов сети в соответствии с поступившими требованиями на обслуживание. Управление топологией сети применяется при возникновении аварийных ситуаций, приводящих к появлению отдельных изолированных локальных систем управления или целых групп данных объектов, а также в случае введения в строй новых или отключения существующих объектов управления.

Так как управление изменением топологии сети должно учитывать сравнительно «медленные» изменения в нагрузочных характеристиках сети, то естественно динамику входного потока описывать как динамику появления (в случайные моменты времени) групп требований случайного объема. В одну группу требований входят требования, поступившие в интервале времени, меньшем некоторого числа (величина этого числа здесь не существенна). При этом моменты появления групп требований трактуются как моменты появления скачка в соответствующем марковском процессе, а величина скачка – как число каналов, требуемых для обслуживания данной группы.

Пусть $Q_{p,q}(n)$ – число групп требований типа p, q (т. е. требований на установление путей передачи информации из узла-источника $p \in I$ до узла-приемника $q \in I$), поступивших в сеть в момент времени n . Пусть также C – общее число каналов, которые могут быть использованы во всех ветвях сети (общий ресурс сети). Механизм распределения каналов в данном случае не детализируется (например, это может быть кроссирование отдельных каналов).

Обозначим $v_{ij} = \{v_{ij}^{p,q} : p, q \in I\}$, $ij \in J$ – систему каналов (множество управлений на сети), необходимых для обслуживания множества требований $\{Q_{p,q}(n), p, q \in I\}$, кажда компонента которой

$v_{ij}^{p,q} = v_{ij}^{p,q}(n, Y_i(n))$ – часть общего ресурса

сети, отводимая в момент времени n для обслуживания требований на установление путей передачи информации из активного узла-источника $p \in I$ в узел назначения $q \in I$ по ветви $ij \in J$ под действием служебной информации $Y_i(n)$, находящейся в данный момент времени в узле $i \in I$. Функции $v_{ij}^{p,q}(n, Y_i(n))$ таковы, что

$$v_{ij}^{p,q} \geq 0, \quad \sum_{ij \in J} \left(\sum_{p, q \in B_{ij}} v_{ij}^{p,q} + \sum_{p, q \in B_{ji}} v_{ji}^{p,q} \right) \leq C, \\ ij \in J, \quad p, q \in I.$$

Обозначим через $x_i^{p,q}(n)$ – число каналов в ветвях, исходящих из узла $i \in I$, которые в момент времени n предназначены для передачи информации из узла $p \in I$ в узел $q \in I$. Очевидно, что разностное стохастическое уравнение состояния сети для случая управления топологией сети будет иметь вид, аналогичный (1):

$$x_i^{p,q}(n+1) = \\ = \left[x_i^{p,q}(n) + \sum_{k \in D_{p,q}^{-1}(i)} v_{ki}^{p,q}(n) - \sum_{k \in D_{p,q}(i)} v_{ik}^{p,q}(n) \right]^+ + \\ + \delta(p-i)Q_{i,q}(n+1), \quad i, p, q \in I.$$

Здесь $\sum_{k \in D_{p,q}^{-1}(i)} v_{ki}^{p,q}(n)$ – количество каналов в ветви $ki \in J$, которые в момент времени n из соседних узлов k выделяются в направлении узла i сети на организацию связей для передачи информации типа p, q под действием служебной информации $Y_k(n)$, находящейся в узле k сети; $\sum_{k \in D_{p,q}(i)} v_{ik}^{p,q}(n)$ – количество кана-

лов в ветви $ik \in J$, которые в момент времени n из узла i выделяются в направлении узла k сети для передачи информации типа p, q под действием служебной информации $Y_i(n)$.

Таким образом, показано, как на основе модели сети, описываемой раз-

ностными стохастическими уравнениями состояния, можно учесть не только управление входными потоками и потоками, находящимися в сети, но и управление перераспределением каналов ветвей, что является частным случаем управления топологией сети.

Универсальность данной модели доказывает возможность реализации с ее помощью алгоритмов оптимального

динамического управления входными потоками, сетевыми потоками [1] и топологией сети. В последующем с помощью модели сети, описанной в данной работе, авторы ставят задачу разработки алгоритма оптимального динамического управления топологией сети, являющегося, по сути, алгоритмом синтеза оптимальной топологии сети на каждом шаге дискретного времени n .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Коленченко, А. М.** Алгоритм оптимального динамического управления распределением потоков информации в нестационарной сети / А. М. Коленченко, Е. Н. Коленченко // Организационные, философские и технические проблемы современных машиностроительных производств : материалы IV научно-практической конференции. – Рузаевка, 2005. – С.115–118.

2. **Коленченко, А. М.** Реализация алгоритма оптимального динамического управления нестационарной сетью / А. М. Коленченко, Е. Н. Коленченко // Организационные, философские и технические проблемы современных машиностроительных производств: материалы IV научно-практической конференции. – Рузаевка, 2005. – С. 122–127.

Поступила 21.11.2013 г.

Об авторах:

Коленченко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин Рузаевского института машиностроения (филиал) ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Рузаевка, Россия), kamrim1953@yandex.ru

Коленченко Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры общеобразовательных и профессиональных дисциплин филиала Самарского государственного университета путей сообщений в г. Рузаевке (г. Рузаевка, Россия), e_kolenchenko@mail.ru

Для цитирования: Коленченко, А. М. Управление потоками информации в локальной промышленной сети гибкого автоматического производства / А. М. Коленченко, Е. Н. Коленченко // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 165–170.

REFERENCES

1. Kolenchenko A. M., Kolenchenko E. N. Algorithm optimal'nogo dinamicheskogo upravleniya raspredeleniem potokov informatsii v nestatsionarnoi seti [Algorithm of optimal dynamic control of flows distribution of information in a non-stationary network]. *Materialy IV nauchno-practicheskoy konferentsii «Organizatsionnye, filosofskie i tekhnicheskie problemy sovremennykh mashinostroitel'nykh proizvodstv»* – Materials of IV academic conference “Organizational, philosophical and technical problems of modern machine building enterprises”. Ruzaevka, 2005, pp. 115 – 118.

2. Kolenchenko A. M., Kolenchenko E. N. Realizatsiya algoritma optimal'nogo dinamicheskogo upravleniya nestatsionarnoi set'yu. [Realization of algorithm of optimal dynamic control of a non-stationary network]. *Materialy IV nauchno-practicheskoy konferentsii «Organizatsionnye, filosofskie i tekhnicheskie problemy sovremennykh mashinostroitel'nykh proizvodstv»* – Materials of IV scientific conference “Organizational, philosophical and technical problems of modern machine building enterprises”. Ruzaevka, 2005, pp. 122 – 127.

About the authors:

Kolenchenko Aleksandr Mihailovich, associate professor (docent) of General Technical Disciplines chair of Machine Building Institute (Ruzayevka campus), Ogarev Mordovia State University (Ruzaevka, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, kamrim1953@rumbler.ru

Kolenchenko Elena Nikolaevna, senior lecturer of General Educational and Professional Disciplines chair of Samara State Transport University (Ruzaevka campus) (Ruzaevka, Russia), e_kolenchenko@mail.ru

For citation: Kolenchenko A. M., Kolenchenko E. N. Upravlenie potokami informacii v lokal'noj promyshlennoj seti gibkogo avtomaticheskogo proizvodstva [The controlling of data flow in the local industrial net of flexible automatic production]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 165 – 170.

УДК 628.95:681.5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ

И. И. Байнева, В. В. Байнев

В статье рассмотрены особенности световых приборов, светоперераспределяющих устройств; проанализированы задачи и возможные решения их расчета и проектирования; описаны математические модели, используемые в светотехническом проектировании и расчетах светильников с зеркальными отражателями, а также принципы работы с программным обеспечением для автоматизированной системы разработки световых приборов.

Ключевые слова: автоматизированная система, моделирование, проектирование, программа, световой прибор, отражатель, энергоэффективность.

AUTOMATED SYSTEM FOR DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT LIGHT DEVICES

I. I. Bayneva, V. V. Baynev

The article describes the features of the light devices, light-distributing devices, analyzes the problem and possible solutions for their calculation and design, considers the mathematical models used in the light and luminaire design with the mirror reflectors, the principles of work with the created software for the automated modeling and design of the light devices.

Keywords: automatic system, modeling, design, program, light devices, reflector, energy efficiency.

Световой прибор (СП) является сложным изделием, состоящим из взаимосвязанных элементов: источников света (ИС), пускорегулирующей аппаратуры, электроустановочных устройств, конструктивных узлов, оптической системы, теплоотводящих элементов. Их параметры существенно зависят от особенностей конструкции СП и заметно влияют на его характеристики в целом.

Уровень конструирования СП имеет важное значение в связи со следующими аспектами:

- массовый характер производства и применения СП;
- значительные материальные и трудовые затраты, требуемые для их изготовления, монтажа и эксплуатации;
- большое влияние СП на технико-экономические и эстетические характеристики строящихся и реконструируемых объектов;
- процесс конструирования и проектирования оказывает решающее влияние на потребительские свойства СП, а также экономичность производства и эксплуатации [1].

При этом необходимо отметить основные направления деятельности разработчиков СП:

- создание светильников с максимальной световой отдачей;
- создание светильников с заданной кривой светораспределения;
- увеличение модельного ряда светильников с учетом запросов потребителя.

Задачей светотехнического расчета СП, в том числе светильников, является определение геометрической формы элементов их оптической системы, обеспечивающей (при совместном действии с выбранным ИС) требуемое светораспределение [1]. При расчете должны быть учтены особенности как светотехнических материалов, используемых для изготовления элементов оптической системы, так и технологических процессов их производства, а также условия работы этих элементов с точки

зрения воздействия на них теплового режима СП и окружающей среды [2; 3].

Светильники с зеркальными отражателями по своим светотехническим возможностям превосходят другие приборы этого класса, являются более универсальными. Они обладают наибольшим КПД и достаточно технологичны. С помощью отражателя зеркальный светильник должен обеспечивать заданную форму КСС, исходя из определенной формы КСС ИС.

Для расчета формы зеркального отражателя необходимо иметь уравнение, определяющее зависимость величины радиус-вектора r некоторой точки M от углов φ и ψ (в продольной и поперечной плоскостях), определяющих падающий луч, и углов α и β (также в продольной и поперечной плоскостях), определяющих отраженный луч (рис. 1). Дифференциальное уравнение зеркального отражателя связывает воедино все требуемые параметры [1].

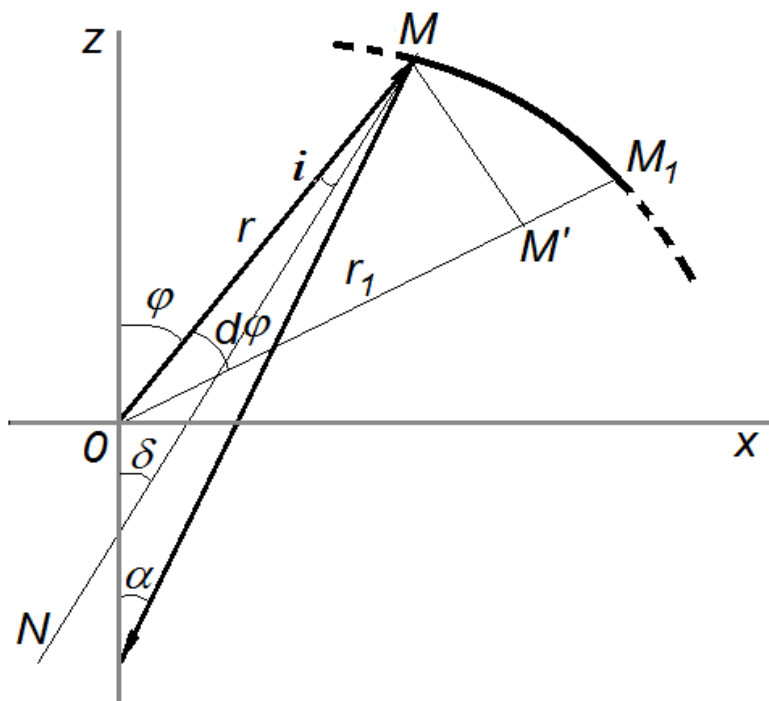


Рис. 1. Участок отражателя с падающим, отраженным и вспомогательными лучами

В случае зеркальной поверхности с тороидными зонами профильная кривая составляется из зон постоянной кривизны ($1/R$), имеющих общие нормали в граничных точках, т. е. отрезков сопряженных дуг с радиусом кривизны R и координатами центра кривизны (X_u, Z_u) как функции ($r_i, r_{i-1}, \varphi_i, \varphi_{i-1}, \delta_i, \delta_{i-1}$). Эти дуги определяются следующими уравнениями:

$$R = \frac{r_{i-1} \cos \phi_{i-1} - r_i \cos \phi_i}{\cos \delta_{i-1} - \cos \delta_i}, \quad (1)$$

$$X_u = X_{i-1} - R \sin \delta_{i-1}, \quad (2)$$

$$Z_u = Z_i - R \cos \delta_i. \quad (3)$$

В некоторых случаях целесообразно образовывать зеркальные поверхности вращением профильных кривых с плавно изменяющейся кривизной. При этом их параметры должны соответствовать необходимой функции $\alpha(\phi)$. В качестве профильных могут быть выбраны кривые 2-го порядка – конические сечения (эллипс, гипербола, парабола).

