

# Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Афанасьев В.Н.** — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ  
**Басараб М.А.** — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Большаков А.А.** — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)  
**Булдакова Т.И.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Ван Мэйлин** — д.т.н., проф., Пекинский  
политехн. ун-т (КНР)  
**Зинченко Л.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Зубов Н.Е.** — д.т.н., проф., РКК «Энергия»  
**Кларк Р.** — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,  
Великобритания)  
**Криони Н.К.** — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)  
**Кузнецов А.Е.** — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)  
**Мальцева С.В.** — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ  
**Микаева С.А.** — д.т.н., проф., МИРЭА — РТУ  
**Неусыпин К.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Нефёдов Е.И.** — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН  
**Никифоров В.М.** — д.т.н., проф., ФГУП «НППАП  
им. Н.А. Пилюгина»  
**Пролетарский А.В.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Проталинский О.М.** — д.т.н., проф., НИУ МЭИ  
**Путилов В.Н.** — ООО «Изд-во "Инновационное  
машиностроение"» (заместитель  
главного редактора)  
**Румянцева О.Н.** — генеральный директор ООО «Изд-во  
"Инновационное машиностроение"»  
**Ся Юаньцин** — д.т.н., проф., Пекинский  
политехн. ун-т (КНР)  
**Фу Ли** — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)  
**Фёдоров И.Б.** — д.т.н., проф., академик РАН,  
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Хэ Юн** — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т  
науки и технологии (КНР)  
**Чистякова Т.Б.** — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)  
**Шибанов Г.П.** — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.  
центр им. В.П. Чкалова

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

## Адрес редакции:

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

## Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

Издаётся с 1947 г.

Том 75

2  
2021

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

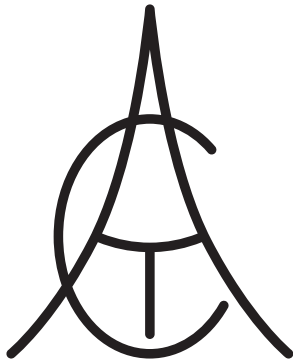
- Курносенко А.Е., Шахнов В.А.** Цифровая трансформация  
при подготовке производства изделий электроники . . . . . 51
- Силаев А.А., Сергеева О.Д.** Современный уровень автома-  
тизации производств пластмассовых изделий литьём под  
давлением . . . . . 56
- Чирков Е.В., Высоцкая И.А., Скрыпников А.В., Боров-  
лев А.О., Никитин В.В.** Методические рекомендации по ав-  
томатизированному проектированию трассы лесовозной ав-  
томобильной дороги с применением методов оптимизации . . . . . 60
- Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А.** Электриче-  
ский линейный асинхронный путевой датчик . . . . . 65
- Амелькина С.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А.** Соп-  
оставительный анализ актуальных нормативных документов  
в области энергоэффективного освещения . . . . . 69

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Цибизова Т.Ю., Клычников В.В., Косовский А.В.** Нелиней-  
ный фильтр Калмана с самоорганизующейся моделью . . . . . 73
- Исмаилов М.М., Асланова А.В.** Оптимизация полёта беспил-  
отных летательных аппаратов для гиперспектрального ис-  
следования морской поверхности в условиях аэрозольного  
загрязнения приводного слоя атмосферы . . . . . 79

### СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Воронов Е.М., Репкин А.Л., Хромов Ф.М., Куся А.М., Сы-  
чёв С.И., Хамаев Н.В.** Модель конфликтного взаимодей-  
ствия группировок с сетевым управлением строём  
управляемых объектов . . . . . 82
- Воробьёв Е.И., Дорофеев В.О., Михеев А.В.** Алгоритмы по-  
луавтоматического управления протезами рук . . . . . 92



# Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## Chief in Editor

**Shakhnov V.A.** – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,  
MSTU behalf of N.E. Bauman

## EDITORIAL COUNCIL:

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

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

## Editorial address:

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

## Founder:

LLC «"INNOVATIVE MASHINOSTROENIE" PUBLISHERS»

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

It is published since 1947

Volume 75  $\frac{2}{2021}$

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Kurnosenko A.E., Shakhnov V.A.** Digital transformation in pre-  
production of electronics products ..... 51  
**Silaev A.A., Sergeeva O.D.** The modern level of automation at  
the production of plastic items by injection molding ..... 56  
**Chirkov E.V., Vysotskaya I.A., Skrypnikov A.V., Borovlev A.O.,  
Nikitin V.V.** Methodological recommendations for the route auto-  
mated projection of a timber-carrying motor road using optimiza-  
tion methods ..... 60  
**Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safiullin R.A.** Electrical linear  
asynchronous path-control transducer ..... 65  
**Amelkina S.A., Duplenkova K.A., Mikaeva S.A.** Comparative  
analysis of actual normative documents in the field of energy ef-  
ficient lighting ..... 69