В случае составления поверхности зеркального круглосимметричного отражателя из параболоидных поясов такая кривая имеет точки излома, при переходе через которые угол α меняется скачкообразно. Для избежания этого требуется соединить точки границ зон зеркальной кривой, что приводит к введению дополнительных уравнений:

$$r_i = r_{i-1} \frac{1 + \cos(\phi_{i-1} - \alpha_i)}{1 + \cos(\phi_i - \alpha_i)}. \quad (4)$$

Расчет зеркальных светильников с ИС с большими светящими телами (люминесцентные лампы, дуговые ртутные лампы и др.) имеет свои сложности и особенности. Как правило, светораспределение зеркального цилиндрического светильника задается в виде КСС в профильной плоскости, а зеркальная поверхность для зеркального люминес-

центного светильника является гладкой и имеет параболический профиль.

Нередко профиль отражателя подбирается под требуемую КСС экспериментально. Поскольку он зависит от нескольких параметров, а изготовление отражателей разных форм и размеров является затруднительным, целесообразно математическое моделирование отражателя с помощью ЭВМ.

Необходимо использовать автоматизированные системы проектирования на всех стадиях разработки СП, чтобы избавить конструктора от выполнения трудоемких расчетов, многофакторного анализа и большого объема графических работ. Предлагаемое программное обеспечение для автоматизированной системы осуществляет моделирование, расчет, проектирование и комплексную разработку СП [4–6].

Принцип построения автоматизированной системы моделирования и проектирования СП (далее – система) имеет модульную структуру, где каждый из программных блоков (модулей) независимо от остальных решает свою детерминированную задачу. Математические аспекты системы включают в себя модели проектируемых СП, а также методы и алгоритмы расчетов, используемых при автоматизированном проектировании.

Для моделирования отражения луча от элементарной части отражателя используются стандартные алгебраические и геометрические приемы расчета, которые занимают незначительное количество процессорного времени. В случае моделирования отражателя, состоящего из большого количества элементарных частей, возникает необходимость быстрого нахождения конкретной части по заданным начальным координатам хода луча.

Простейшим вариантом решения этой задачи является линейный перебор всех частей, который имеет сложность $O(N)$, что существенно снижает общую скорость вычислений. В связи с этим была разработана система параллельной индексации с помощью двух самобалансирующихся красно-

черных деревьев, у которых максимальная сложность поиска равна $O(\ln N)$. Одно дерево упорядочивает части отражателя в горизонтальном направлении, другое – в вертикальном. Таким образом, значительно увеличивается скорость поиска нужной части для начала расчета хода луча по двум заданным начальным координатам.

В программе во время вычислений используются такие разделяемые «ресурсы», как таблицы ИС, частей отражателя, значений силы света, база данных материалов и др.

Исходными данными для работы с программой LighTooLux 1.1 являются:

– требуемое светораспределение;

– тип ИС;
– количество и расположение ИС;
– оптические коэффициенты материалов светоперераспределяющей системы;

– полезный угол излучения прибора.

Работа с программой, главное окно которой представлено на рис. 2, выполняется пошагово.

На первом этапе необходимо смоделировать оптическую систему разрабатываемого СП и выбрать ИС. Поскольку ИС также участвуют в перераспределении световых лучей, то обязательно задаются их точные размеры.

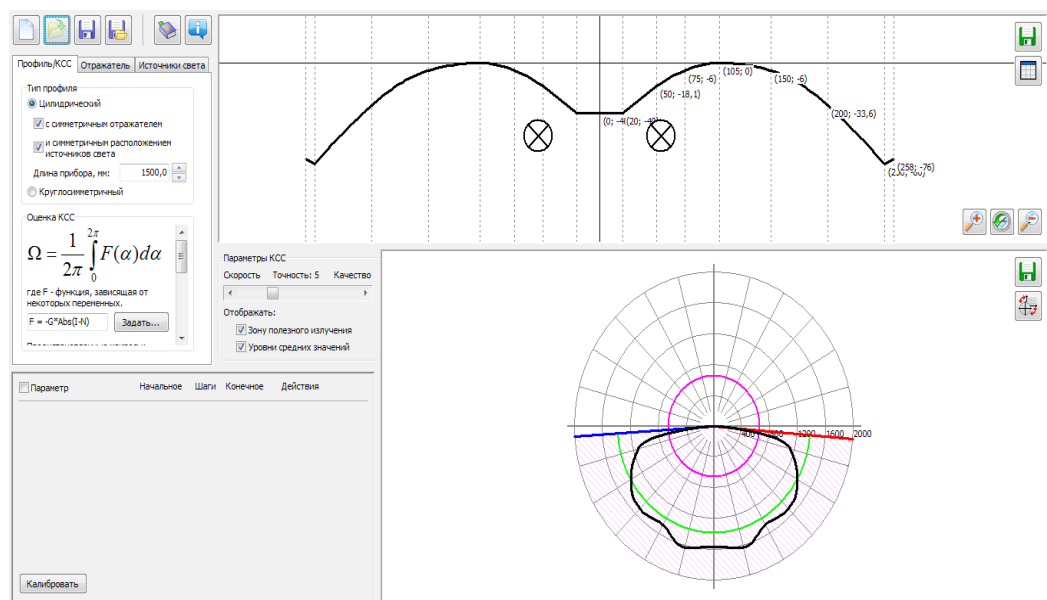


Рис. 2. Рабочее окно программы LighTooLux 1.1

Тип профиля может быть круглосимметричным или цилиндрическим. При задании последнего выбираются такие условия его исполнения, как с симметричным отражателем, с симметричным расположением ИС.

В программе заложены следующие стандартные (предустановленные) способы оценки КСС:

– максимизация светового потока;
– максимизация светового потока внутри полезного угла излучения;

– выравнивание КСС внутри полезного угла излучения;

– максимизация разности средних значений силы света во всем телесном угле и силы света в пределах полезного угла излучения.

Отражатель формируется из неограниченного количества неразрывно связанных, но независимых друг от друга частей. Пример отражателя с прорисовкой падающих и отраженных световых лучей представлен на рис. 3.

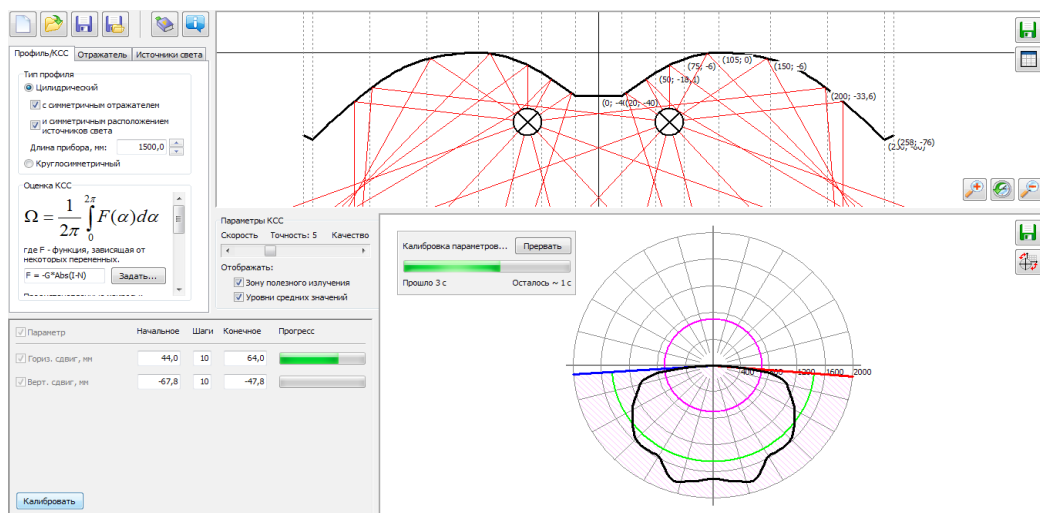


Рис. 3. Отображение главного окна в процессе калибровки

На втором этапе осуществляется детальная проработка эскиза и КСС, путем качественной оценки калибровки (процесс подбора выбранных параметров для обеспечения максимальной оценки КСС) необходимых параметров, и окончательного построения КСС (см. рис. 3). Результат представляется в виде графика в полярной или декартовой системах координат.

На третьем этапе полученные результаты могут быть представлены для последующего анализа и интерпретации в виде схем, графиков и таблиц, которые сохраняются в соответствующем формате. Результаты моделирования

профиля отражателя представляются в виде отчета с указанием параметров ИС и трассировки отражателя.

Использование данной автоматизированной системы моделирования и проектирования СП позволит достичь следующих целей:

- в короткие сроки эффективно осуществлять разработку СП с любыми ИС различного конструктивного исполнения и назначения;
- оценивать эффективность светоптической системы СП;
- определять основные параметры светоптической системы СП и увязывать их с конструктивным решением СП в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Трембач, В. В.** Световые приборы. – Москва : Высшая школа, 1990. – 463 с.
2. **Байнева, И. И.** Программная модель для оценки эффективности и надежности светодиодных источников света и приборов / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Полупроводниковая светотехника, 2011. – № 3. – С. 40–42.
3. **Байнева, И. И.** Оценка эффективности и надежности светодиодных источников света и приборов / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Фотоника, 2011. – Т. 27. – № 3. – С. 66–68.
4. **Байнева, И. И.** Математические и программные средства моделирования световых приборов / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Системы и средства информатики, 2012. – Т. 22. – № 2. – С. 95–105.

Поступила 09.09.2013 г.

Об авторах:

Байнева Ирина Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры светотехники светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), baynevaii@rambler.ru

Байнев Виталий Валерьевич, студент факультета электронной техники светотехнического факультета ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), bw14@mail.ru

Для цитирования: Байнева, И. И. Автоматизированная система для разработки энергоэффективных световых приборов / И. И. Байнева, В. В. Байнев // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 171–176.

REFERENCES

1. Trembach V. V. Svetovye pribory [Light devices]. Moscow, High School Publ., 1990, 463 p.
2. Bayneva I. I., Baynev V. V. Programmnaja model' dlja ocenki jeffektivnosti i nadezhnosti svetodiodnyh istochnikov sveta i priborov [Program model for estimation of effectiveness and reliability rates of photodiode light-devices]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* – Semiconductor light engineering. 2011, no. 3, pp. 40 – 42.
3. Bayneva I. I., Baynev V. V. Ocenka jeffektivnosti i nadezhnosti svetodiodnyh istochnikov sveta i priborov [Estimation of effectiveness and reliability of light devices]. *Fotonika* – Photonics. 2011, vol. 27, no. 3, pp. 66 – 68.
4. Bayneva I. I., Baynev V. V. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and means of informatics]. 2012, vol. 22, no 2, pp. 95 – 105.

About the authors:

Bayneva Irina Ivanovna, associate professor (docent), department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Technical sciences, baynevaii@rambler.ru

Baynev Vitaliy Valer'evich, student, department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), bw14@mail.ru

For citation: Bajneva I. I., Bajnev V. V. Avtomatizirovannaja sistema dlja razrabotki jenergojeffektivnyh svetovyh priborov [Automated system for development of energy efficient light devices]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 171 – 176.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ СЕРИЙНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. В. Гуляев, А. В. Волков

В статье раскрываются новые технические решения построения системы электропривода на базе асинхронизированного вентильного двигателя, внедрение которых позволит управлять электроприводами различного уровня сложности и существенно увеличить экономическую составляющую промышленных предприятий.

Ключевые слова: двигатель, асинхронный двигатель, векторное управление, микроконтроллер, преобразователь частоты.

DEVELOPMENT OF METHODS OF CONTROL OF THE STANDART FREQUENCY CONVERTERS FOR IMPLEMENTATION OF ELECTRIC DRIVES BASED ON SELF-CONTROLLED INVERTER-FED ASYNCHRONOUS MOTOR

I. V. Gulyaev, A. V. Volkov

The article considers new technical solutions for an electric drive system based on asynchronized permanent magnet motor. Implementation of it will enable the handling of electric drives of different complexity levels and substantially improve the price components of manufacturing enterprises.

Keywords: local network, motor, induction motor vector control, microcontroller, a frequency converter.

На сегодняшний день электропривод (ЭП) занимает ключевые позиции в промышленном производстве и является главным потребителем электроэнергетики во всем мире. Использование энергонезэффективных технологий управления ЭП приводит к снижению не только качества систем ЭП, но и его надежности, что влияет на экономическую составляющую [6]. Применение новых технических решений построения системы ЭП позволяет использовать машину переменного тока, сопоставимую по характеристикам с машиной постоянного тока, что значительно сокращает цену ЭП.

Наряду с главным достоинством машины постоянного тока – жесткая механическая характеристика (прямая линия параллельная оси нагрузки) [4] ее существенными недостатками являются:

- высокая стоимость по сравнению с электрической машиной переменного тока;
- наличие коллектора в конструкции машины;
- уменьшение надежности машины за счет наличия токосъемных щеток.

Использование асинхронного двигателя также имеет ряд недочетов:

- мягкая механическая характеристика;
- регулирование скорости двигателя за счет изменения частоты питающей сети;

– низкий момент на валу во время пуска двигателя под нагрузкой.

Перечисленные недостатки асинхронного двигателя можно исправить с помощью специальной схемы управления. Для этого использовался асинхронный двигатель с фазным ротором, к которому были подключены два преобразователя частоты (ПЧ), настроенные определенным

образом, что обеспечивало асинхронизированный режим работы. На рис. 1 представлена схема асинхронного двигателя с фазным ротором, работающего в режиме асинхронизированного вентильного двигателя (АВД) [5]. Схема состоит из двух преобразователей частоты (ПЧ1, ПЧ2) «Омега-2» отечественного производства ОАО «Электровыпрямитель».

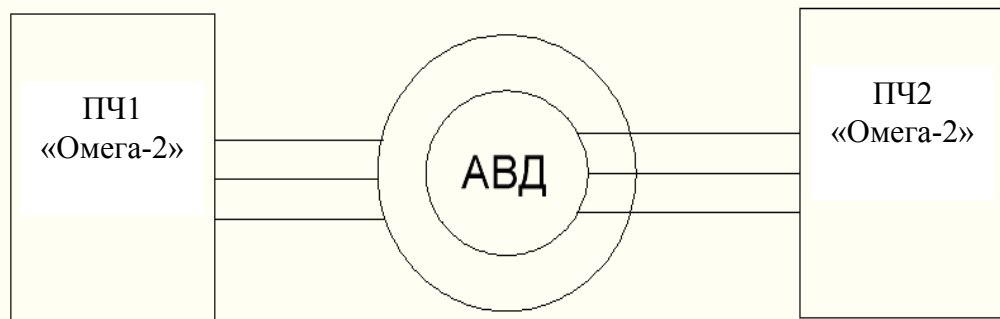


Рис. 1. Структурная схема АВД

Частотный преобразователь ПЧ1 предназначен для управления в цепи статора, ПЧ2 подключен к статорной обмотке и является цепью возбуждения АВД [1; 2–3].

Для реализации данной системы необходима модернизация частотного преобразователя ПЧ1 с внедрением DSP-процессора, позволяющего перевести преобразователь в нужный режим управления. Поставленная задача решалась с помощью программных средств MATLAB и Code Composer Studio, а также отладочной платы на базе TMS320F28335. Преобразователь ПЧ2 перестраивался с помощью стандартных функций управления для работы в цепи возбуждения. Был проведен математический анализ системы и реализован программный код в среде MATLAB. На рис. 2 представлен алгоритм управления АВД.

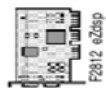
Для получения машинного кода для DSP-процессора использовалась программа Code Composer Studio. Внешний

вид окна компилятора программы представлен на рис. 3.

В результате проведенных операций полученная система ЭП переменного тока приравнивалась к характеристикам ЭП постоянного тока, что существенно снижало экономическую составляющую системы ЭП.

Испытание прототипа доказывает возможность его применения в промышленности, например, в подъемном шахтном приводе, прокатных станах, тяговом ЭП подъемных кранов, мощных транспортных конвейерах, в электроприводах с тяжелыми условиями пуска, для укладки мощных силовых кабелей в бухты.

Таким образом, проведенные исследования показали, что техническая модернизация системы ЭП на базе АВД с фазным ротором решает многие задачи, связанные с различными отраслями промышленности, увеличивает экономическую выгоду за счет снижения себестоимости всей системы без потери энергетических характеристик всего ЭП.



Серия «Естественные и технические науки»

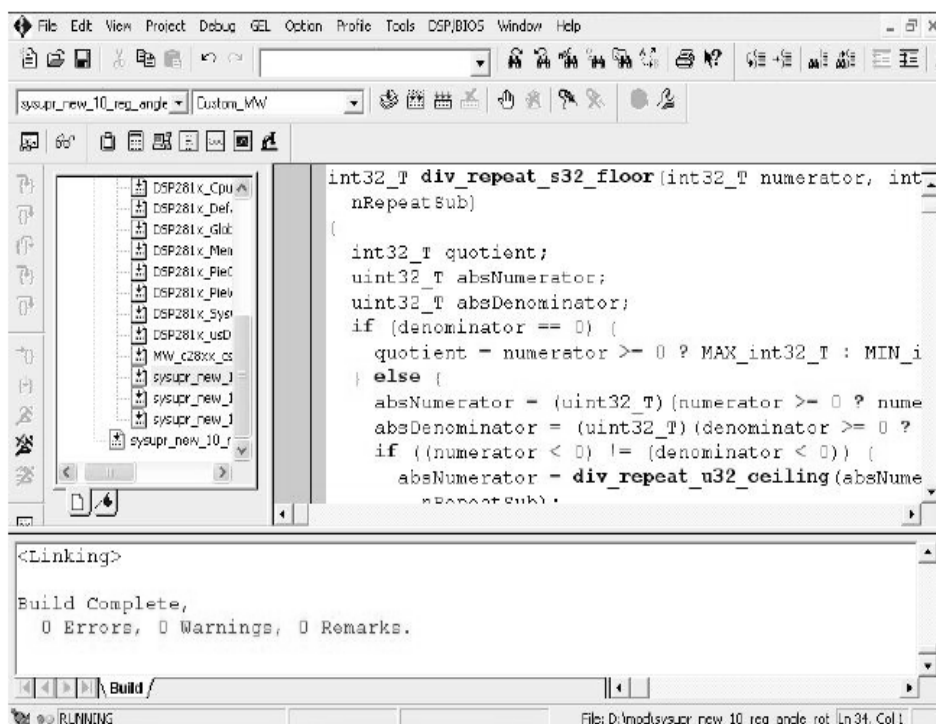


Рис. 3. Внешний вид окна компилятора программы Code Composer Studio

Возможность широкого применения разработанной системы ЭП с использованием АД позволяет утверждать, что затраты на ее построение окупятся в самые короткие сроки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авторское свидетельство на полезную модель 28572 Российская Федерация, 7 Н 02 М 7/525. Устройство для управления инвертором напряжения / В. В. Никулин, Г. М. Тутаев ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т. – 2002122288/20 ; заявл. 22.02.2002 ; опубл. 27.03.2003, Бюл. № 9. – 2 с.
2. Авторское свидетельство на полезную модель 28297 Российская Федерация, Н 02 М 7/48. Устройство для управления инвертором тока / В. В. Никулин [и др.] ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т. – 2002121423/20 ; заявл. 12.08.2002 ; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 7. – 2 с.
3. **Гуляев, И. В.** Асинхронизированный вентильный двигатель с управлением по фазе тока / И. В. Гуляев, И. С. Юшков. – Саарбрюкен, Германия. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 183 с.
4. **Гуляев, И. В.** Обобщенная электромеханическая система на основе асинхронизированного вентильного двигателя / И. В. Гуляев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2004. – 84 с.
5. **Гуляев, И. В.** Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя / И. В. Гуляев, Г. М. Тутаев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 200 с.
6. **Сонин, Ю. П.** Асинхронизированный вентильный двигатель / Ю. П. Сонин, И. В. Гуляев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 68 с.

Поступила 19.12.2013 г.

Об авторах:

Гуляев Игорь Васильевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Международной инженерной академии (МИА), декан факультета электронной техники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), ivgulyaev@mail.ru

Волков Антон Владимирович, аспирант кафедры электроники и нанoeлектроники факультета электронной техники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), elsoldador@rambler.ru

Для цитирования: Гуляев, И. В. Разработка метода управления серийными преобразователями для реализации электропривода на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И. В. Гуляев, А. В. Волков // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 177–181.

REFERENCES

1. Nikulin V. V., Tutayev G. M., avtorskoe svidetelstvo na poleznuyu model 28572, Rossyiskaya Federazija, 7 H 02 M 7/525 Ustroystvo dlya upravleniya invertorom napryazheniya [Certificate of authorship 28572, Russia, 7 H 02 M 7/525. Voltage-source inverter control device], no. 2002122288/20, claimed 22, published 27. 03. 2003, Bul. no. 9.
2. Nikulin V. V., avtorskoe svidetelstvo na poleznuyu model 28297, Rossyiskaya Federazija, H 02 M 7/ 48 Ustroystvo dlya upravleniya invertorom toka [Certificate of authorship 28297, Russia, H 02 M 7/ 48. Current-source inverter control device], 2002121423/20, claimed 12.08.2002, published 10.03.2003, Bul. no. 7.
3. Gulyaev I. V. Asinhronizirovannyj ventil'nyj dvigatel' c upravleniem po faze toka [The asynchronized valve engine with control on phase current]. Saarbruecken, Germany. LAP LAMBERT Academic Publ., 2012, 183 p.
4. Gulyaev I. V. Obobshhennaja jelektromehaničeskaja sistema na osnove asinhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelja [The generalized electromechanical system on the basis of asynchronized valve engine]. Saransk, Mordovia University Publ., 2004, 84 p.
5. Gulyaev I. V. Sistemy vektornogo upravlenija jelektroprivodom na osnove asinhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelja [Systems of vector management of the electric drive on the basis of asynchronized valve engine]. Saransk, Mordovia University Publ., 2010, 200 p.
6. Sonin Yu. P. Asinhronizirovannyj ventil'nyj dvigatel' [Asynchronized valve engine]. Saransk, Mordovian University Publ., 1998, 68 p.

About the authors:

Gulyaev Igor' Vasil'evich, dean of Electronic Engineering department, professor of Automatics chair of Electronic Engineering department Of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Doktor Nauk degree holder in Engineering sciences, professor, ivgulyaev@mail.ru

Volkov Anton Vladimirovich, post-graduate student of Automatics chair of Electronic Engineering department of Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), elsoldador@rambler.ru

For citation: Guljaev I. V., Volkov A. V. Razrabotka metoda upravlenija serijnymi preobrazovateljami dlja realizacii jelektroprivoda na baze asinhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelja [Development of serial frequency converter control methods for implementation of electric drive based on asynchronized permanent magnet synchronous motor]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 177 – 181.