### MODERN TECHNOLOGIES

- Tsibizova T. Yu., Klychnikov V.V., Kosovskiy A.V.** Nonlinear  
Kalman filter with self-organizing model ..... 73  
**Ismailov M.M., Aslanova A.V.** Optimization of the unmanned  
aerial vehicles flight for hyperspectral study of the sea surface in  
conditions of aerosol pollution of the near-water layer of the atmo-  
sphere ..... 79

### SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

- Voronov E.M., Repkin A.L., Khromov F.M., Kuslya A.M., Sy-  
chev S.I., Khamaev N.V.** Model of conflict interaction of a groups  
with network-centric control formation of controlled objects . . . . 82  
**Vorobeve E.I., Dorofeev V.O., Mikheev A.V.** Algorithms for semi-  
automatic control of hand prostheses ..... 92



А.Е. Курносенко, доц., В.А. Шахнов, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

a.kurnosenko@gmail.com; shakhnov@iu4.bmstu.ru

## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Представлен обзор процесса подготовки производства электронных модулей на печатных платах с использованием концепции цифровых двойников. Показаны преимущества данного подхода с точки зрения повышения эффективности и сокращения затрат на проектирование и производство. Рассмотрены типовые задачи подготовки производства и программные средства их решения.*

**Ключевые слова:** подготовка производства; печатная плата; цифровой двойник; Индустрия 4.0.

*An overview of the pre-production process for electronic modules on printed circuit boards using the concept of digital twins is presented. The benefits of this approach for improving efficiency and reducing design and manufacturing costs are shown. Typical tasks for production preparation and software for their solution are considered.*

**Keywords:** pre-production; printed circuit board; digital twin; Industry 4.0.

**Введение.** На современном этапе проектирования и промышленного производства изделий, независимо от отраслевой принадлежности, возникают такие основополагающие проблемы и задачи, как ускорение вывода продукции на рынок, обеспечение поддержки изделия на всех этапах его жизненного цикла, сокращение затрат на проектирование, производство и испытание, возможность эффективного использования предыдущих наработок в новых изделиях [1]. Решение указанных задач предусматривает управление и обмен данными по конструкции изделий, их составу и структуре, технологическому процессу производства, оборудованию и оснащению, а также результатам инженерных анализов, инженерных расчётов, производства, контроля и испытаний, подготовки конструкторской, технологической и прочей документации, управления действующим производством, требований к изделию, взаимоотношений с поставщиками и заказчиками в различной среде разработки. Чтобы выстроить подобную цепочку управления данными, современные предприятия проходят стадию цифровой трансформации, основным результатом которой должно стать внедрение так называемых цифровых двойников (digital twins), в терминологии концепции «Industry 4.0» представляющих собой цифровые, т. е. полностью виртуальные макеты конструкции изделий в совокупности с моделями [2]. Этот макет может опционально дополняться информаци-

ей о дальнейших этапах жизненного цикла изделия (например, данными по его эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и утилизации).

Применение концепции цифровых двойников, в частности, позволяет:

отказаться от создания множества физических прототипов на стадиях НИОКР, выполнив большинство дорогостоящих испытаний на виртуальном макете и оптимизировав конструкцию по результатам этих испытаний;

сократить срок разработки с одновременным повышением качества готового изделия за счёт устранения ошибок и расхождений при выдаче/контроле исполнения технического задания (ТЗ), передаче данных между подразделениями предприятия и поставщиками, утверждении и внесении изменений в документацию;

оценить показатели производственного процесса до непосредственного запуска нового изделия в производство, проверить ряд сценариев построения технологического процесса, компоновки производственных участков, назначения оборудования, оснащения и производственного персонала, выполнить нормирование производственных операций, выбрав и реализовав наиболее эффективный вариант реализации производства;

быстрее реагировать на замечания и рекламации, поступающие от потребителей, внося соответствующие изменения в конструкцию и технологию изделия.

В такой высокотехнологичной отрасли с изначально высоким уровнем цифровизации, какой является производство электронной аппаратуры, перечисленные преимущества цифровых двойников проявляются наиболее ярко, а их внедрение обещает существенную экономию ресурсов и средств предприятия. В данной работе рассматривается сборочное производство электронных модулей на печатных платах, как одно из наиболее распространённых и готовых к цифровизации типов производства электроники [3].

Рассмотрим внедрение цифровых двойников в технологический процесс и производство. Существует два распространённых типовых сценария: подготовка действующего производства для запуска нового изделия и создание нового производственного участка под типовое изделие. В работе рассмотрен первый из указанных сценариев.