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШЕСТИСТУПЕНЧАТОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Ю. С. Игольников, О. Ю. Герман

На сегодняшний день в Российской Федерации микропроцессорные системы управления используются не повсеместно, а только в сетях с напряжением свыше 10кВ. Представленная разработка позволяет решить проблему использования компенсаторов реактивной мощности, рассчитанных на низкое напряжение и большие токи. По сравнению с существующими аналогами, выпускаемыми в ближнем и дальнем зарубежье, данный комплекс отличается рядом технических решений как в области силовой электроники, так и в области микропроцессорных систем управления.

Ключевые слова: компенсация, реактивная мощность, микропроцессорная система управления, датчик тока.

DEVELOPMENT OF MICRO-PROCESSING CONTROL SYSTEM FOR SIX-STAGE REACTIVE POWER COMPENSATOR

Yu. S. Igo'nikov, O. Yu. German

Today such systems in the Russian Federation are not used universally, usually they are applied in networks with tension with above 10kV. This lay-out allows to solve a problem use of jet power jacks, designed for a low voltage and big currents. In comparison with existing analogs which are let out in Former Soviet Union and abroad, this complex differs with a number of technical solutions, both in the field of power electronics and in the field of microprocessor control systems.

Keywords: compensation, jet capacity, microprocessor, control system, current sensor.

В современном мире стоит проблема повышения качества электроэнергии без потери мощности в сетях переменного тока. В связи с этим существуют различные способы и методы повышения качества параметров электросети, работающие на различные типы нагрузки (выпрямители для гальванических ванн, тяговые подстанции, дуговые плавильные печи и т. д.).

Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай цеховых сетей, работающих с различными устройствами преобразовательной аппаратуры (электрические машины, выпрямители, инверторы) и потребляющих значительную мощность из сети. Все вы-

шеуказанные потребители при работе производят сброс части потребляемой энергии в сеть, что отрицательно сказывается на потребителях, приводит к ухудшению гармонического состава, снижению $\cos\varphi$ [1].

Существует три основных способа увеличения коэффициента мощности: компенсация за счет перевозбужденной синхронной машины; за счет транзисторных корректоров коэффициента мощности; индуктивно-емкостная компенсация коэффициента мощности.

Рассмотрим более подробно индуктивно-емкостной компенсатор реактивной мощности, основанный на выравни-

вании угла между током и напряжением с помощью косинусных конденсаторов и индуктивностей, работающих в режиме фильтра высших гармоник. Анализ стандартных схемотехнических решений индуктивно-емкостных компенсаторов реактивной мощности показал, что использование статических и динамических компенсаторов имеет ряд существенных недостатков:

- достаточно высокий коммутационный ток в статических компенсаторах;
- резкое снижение надежности динамических компенсаторов за счет возникновения лавинного тока при включении тиристоров в ступенях;
- наличие значительного числа фильтра высших гармоник и числа коммутирующих элементов.

На основании вышесказанного была разработана и заявлена система микропроцессорного управления шестиступенчатым компенсатором реактивной мощности, в котором отсутствуют вышеперечисленные недостатки. На рис. 1 представлена доработанная версия микропроцессорной системы управления компенсатором реактивной мощности. Данная структурная схема позволяет полностью отслеживать все изменения

токов и напряжений в нагрузке, а также осуществлять управление силовыми ключами, включением необходимой емкости конденсаторных батарей в зависимости от изменения cosφ.

Согласно рис. 1, измерение входных и выходных токов происходит за счет датчиков тока Dia1–Dic3.1, работающих на эффекте Холла. Процесс отслеживания напряжения на входе компенсатора по фазе «А» производится с помощью датчика напряжения D_{Va}. Датчики, отслеживающие переходы фазы через ноль, предназначены для формирования управляющего сигнала, сигнализирующего микроконтроллеру о необходимости выдачи сигнала управления тем или иным ключом, подключающим конденсаторные батареи в зависимости от изменения коэффициента мощности. Основой для построения микропроцессорной системы является контроллер Atmega2560, выпускаемый фирмой Atmel. Параметры всей системы задаются с помощью клавиатуры Keyboard или с помощью ПК через RS232 интерфейс. Система имеет LCD дисплей, предназначенный для индикации параметров сети и системных установок, а также индицирует о наличии удаленного подключения по интерфейсу RS485.

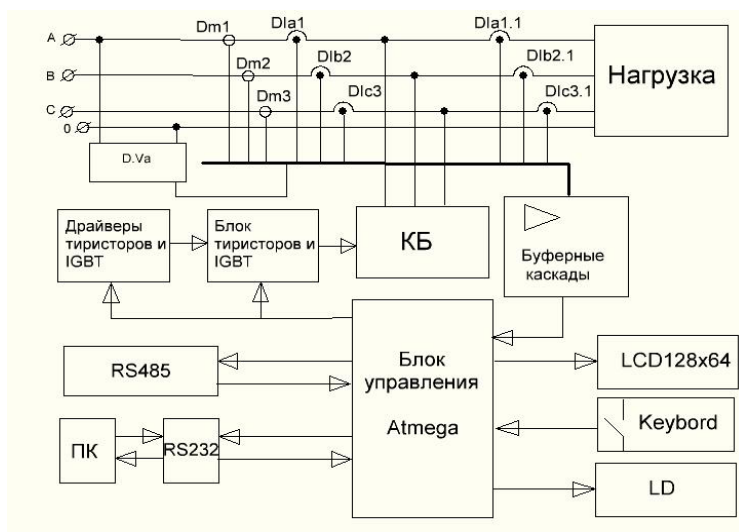


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорной системы управления компенсации реактивной мощности

Разработанная микроконтроллерная система управления отличается от существующих аналогов низкой ценой, простотой реализации системы управления, особенностями управления силовой частью (мягкое включение ступеней). На рис. 2 представлена схема силовой части шестиступенчатого компенсатора реактивной мощности, состоящего из трех батарей конденсаторов различной емкости; элементов коммутации, выполненных на не полностью управляемых вентилях Т1-Т6, и диодно-транзисторных коммутаторах, выполненных на элементах VD1-

VD12 и VT1-VT4; фильтров высших гармоник L1-L6 [3].

Согласно рис. 2, переключение первой ступени осуществляется за счет работы диодно-транзисторного коммутатора (VD1-VD6, VT1, VT2) в активном режиме, что позволяет перевести схему в режим компенсации. Вторая ступень работает аналогичным образом, только производится коммутация элементов (VD7-VD12, VT3, VT4). Третья ступень основана на включении тириستоров Т1-Т6 в моменты перехода фазы через ноль. Оставшиеся три ступени являются комбинацией переключения первых трех [2].

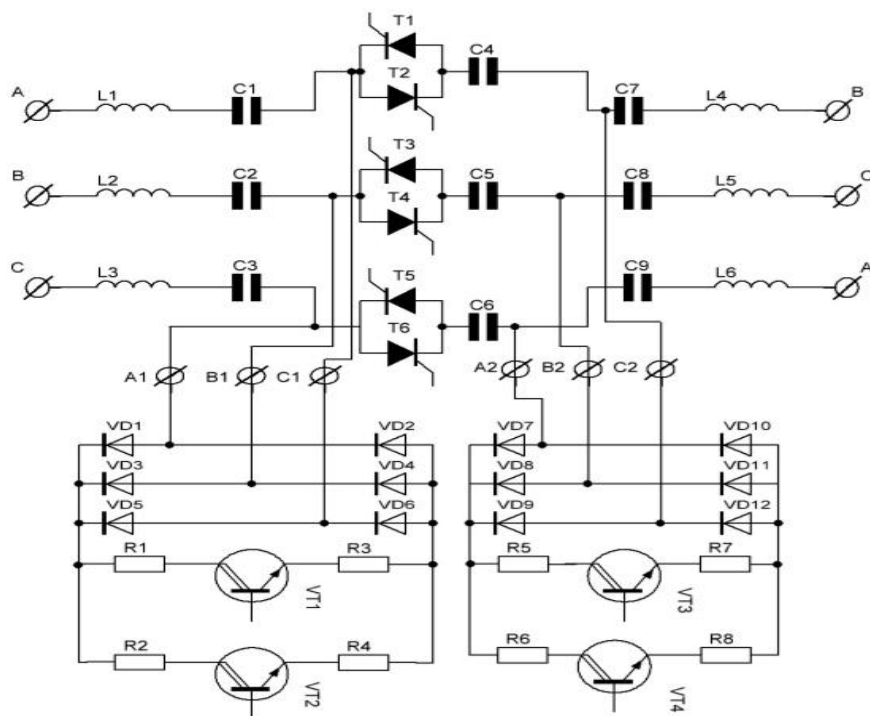


Рис. 2. Схема силовой части шестиступенчатого компенсатора реактивной мощности

Проведенные исследования показали возможность использования данной системы в различных сетях переменного тока с разным типом нагрузок, продемонстрировав лучшие параметры по сравнению с другими аналогами [3]. Внедрение представленной системы на российских энер-

гозатратных предприятиях существенно увеличит их экономическую эффективность. Использование данной технологии в промышленности позволит управлять коэффициентом мощности на удаленном расстоянии от установки, что снизит затраты на обслуживание. В процессе про-

веденных теоретических исследований было установлено, что система данного типа позволит потребителю существенно экономить на оплате электроэнергии от 12 до 30% независимо от времени года.

Таким образом, внедряемая система микропроцессорного управления

шестиступенчатым компенсатором реактивной мощности существенно увеличит экономическую эффективность, технические и эксплуатационные параметры нагрузки. В дальнейшем такие комплексы могут быть распространены на всех энергоснабжающих предприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
2. Игольников, Ю. С. Шестиступенчатый компенсатор реактивной мощности с микропроцессорной системой управления / Ю. С. Игольников, О. Ю. Герман // Промышленная энергетика. – № 1. – 2013.
3. Патент 2210156 Российская Федерация. Система компенсации реактивной мощности / Ю. С. Игольников ; опубл. 15.02.2007.

Поступила 14.11.2013 г.

Об авторах:

Игольников Юрий Соломонович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники факультета светотехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), I.U.S@mail.ru

Герман Олег Юрьевич, аспирант кафедры теоретических основ электротехники факультета светотехники ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), shefzt@rambler.ru

Для цитирования: Игольников, Ю. С. Разработка микропроцессорной системы управления шестиступенчатого компенсатора реактивной мощности / Ю. С. Игольников, О. Ю. Герман // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 182–185.

REFERENCES

1. Zhelezko Y. S. Kompensacija reaktivnoj moshhnosti i povyshenie kachestva jelektroenergii. [Power factor correction and improvement of the quality of electric power]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1985, 224 p.
2. Igol'nikov Yu. S., German O. Yu. Shestistupenchatyj kompensator reaktivnoj moshhnosti s mikroprocessornoj sistemoy upravlenija [Six-stage reactive power compensator with a microprocessor control system]. *Promyshlennaja jenergetika* – Industrial Energetics. 2013, no. 1.
3. Igol'nikov Yu. S., patent 2210156, Rossyiskaya Federazija, Sistema kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Patent 2210156, Russia, Power compensation system], published 15.02.2007.

About the authors:

Igol'nikov Yuri Solomonovich, associate professor (docent), chair of Theoretical Electrotechnics, department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Engineering sciences, I.U.S@mail.ru

Germann Oleg Yuriyevich, graduate student, chair of Theoretical Electrotechnics, department of Light Engineering, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), shefzt@rambler.ru

For citation: Igol'nikov Ju. S., German O. Ju. Razrabotka mikroprocessornoj sistemy upravlenija shestistupenchatogo kompensatora reaktivnoj moshhnosti [Development of micro-processing control system for six-stage reactive power compensator]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 182 – 185.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САМОХОДНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

А. С. Князьков, Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин

В статье анализируются способы и методы повышения функционирования малогабаритных самоходных почвообрабатывающих машин; обосновывается необходимость регулирования угла резания фрезбарабана; рассматриваются конструкции новых почвообрабатывающих фрез с регулируемым углом резания, защищенные патентами Российской Федерации.

Ключевые слова: фреза, угол резания, малогабаритные почвообрабатывающие фрезы, регулирование угла резания.

IMPROVEMENT OF THE OPERATING EFFECT OF SMALL SELF-PROPELLED ROTARY TILLERS BY USING ADAPTIVE POWER EFFICIENT TOOLS

A. S. Knyaz'kov, N. I. Naumkin, V. F. Kupryashkin

The article analyzes the ways and methods of improvement of the functioning of small self-propelled tillers. The main methods are based on the selection of the most optimal modes of tillage mills by changing the translational or angular velocity of milling drum. The necessity of adjusting the angle of the cutting milling drum is stated as important task for resolving this problem. Milling drum in a conventional cutting chip increases significantly the power consumed for cutting, as compared to the capacity of the upgraded tool whose blades have a constant cutting angle. The practical application of this body of work would reduce the energy intensity of milling drums at 30% while maintaining the specified agronomic requirements. The authors have proposed construction of new tillage tools with adjustable cutting angle, protected by patents of the Russian Federation.

Keywords: cutter, cutting angle, small tillage cutters, cutting angle adjustment.

Самоходные малогабаритные почвообрабатывающие фрезы (СМПФ), несмотря на свои незначительные размеры, представляют собой сложную технологическую машину, работающую в условиях непрерывно изменяющихся внешних воздействий, обусловленных многочисленными и разнообразными факторами, такими как режим нагружения, состояние обрабатываемого продукта, погодноклиматические условия и др.

Многочисленные исследования по динамике работы таких машин показывают отрицательное влияние крутильных колебаний фрезы на энергетические, эксплуатационно-технологические и агротехнические показатели работы почвообрабатывающего агрегата, а также на показатели надежности элементов его привода. В связи с этим на стадии разработки машины, а также при ее эксплуатации необходимо решать вопросы снижения всех типов динамических нагрузок [3].

© Князьков А. С., Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., 2014

В настоящее время для снижения динамических нагрузок в приводе почвообрабатывающих фрез и повышения их функционирования применяются несколько способов. Опираясь на анализ исследований ротационных почвообрабатывающих машин, а также на особенности конструкций почвообрабатывающих фрез и на богатый опыт их эксплуатации в различных условиях, можно выделить две группы таких способов: технологические и конструкторские (рис. 1) [1].

Согласно рис. 1, первая группа способов основывается на выборе наиболее оптимальных режимов работы почво-

обрабатывающих фрез путем изменения поступательной или угловой скорости движения фрезбарабана. Изменение поступательной скорости фрезы обеспечивается выбором необходимой передачи коробки скоростей энергетического средства, с которым она агрегатируется (для прицепных и навесных фрез), или коробкой скоростей СМПФ. Однако данный способ не нашел применения в СМПФ по причине отсутствия в их конструкции многоступенчатых коробок скоростей. Кроме того, в большинстве случаев СМПФ с целью упрощения конструкции и снижения их стоимости изготавливаются с одной или двумя передачами.



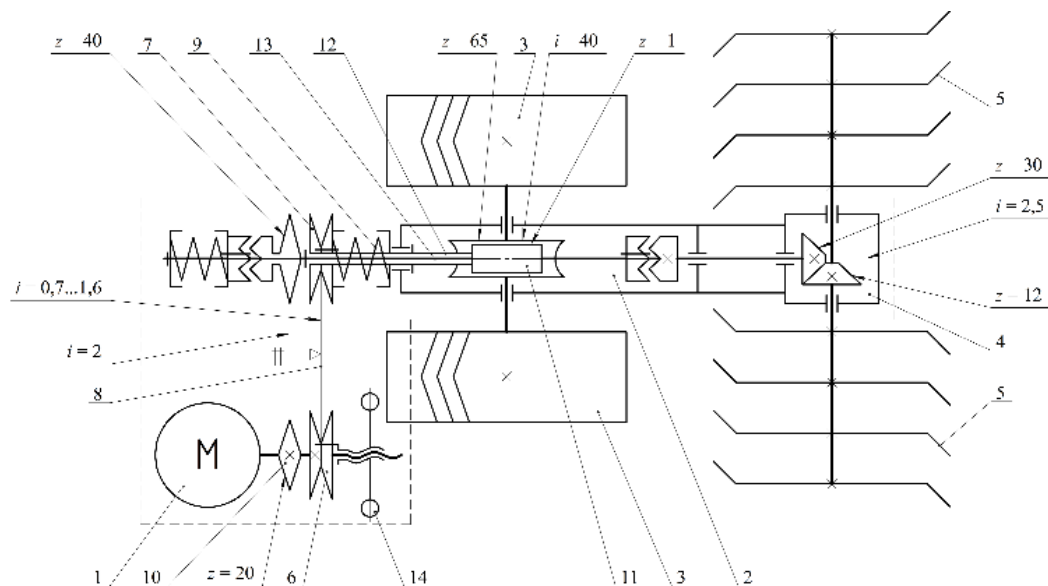
Рис. 1. Способы снижения динамических нагрузок в приводе и повышения функционирования почвообрабатывающих фрез

Для устранения этого недостатка нами была предложена конструкция СМПФ с бесступенчатым регулированием поступательной скорости машины и подачи на нож (рис. 2) [5]. Регулирование поступательной скорости в данной конструкции осуществляется клиноремным вариатором.

Проведенные полевые испытания опытных образцов таких СМПФ в условиях открытого и закрытого грунтов подтвердили результаты лабораторных исследований и показали, что их производительность возросла в 2,5 раза (с 0,085 до 0,215 га/ч) при использовании машины в условиях открытого грунта и в 2,2 раза (с 0,085 до 0,19 га/ч)

в условиях закрытого грунта. При этом удельная энергоемкость с увеличением подачи с 0,03 до 0,074 м снизилась на 27 % (с $14,15 \times 10^{-3}$ до $10,27 \times 10^{-3}$ кВт $\times$ ч/м³), а в условиях закрытого грунта с увеличением подачи с 0,03 до 0,065 м – на 28 % (с $4,21 \times 10^{-3}$ до $3,04 \times 10^{-3}$ кВт $\times$ ч/м³). Однако применение в данной конструкции базовых рабочих органов не позволяет в полной мере реализовать заложенный в этой конструкции СМПФ потенциал.

Выбор подачи за счет регулирования угловой скорости вращения фрезбарабана обеспечивается путем установки сменных блоков рабочих элементов передач или выбором необходимой передачи коробки скоростей привода в конструкциях самих фрез. Данный способ регулирования используется только в отдельных случаях по причине усложнения конструкции СМПФ и повышения их стоимости.



1 – электрический двигатель; 2 – редуктор привода ходовой части; 3 – ходовые колеса; 4 – привод рабочих органов; 5 – фрезерные рабочие органы; 6 и 7 – ведущий и ведомый шкивы клиноременного вариатора; 8 – клиновой ремень; 9 – пружина ведомого шкива; 10 – звездочка; 11 – червяк; 12 – полый вал; 13 – центральный вал; 14 – маховичок регулирования клиноременным вариатором.

Рис. 2. Кинематическая схема опытного образца СМПФ

Наряду с вышеперечисленными способами возможен также способ обработки почвы в два следа на различных глубинах обработки. Однако этот способ требует увеличения энергозатрат на обработку почвы, поэтому используется только для обработки тяжелых почв.

Вторая группа способов основывается на выборе наиболее рациональной конструкции фрезерных барабанов и сочетании их работы с пассивными рабочими органами. Рациональная конструкция фрезбарабанов определяется использова-

нием наиболее оптимальной конструкции рабочих органов (ножей) и их взаимном размещении. В настоящее время в конструкциях фрезбарабанов почвообрабатывающих фрез применяется большое количество разновидностей ножей, среди которых наибольшее применение находят Г-образные ножи. При этом наиболее оптимальным является расположение ножей по замкнутой спирали на фрезбарабанах широкозахватных фрез, а в случае с СМПФ – по встречным спиральям с симметричным расположением.

Одним из эффективных способов снижения динамических нагрузок в СМПФ является обеспечение постоянства угла резания [7]. Исследования Г. Ф. Попова показывают, что в процессе отрезания стружки обычным фрезерным барабаном значительно возрастает мощность, затрачиваемая на фрезерование, по сравнению с мощностью модернизированного инструмента, ножи которого имеют постоянный угол резания [7]. Во время работы такого барабана (рис. 3а) нож в процессе резания

проходит по траектории трохоиды, описываемой каждым ножом, с минимальным углом отклонения от нее. При этом наблюдается минимальное сопротивление почвы о нож. Движение ножа в обычном барабане (рис. 3б) происходит с изменением угла резания, что приводит к дополнительному сопротивлению резания. При этом происходит дополнительное смятие почвы и перемещение ее в свободную борозду, что отрицательно влияет на энергетические затраты.

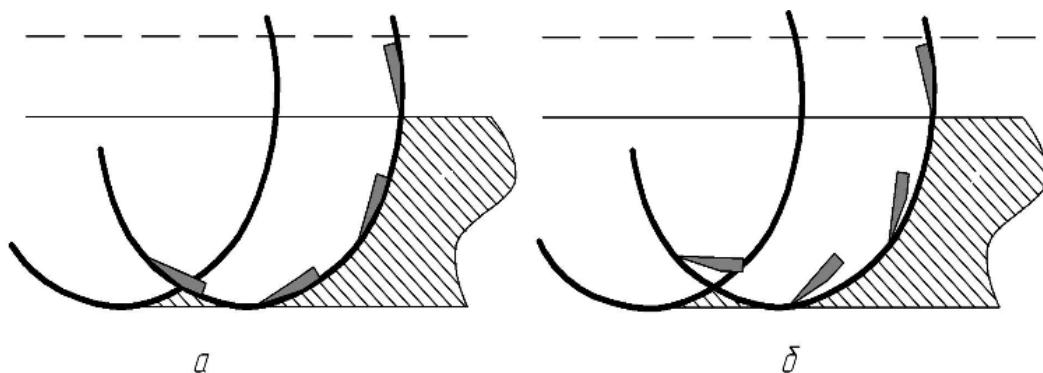


Рис. 3. Траектория движения ножа

Для обеспечения постоянного угла резания Г. Ф. Поповым предлагается рабочий

орган (рис. 4), обеспечивающий постоянство угла резания при отрезании стружки.

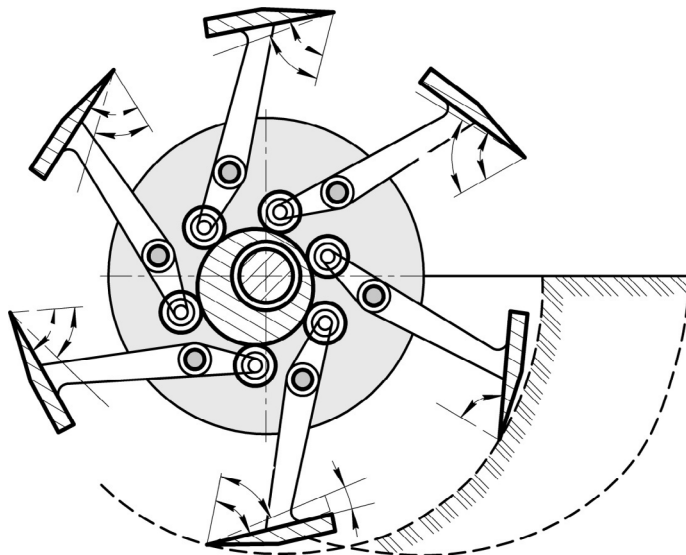


Рис. 4. Рабочий орган с постоянным углом резания Г. Ф. Попова

Практическое применение данного рабочего органа позволило бы снизить энергоемкость фрезерования на 30 % при сохранении заданных агротехнических требований. Однако конструкция таких фрезерных барабанов оказалась значительно сложнее обычных, кроме того, она позволяет обеспечить только один режим работы, обусловленный конкретными почвенными условиями, что является значительным сдерживающим

фактором их практического использования.

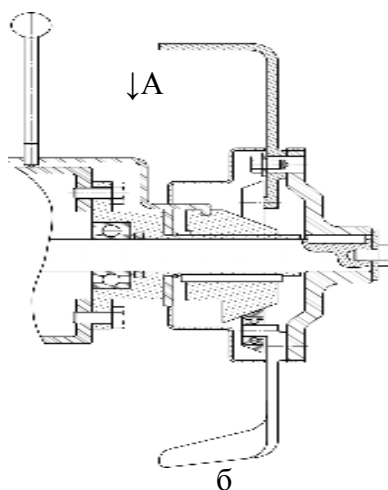
В связи с этим решение задачи регулирования угла резания путем разработки многорежимных рабочих органов с постоянным углом резания при условии их адаптивности к различным почвенным условиям является весьма актуальным. Ввиду этого нами были предложены конструкции адаптивных энергоэффективных рабочих органов с постоянным углом резания (рис. 5 а, б, в) [6].



а



б



б

Рис. 5. Конструкции адаптивных энергоэффективных рабочих органов

Кроме этого особый интерес представляют рабочие органы, в конструк-

ции которых применяется планетарный механизм (рис. 6) [6].

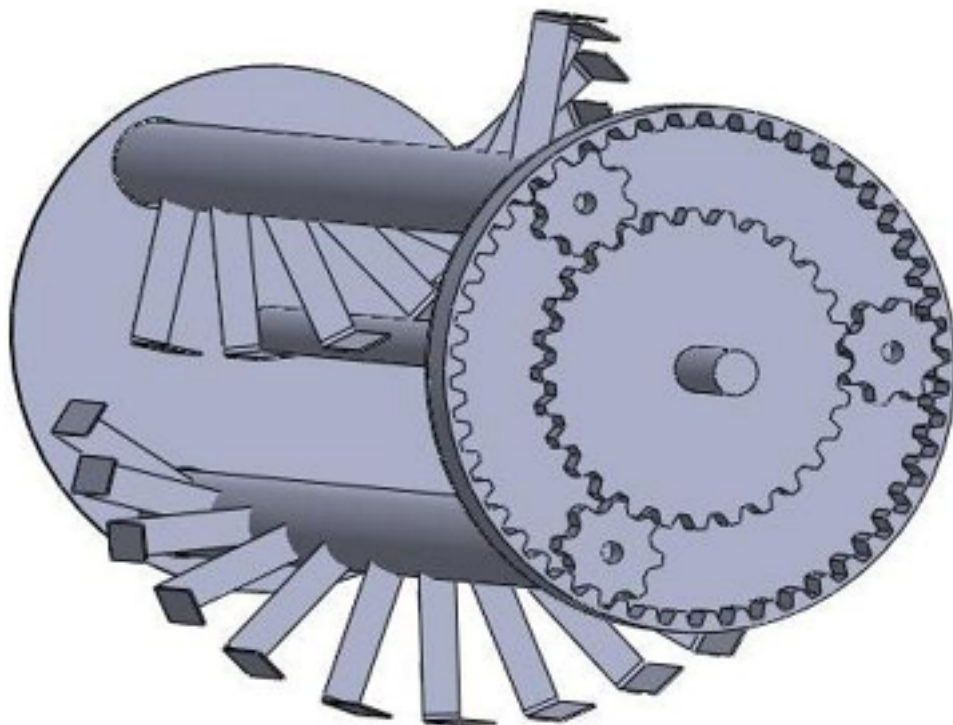


Рис. 6. Схема планетарного рабочего органа

Предложенная нами почвообрабатывающая фреза с изменяющимся углом атаки ножа разработана на основе синтеза планетарного рабочего органа при помощи адаптированной методики идентификации плоских рычажных механизмов любой сложности с зубчатыми (Л. Т. Дворникова, А. Э. Садиева) [8–9] и трансформированной впоследствии В. В. Дмитриевым [9] в метод конвертации. В этой фрезе при прохождении ножа в почвенном слое по траектории-трохоиде изменяется угол резания. Этот эффект достигается при помощи установки на фрезе нескольких фрезбарабанов. При вращении вокруг основного вала фрезбарaban при помощи зубчатых колес, образующих планетарную передачу, приводится во враще-

ние. Таким образом, при прохождении в почве нож вращается вокруг основной оси и оси фрезбарабана. Подбирая диаметры зубчатых колес и угловой скорости фрезбарабана в зависимости от поступательной скорости фрезы, можно добиться движения ножа по трохойде с оптимальным углом установки ножа в определенном местоположении. При прохождении ножа в почве с оптимальным углом резания устраняются трение ножа о почву и ее повышенное смятие, сопровождающие фрезерование почвы с жестко установленным ножом.

Другим не менее эффективным способом снижения динамических нагрузок в приводе и повышения эффективности использования почвообрабатывающих фрез является комбинация

работы фрезбарабанов с пассивными рабочими органами, выполняющими функцию предварительного рыхления почвы. Данный способ широко применяется в конструкциях широкозахватных фрез, агрегируемых с трактором. Применение данного способа в СМПФ не получило распространения, видимо, по причине сложности обеспечения курсовой устойчивости машины.

Повышения функционирования почвообрабатывающих фрез можно также добиться увеличением ширины захвата фрезбарабанов, установив на них дополнительные секции с ножами. Данный способ, как показывает анализ, получил широкое применение в конструкциях СМПФ. Однако при этом необходимо отметить, что снижение динамических нагрузок в приводе остается под вопросом по причине необоснованного подхода к расположению ножей на фрезбарабане.

Снижение динамических нагрузок в приводе, повышение курсовой устойчивости и функционирования почвообрабатывающих фрез можно обеспечить использованием маховичного аккумулятора кинетической энергии (МАКЭ) [4]. Теоретический анализ влияния МАКЭ

на функционирование почвообрабатывающих машин, на возникающие при его разрядке реактивный и гироскопический моменты, а также эффект сглаживания пиковых нагрузок в элементах привода приводят к повышению курсовой устойчивости фрезы и к равномерной загрузке двигателя [9]. Однако наличие серьезных недостатков, связанных с отсутствием доступных, недорогих материалов, применяемых при изготовлении маховика, высокоэффективных подшипниковых опор и повышающих передач с достаточно жесткой обратной связью, не нашли практического применения в конструкциях фрез.

Таким образом, одним из перспективных путей повышения функционирования СМПФ за счет роста производительности и снижения энергоемкости фрезерования является комбинация почвообрабатывающих фрез с бесступенчатым регулированием поступательной скорости и применение адаптивных энергоэффективных рабочих органов с постоянным углом резания. Для подтверждения этих выводов необходимы реальные конструкции новых машин и их апробация в условиях АПК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ способов снижения динамических нагрузок в приводе почвообрабатывающих фрез и повышения эффективности их функционирования / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Ресурсосберегающие и экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2012. – С. 433–439.
2. Анализ устойчивости движения самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы при ее качении относительно ходовых колес / В. Ф. Купряшкин [и др.] // Вестник Кыргызско-российского славянского университета. – 2011. – № 11. – С. 113–119.
3. Купряшкин, В. Ф. Теоретические основы проектирования почвообрабатывающих фрез с изменяемым углом резания / В. Ф. Купряшкин, Н. И. Наумкин, А. С. Князьков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 2. – С. 62–63.
4. Патент 2243633 Российская Федерация, МПК А 01 В 33/00, 33/08. Почвообрабатывающая фреза / М. Н. Чаткин [и др.] ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т. – № 2003103179/12 ; заявл. 03.02.2003 ; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1. – 4 с.: ил.
5. Патент 2353080 Российская Федерация, МПК А 01 В 33/04. Почвообрабатывающая фреза / А. В. Безруков [и др.] ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т. – № 2007146044/12 ; заявл. 11.12.2007 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 12. – 5 с.: ил.
6. Патент 2481759 Российская Федерация, МПК А 01 В 33/02. Рабочий орган почвообрабатывающей фрезы / Н. И. Наумкин [и др.] ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т. – № 2011126451/13 ; заявл. 27.06.2011 ; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 1. – 4 с.: ил.

7. **Сенин, М. Ф.** Технологические и технические основы совмещения фрезерования почвы с посевом / М. Ф. Сенин. – Москва : Изд-во МСХА, 1991. – 184 с.

8. Синтез планетарных механизмов высокотехнологичных сельскохозяйственных машин методом их идентификации с рычажными / Н. И. Наумкин [и др.] // Нива Поволжья. – 2010. – № 4. – С. 45–48.

9. Синтез планетарных рабочих органов высокотехнологичных почвообрабатывающих машин методом конвертации / Н. И. Наумкин [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 315–319.

Поступила 27.11.2013 г.

Об авторах:

Князьков Алексей Сергеевич, преподаватель кафедры основ конструирования механизмов и машин института механики и энергетики ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), dep-general@adm.mrsu.ru

Наумкин Николай Иванович, кандидат технических наук, доктор педагогических наук, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин института механики и энергетики ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), dep-general@adm.mrsu.ru

Купряшкин Владимир Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин института механики и энергетики ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), dep-general@adm.mrsu.ru

Для цитирования: Князьков, А. С. Повышение эффективности функционирования самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез путем использования адаптивных энергоэффективных рабочих органов / А. С. Князьков, Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 186–194.

REFERENCES

1. Kupryashkin V. F. Analiz sposobov snizheniya dinamicheskikh nagruzok v privode pochvoobrabatyvayushchikh frez i povysheniya effektivnosti ikh funktsionirovaniya [Analysis of ways of dynamic loads decrease of rotary tiller drives and their improvement]. *Resursoberegayushchiye i ekologicheski bezopasnye tekhnologii proizvodstva i pererabotki selskokhozyaystvennoy produktsii : Materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* – Recourse-saving and environmentally safe technologies of producing and processing agricultural products: Proceedings of the VIII Intern. scientific-practical Conference. Saransk, Mordov. University Publ., 2012, pp. 433 – 439.

2. Kupryashkin V. F. Analiz ustoychivosti dvizheniya samokhodnoy malogabaritnoy pochvoobrabatyvayushchey frezy pri eye kachanii otnositelno khodovykh koles [Analysis of dynamical stability of small self-propelled tillers in webble relative to ground wheels]. *Vestnik Kyrgyzsko–Rossyskogo Slavyanskogo universiteta* – Kyrgyz Russian Slavic University. 2011, no. 11, pp. 113 – 119.

3. Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Knyazkov A. S. Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya pochvoobrabatyvayushchikh frez s izmenyaemym uglom rezaniya [Theoretical bases for designing of tillage tools with a variable angle cutting]. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* – International Journal of applied and fundamental research. 2013, no. 2, pp. 62 – 63.

4. Chatkin M. N., Kupryashkin V. F., Panfilov N. P., Naumkin N. I., patent 2243633, Rossiyskaya Federaziya, MPK A 01 V 33/00, 33/08 Pochvoobrabatyvayushchaya freza [Patent 2243633, Russia, MPK A 01 V 33/00, 33/08 Cultivation cutter], no. 2003103179/12, claimed 03.02.2003, published 10.01.2005, Bul. no. 1, pp. 4.

5. Bezrukov A. V., Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Chatkin M. N., patent 2353080, Rossiyskaya Federaziya, MPK A 01 V 33/04 Pochvoobrabatyvayushchaya freza [Patent 2353080, Russia, MPK A 01 V 33/04 Cultivation cutter], no. 2007146044/12, claimed 11.12.2007, published 27.04.2009, Bul. no. 12, pp. 5.

6. Naumkin N. I., Knyaz'kov A. S., Kupryashkin V. F., Bezrukov A. V., patent 2481759, Rossiyskaya Federaziya, MPK A 01 V 33/02 Rabochy organ pochvoobrabatyvayushchey frezy [Patent 2481759, Russia, MPK A 01 V 33/02. Rotary tillage tool], no. 2011126451/13, claimed 27.06.2011, published 20.05.2013, Bul. no. 1, pp. 4.

7. Senin M. F. Tekhnologicheskiye i tekhnicheskiye osnovy sovmeshcheniya frezerovaniya pochvy s posevom [Technological and technical basis for combining soil milling and sowing]. Moscow, MSKhA Publ., 1991, 184 p.

8. Naumkin N. I. Sintez planetarnykh mekhanizmov vysokotekhnologichnykh selskokhozyaystvennykh mashin metodom ikh identifikatsii s rychnykh [Synthesis of high-tech planetary gears of agricultural machines by the method of their identification with linkage gears]. *Niva Povolzhya* – Field of Povolzhje. 2010, no. 4, pp. 45 – 48.

9. Naumkin N. I. Sintez planetarnykh rabochikh organov vysokotekhnologichnykh pochvoobrabatyvayushchikh mashin metodom konvertatsii [Synthesis of high-tech planetary tillers by conversing]. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* – Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the Intern. scientific-practical conference. SPb., Politekh. University Publ., 2011, pp. 315 – 319.

About the authors:

Knyaz'kov Alexey Sergeevich, lecturer, chair of Design Principles for Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Energy, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), dep-general@adm.mrsu.ru

Naumkin Nikolay Ivanovich, associate professor (docent), head of chair of Design Principles for Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Energy, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Engineering sciences, Doktor Nauk degree holder in Pedagogical sciences, dep-general@adm.mrsu.ru

Kupryashkin Vladimir Fedorovich, associate professor (docent), chair of Design Principles for Mechanisms and Machines, Institute of Mechanics and Energy, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Kandidat Nauk (PhD) degree holder in Engineering sciences, dep-general@adm.mrsu.ru

For citation: Knjaz'kov A. S., Naumkin N. I., Kupryashkin V. F. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya samohodnykh malogabaritnykh pochvoobrabatyvayushchikh frez putem ispol'zovaniya adaptivnykh jenergoeffektivnykh rabochikh organov [Effectivization of small self-propelled tillers by implementation of adaptive energy-efficient work-tools]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 186 – 194.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРИСОСУДИСТОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ КРОВИ НА ЛИПИДНЫЙ МЕТАБОЛИЗМ В ТКАНИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ ПЕРИТОНЕАЛЬНОМ ЭНДОТОКСИКОЗЕ

М. А. Спирина, И. В. Бойнова, П. В. Зеленцов

Эндогенная интоксикация является пусковым фактором в развитии полиорганной и полисистемной недостаточности. В ходе эксперимента исследовано антиоксидантное действие гелий-неонового лазерного облучения. Установлена способность внутрисосудистого лазерного облучения крови нивелировать дисметаболические нарушения в тканевых структурах головного мозга. Зарегистрировано снижение концентрации токсических субстанций в церебральной ткани и мембраностабилизирующее действие лазеротерапии.

Ключевые слова: эндогенная интоксикация, перитонит, перекисное окисление липидов, лазерное облучение крови, головной мозг.

INFLUENCE OF INTRAVASCULAR LASER IRRADIATION OF BLOOD ON LIPID METABOLISM IN BRAIN TISSUE DURING PERITONEAL ENDOTOXICOSIS

M. A. Spirina, I. V. Boynova, P. V. Zelentsov

Endogenous intoxication is one of the major pathogenetic mechanisms in the development of multiple organ failure. The experiments on dogs were done. On the course of the study was investigated the antioxidant effect of helium-neon laser irradiation on the severity of peritoneal endotoxemia. The ability of intravascular laser irradiation of blood to reduce the level dysmetabolic violations in brain tissue was detected. Were registered the decline in the concentration of toxic substances in the cerebral tissue and the membrane-stabilizing effect of laser therapy.

Keywords: endogenous intoxication, peritonitis, lipid peroxidation, laser irradiation of blood, the brain.

Синдром эндогенной интоксикации (СЭИ) в силу широкой распространенности в клинической практике в настоящее время привлекает внимание специалистов различного профиля [1; 3]. Выраженность эндотоксемии влияет как на прогноз заболевания, так и на его исход [2].

Характерная при эндотоксемии гипоксия запускает ряд патологических модификаций на системном и регионарном уровнях. В результате формируется полиорганная и полисистемная недоста-

точность, существенно увеличивающая риск летального исхода.

Ткань головного мозга весьма уязвима к снижению оксигенации. Причиной тому являются особенности метаболизма органа: несовершенство собственных систем антиоксидантной защиты, специфическая структурная организация нейрональной ткани, значительная концентрация легко окисляемых липидов, высокая интенсивность метаболических реакций. Рациональным с целью эффективной церебропротекции пред-

ставляется применение в комплексной терапии способов лечения, обладающих антиоксидантным действием [4; 5].

Экспериментальное исследование проводилось на взрослых беспородных собаках ($n=46$). Животным под тиопентал-натриевым наркозом моделировали острый каловый перитонит по способу А. П. Власова (1991). В контрольные сроки (на 1-е, 3-и, 5-е сутки после релaparотомии) фиксировались показатели, характеризующие липидный метаболизм в нейрональной ткани. После проведения санации брюшной полости применялась стандартная инфузионная и антибактериальная терапия (внутримышечные инъекции 2 раза в сутки раствора гентамицина из расчета 0,8 мг/кг массы тела; внутривенно 1 раз в сутки инфузии 5%-ного раствора глюкозы и 0,89%-ного раствора хлорида натрия из расчета 50 мл/кг массы тела животного).

Собаки были разделены на две равные группы методом случайной выборки. Изучались выраженность эндотоксикоза, показатели липопероксидации, липидный спектр в тканевых структурах головного мозга. В опытной группе наряду со стандартным комплексом лечения проводилось гелий-неоновое внутрисосудистое лазерное облучение крови с мощностью излучения на выходе световода 5 мВт и временем воздействия 15 мин (доза 0,1 Дж/см²).

В результате эксперимента у исследуемых животных было зафиксировано формирование СЭИ, что верифицировало адекватность модели острого перитонита. Существенно возрастала концентрация гидрофильных и гидрофобных токсинов в плазме крови. Так, титр молекул средней массы ($\lambda = 254$ нм и $\lambda = 280$ нм) достоверно увеличивался на 77,04–136,54 % и 54,66–137,05 % соответственно ($p<0,05$). Отмечено статистически значимое снижение общей и эффективной концентрации альбумина – на 18,96–30,73 % и 34,11–52,60 % ($p<0,05$) соответственно, а также резерва связывания альбумина на 21,21–50,00 % ($p<0,05$) относительно нормальных зна-

чений исследуемых показателей. Повышение индекса токсичности плазмы крови составляло 158,18–336,36 % ($p<0,05$) по сравнению с исходными цифрами.

СЭИ приводил к значительной интенсификации процессов перекисного окисления липидов. Экспериментальный перитонит сопровождался статистически значимым ростом спонтанного (на 28,14–188,33 %) и индуцированного (на 21,35–72,99 %) малонового диальдегида ($p<0,05$). Фосфолиполитическая активность повысилась на 92,31–117,95% ($p<0,05$), параллельно зарегистрировано уменьшение энзимного потенциала супероксиддисмутазы на 31,90–59,05 % ($p<0,05$) относительно физиологических значений изучаемых показателей.

Формирование СЭИ приводило к метаболическим перестойкам и модификации фосфолипидного спектра мембран нервных клеток (рис. 1).

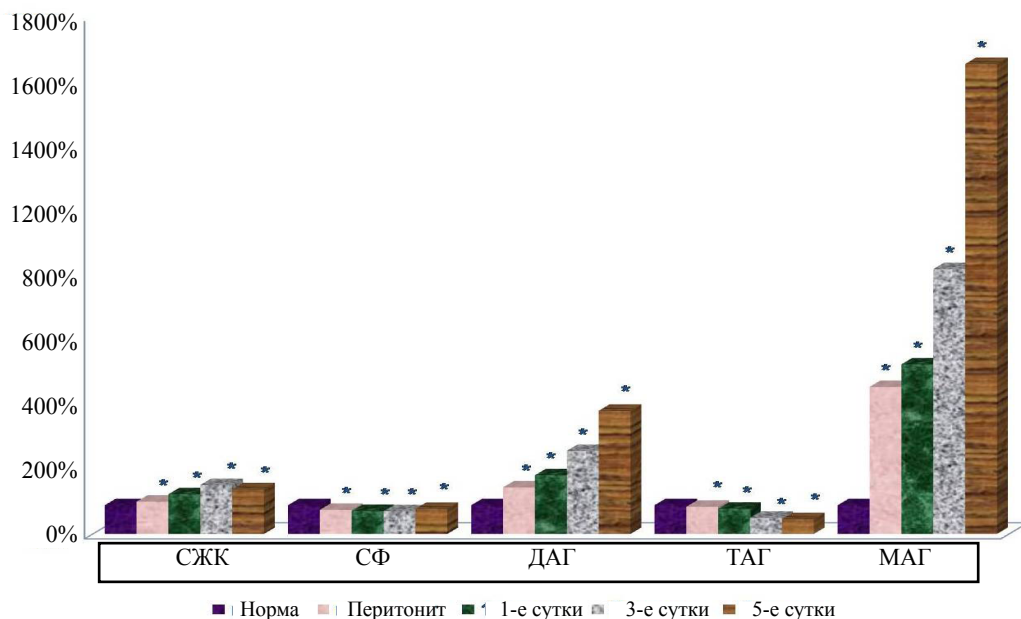
Анализ полученных данных показал изменение нормального соотношения фосфолипидных фракций в спектре – значительное повышение доли лизофосфолипидов и свободных жирных кислот. Вместе с тем процент легкоокисляемых суммарных фосфолипидов, холестерина и фосфатидилхолина снижался относительно нормы.

Высокое содержание свободных жирных кислот и лизофосфолипидов способствует дезорганизации и дестабилизации мембранных структур клеток. Таким образом, выявленные в ходе исследования дислипидные трансформации в церебральной ткани верифицируют значительную деструкцию биомембран нейроцитов при эндотоксикозе. Данные изменения являются одним из определяющих патогенетических механизмов при эндотоксическом повреждении головного мозга.

Включение низкоинтенсивного лазерного облучения в комплексное лечение приводило к снижению выраженности СЭИ, вызванного воспалением брюшины. В опытной группе зафиксировано уменьшение содержания гидрофильных и гидрофобных токсических

субстанций в плазме крови животных на 14,54–31,49 % и 3,93–24,96 % ($p<0,05$) соответственно по сравнению с данными контроля. В группе, получавшей лазеротерапию, существенно снижался индекс токсичности плазмы крови – на 23,08–52,89 % ($p<0,05$) по сравнению с

животными, проходившими стандартное лечение. Следует отметить, что на заключительном этапе эксперимента с применением гелий-неонового внутрисосудистого лазерного облучения крови индекс токсичности возвращался к начальному значению.



* – достоверность отличия по отношению к исходу при $p<0,05$; СЖК – свободные жирные кислоты; СФ – сфингомиелин; ДАГ – диацилглицеролы; ТАГ – триацилглицеролы; МАГ – моноацилглицеролы.

Рис. 1. Модификация липидного спектра в ткани головного мозга при токсическом поражении органа

В опытной группе отмечалось уменьшение титра ТБК-активных продуктов в церебральной ткани. Титр спонтанного малонового диальдегида был на 43,96 % ($p<0,05$) ниже контрольных показателей в финале эксперимента. На 5-е сутки после санации брюшной полости содержание индуцированного малонового диальдегида также статистически значимо уменьшалось по сравнению с группой контроля на 9,48 % ($p<0,05$).

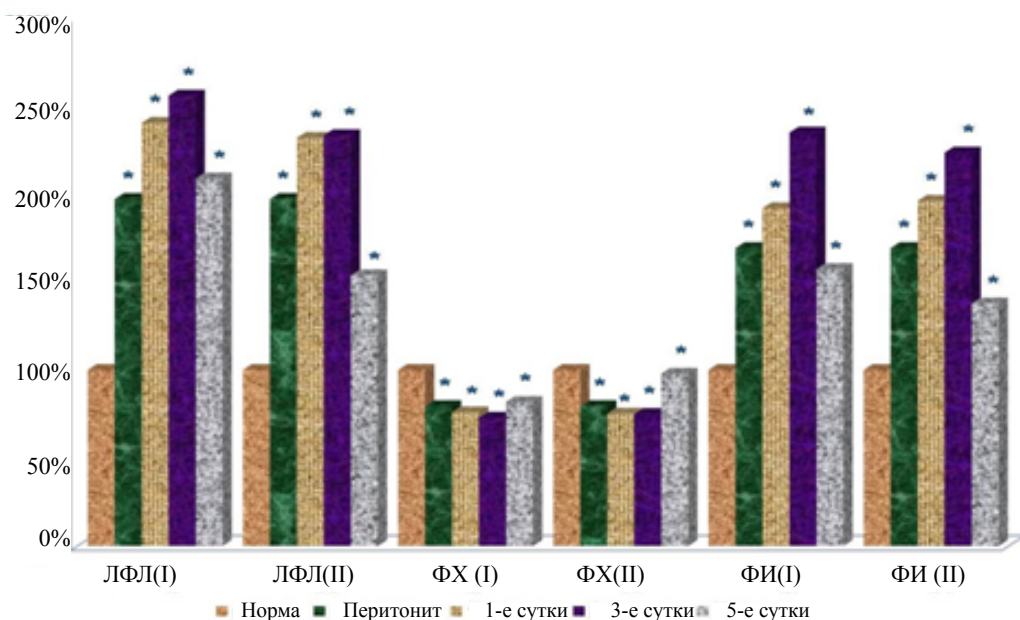
Внутрисосудистое лазерное облучение крови снижало интенсивность процессов липопероксидации при перитоните. На фоне комплексного лечения на 5-е сутки послеоперационного периода зарегистри-

ровано снижение энзимного потенциала фосфолипазы A_2 в тканевых структурах головного мозга на 21,05% ($p<0,05$) по сравнению с контрольными показателями. Также отмечалось увеличение ферментативной активности супероксиддисмутазы на 3-и и 5-е сутки исследования – на 27,76 и 24,48% ($p<0,05$) соответственно. Приведенные данные демонстрируют увеличение собственного антиоксидантного потенциала нейрональной ткани в группе животных, получавших лазеротерапию.

Под воздействием лазеротерапии в ходе эксперимента отмечена тенденция к нормализации липидного спектра мембранных структур клеток головного мозга.

Применение гелий-неонового лазерного облучения крови снижало содержание свободных жирных кислот, моно- и диацилглицеролов в церебральной ткани относительно значений идентичных показателей в контрольной группе на 19,48, 22,18 и 42,21% ($p<0,05$) на 5-е сутки проводимого

лечения. Отмечалось достоверное нарастание титра суммарных фосфолипидов в ткани головного мозга на 16,85% ($p<0,05$) вместе с уменьшением содержания фракций лизофосфолипидов и фосфатидилинозита на 19,48 и 12,44 % ($p<0,05$) на заключительном этапе эксперимента (рис. 2).



* – достоверность отличия по отношению к исходному значению при $p<0,05$; I – контрольная группа; II – опытная группа; ЛФЛ – лизофосфолипиды; ФХ – фосфатидилхолин; ФИ – фосфатидилинозит.

Рис. 2. Динамика соотношения фосфолипидных фракций на фоне применения лазеротерапии

На 5-е сутки послеоперационного периода доля фосфатидилхолина была выше контрольных значений на 19,69 % ($p<0,05$), достоверно не отличаясь от нормальных значений.

Таким образом, полученные в результате исследования данные показали, что низкоэнергетическое гелий-неоновое лазерное облучение крови при эндотоксикозе способствует снижению содержания токсичных продуктов перекисного окисления липидов в церебральной ткани за счет своего антиоксидантного действия.

Внедрение лазеротерапии в комплексное лечение на раннем послеоперационном периоде уменьшает интенсивность фосфолипидных реакций в тканевых структурах изучаемого органа, корректируя возникающие при СЭИ дисметаболические нарушения.

Полученные в ходе эксперимента показатели верифицировали благоприятное действие внутрисосудистого лазерного облучения крови на липидный метаболизм нейрональных мембран, ингибируя также мембранодеструктивные процессы в клетках головного мозга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арбулиев, К. М. Местная сорбционная терапия и ее эффективность в коррекции эндогенной интоксикации у больных острым гнойным пиелонефритом паранефритом / К. М. Арбулиев [и др.] // Урология. – 2013. – № 2. — С. 28–34.
2. Власов, А. П. Взаимосвязь функционально-метаболического статуса миокарда и печени при эндотоксикозе / А. П. Власов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 5. – Ч. 2. – С. 168.
3. Матвеев, С. Б. Эндогенная интоксикация в раннем послеоперационном периоде у больных сочетанной травмой живота и массивной кровопотерей / С. Б. Матвеев [и др.] // Клиническая лабораторная диагностика. – 2012. – № 6. – С. 27–29.
4. Gasparova, Z. Effect of antioxidants on functional recovery after in vitro-induced ischemia and long-term potentiation recorded in the pyramidal layer of the CA1 area of rat hippocampus / Z. Gasparova, V. Stara, S. Stolc // General Physiology and Biophysics. – 2013. – August 12.
5. Perrone, S. Oxidative stress and antioxidant strategies in newborns / S. Perrone [et al.] // Journal of Maternal-Fetal and Neonatal Medicine. – Oct. 2010. – Vol. 23. – № S3. – P. 63–65.

Поступила 14.11.2013 г.

Об авторах:

Спирина Мария Александровна, аспирант кафедры нервных болезней и психиатрии медицинского института ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), mas.dokuments@yandex.ru

Бойнова Ирина Владиславовна, доктор медицинских наук, профессор кафедры нервных болезней и психиатрии медицинского института ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), mivdok@yandex.ru

Зеленцов Павел Викторович, аспирант кафедры факультетской хирургии медицинского института ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева» (г. Саранск, Россия), belibizon@rambler.ru

Для цитирования: Спирина, М. А. Влияние внутрисосудистого лазерного облучения крови на липидный метаболизм в ткани головного мозга при перитонеальном эндотоксикозе / М. А. Спирина, И. В. Бойнова, П. В. Зеленцов // Вестник Мордовского университета. – 2014. – № 1. – С. 195–200.

REFERENCES

1. Arbuliev K. M., Arbuliev M. G., Magomedov M. G. Mestnaja sorpcionnaja terapija i ejo jeffektivnost' v korrekcii jendogennoj intoksikacii u bol'nyh ostrym gnojnym pielonefritom ili paranefritom [Local sorption therapy and its effectiveness in correction of endogenous intoxication in patients with acute purulent pyelonephritis and paranephritis]. *Urologija – Urology* 2013, № 2., pp. 28–32.
2. Vlasov A. P., Leshchankina N. Yu., Polozova E. I. The functional and metabolic status of myocardium and liver at endogenous intoxication. Fundamental research. 2012, no. 5 (part 2), pp. 168.
3. Matveev S. B., Fedorova N. V., Klychnikova E. V. Jendogennaja intoksikacija v rannem posleoperacionnom periode u bol'nyh sochetannoj travmoj zhivota i massivnoj krvopoterej [The endogenic intoxication during the early post-operational period in patients with combined intraabdominal injury and massive loss of blood]. *Klinicheskaya Laboratornaya Diagnostika – Clinical Pathology*. 2012, no. 6, pp. 27 – 29.
4. Gasparova Z., Stara V., Stolc S. Effect of antioxidants on functional recovery after in vitro-induced ischemia and long-term potentiation recorded in the pyramidal layer of the CA1 area of rat hippocampus. *General Physiology and Biophysics*. 2013, no. 12.
5. Perrone S., Negro S., Tataranno M. L. Oxidative stress and antioxidant strategies in newborns. *Journal of Maternal-Fetal and Neonatal Medicine*. 2010, vol. 23, no. 3, pp. 63 – 65.

About the authors:

Spirina Mariya Alexandrovna, post-graduate student, chair of Neurological Diseases and Psychiatry, Institute of Medicine, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), mas.dokuments@yandex.ru

Boynova Irina Vladislavovna, professor, chair of Neurology and Psychiatry, Institute of Medicine, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia). Doktor nauk degree holder in Medical sciences, mivdok@yandex.ru

Zelentsov Pavel Victorovich, post-graduate student, chair of Surgery, Institute of Medicine, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), belibizon@rambler.ru

For citation: Spirina M. A., Boynova I. V., Zelentsov P. V. Vlijanie vnutrisosudistogo lazernogo obluchenija krovi na lipidnyj metabolism v tkani головного мозга pri peritoneal'nom jendotoksikoze [Influence of intravascular laser irradiation of blood on lipid metabolism in brain tissue during peritoneal endotoxiosis]. Vestnik Mordovskogo Universiteta – Mordovia University Bulletin. 2014, no. 1, pp. 195 – 200.

Редакция журнала «Вестник Мордовского университета» объявляет о наборе научных статей

К публикации принимаются статьи, хроника, рецензии, обзоры кандидатов и докторов наук, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов (в соавторстве).

Материалы, выполненные в текстовом редакторе MS Word, представляются в редакцию в распечатанном и электронном вариантах.

Поля: левое – 3 см, верхнее и нижнее – 2 см, правое – 1,5 см.

Гарнитура – Times New Roman, кегль всей работы, кроме аннотации и ключевых слов, 14, межстрочный интервал – 1,5. Автоматические переносы не допускаются.

Объем статей – 8–10 страниц.

Для хроник, рецензий, обзоров – до 6 страниц.

Порядок изложения материала, кроме хроники, рецензий и обзоров:

1. УДК (проставляется в левом верхнем углу первой страницы).
2. Название на русском языке (выравнивание по центру страницы, полужирным, прописными).
3. Инициалы и фамилия автора (авторов) на русском языке (выравнивание по центру, полужирным).
4. Аннотация на русском языке (выравнивание по ширине страницы, кегль 12).
5. Ключевые слова на русском языке (выравнивание по ширине страницы, кегль 12).
6. Название на английском языке (выравнивание по центру страницы, полужирным, прописными).
7. Инициалы и фамилия автора (авторов) на английском языке (выравнивание по центру страницы, полужирным).
8. Аннотация на английском языке (выравнивание по ширине страницы, кегль 12).
9. Ключевые слова на английском языке (выравнивание по ширине страницы, кегль 12).
10. Основной текст.
11. Список использованных источников (на русском и английском языках).

Ссылки на литературу приводятся в квадратных скобках (например, [1, с. 222]). Список использованных источников сортируется по алфавиту и оформляется согласно требованиям ГОСТа 7.0.9 – 2009. Сначала указываются источники на русском языке, затем – на иностранных языках. Фамилии и инициалы авторов в библиографическом списке, а также названия источников должны быть верными, описания источников – как можно более полными.

Рисунки должны быть черно-белыми, в отдельных файлах, пронумерованы, с верными подписями, хорошего качества (не менее 600 на 600 пикселей). В формате JPEG рисунки не принимаются. Таблицы также нумеруются и подписываются.

Обязательна авторская справка (на русском и английском языках). В ней необходимо указать: фамилию, имя, отчество (полностью); должность; контактный телефон; адрес электронной почты.

Статьи, не отвечающие вышеуказанным требованиям, к публикации не принимаются. Редакция сохраняет за собой право отказать в публикации статьи с объяснением причин отказа. Плагиат недопустим.

Электронные версии статей будут размещены на сайте Научной электронной библиотеки. Журнал распространяется по подписке (подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70539), заявкам высших учебных заведений, учреждений образования и отдельных лиц, а также путем рассылки номеров наложенным платежом.

Адрес редакции: 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68. **E-mail:** vestnik_mrsu@mail.ru

Вдовин Сергей Михайлович – главный редактор. Тел.: +7 (8342) 24-48-88.

Полутин Сергей Викторович – заместитель главного редактора. Тел.: +7 (8342) 32-81-57.

Гордина Светлана Викторовна – ответственный секретарь. Тел.: +7 (8342) 48-14-24.