Цифровой двойник действующего производства электронных модулей на печатных платах должен включать в себя следующие составляющие:

комплект конструкторских данных по изделию — электронный модуль на печатной плате — в электронном виде (конструкторский электронный состав изделия — КЭСИ) в составе: схем электрических принципиальных / функциональных / структурных, схем соединений (монтажных) и пр. по необходимости, проектов печатных плат в ECAD-системе с выполненной трассировкой, назначением и расстановкой компонентов, проекта модуля на печатной плате в MCAD-системе с взаимно однозначным соответствием данных ECAD/MCAD-систем, рабочих чертежей печатных плат, сборочных чертежей ячеек, сборочного чертежа изделия, перечня элементов и спецификаций;

данные по электронным, механическим и электромеханическим компонентам в составе изделия, включая схемные обозначения, номиналы, размеры и допуски, виды упаковки, соответствующие посадочные места — размеры и допуски контактных площадок, 3D-модели;

данные по номенклатуре и программам выпуска изделий, включая варианты изготовления; типовые технологические процессы (ТП) по данному классу изделий;

данные по технологическому сборочному оборудованию — форматам входных данных, трансляторам для подготовки управляющих технологических программ (УТП) для автоматизированных (графаретная печать/дозирование, установка компонентов, пайка волной, оплавлением, парофазная, селективная и пр.,

автоматическая оптическая инспекция, отмывка, нанесение влагозащитных покрытий, визуальный контроль, рентгеновский контроль, функциональный контроль), вспомогательных (транспортировка, накопление/выдача, переверт плат и пр.), а также ручных/полуавтоматических операций (входной контроль комплектующих, подготовка паяльной пасты, формовка выводов, дозирование, монтаж, упаковка и пр.);

данные по технологическому оснащению — питателям из лент, кассет, поддонов, россыпи, трафаретам и рамам, дозаторам, вакуумным насадкам для захвата и установки компонентов, паллетам для пайки волной и селективной пайки, адаптерам типа «ложе гвоздей», летающим пробникам (щупам) для установок функционального контроля и т. п. с установленным соответствием по характеристикам с электронными компонентами, печатными платами и их конструктивными элементами;

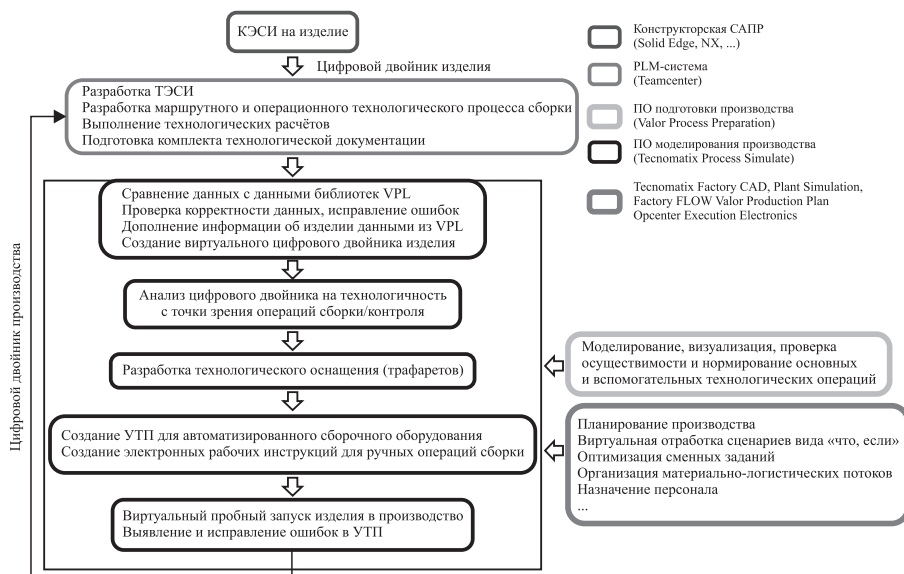
данные по технологическим материалам в соответствующих упаковках — припой и паяльная паста (бруски, катушки, банки, шприцы, картриджи и пр.), флюс (шприцы, канистры и пр.), жидкости для отмывки и пайки в паровой фазе (канистры), влагозащитные материалы и пр.

Процесс работы с цифровым двойником изделия — модуля на печатной плате — рассмотрим на примере программного обеспечения (ПО) компании Siemens Digital Industries Software. На рис. 1 представлен обобщённый алгоритм подготовки производства данного типа изделий.

Работа в целом происходит под контролем системы управления жизненным циклом изделия Teamcenter (TC) [4, 5]. Именно в модуль Teamcenter Manufacturing конструктор закладывает КЭСИ по изделию из конструкторской САПР (SolidEdge, NX), а технолог на основе этих данных создаёт уже технологический электронный состав изделия (ТЭСИ) и разрабатывает маршрутный и операционный технологические процессы сборки с выполнением технологических расчётов и подготовкой комплекта технологической документации. Так как модуль на печатной плате, как правило, входит в состав изделия более высокого уровня иерархии — блока, то процесс сборки на уровне блока также выполняется в модуле Teamcenter Manufacturing при необходимости.

Для непосредственной подготовки производства модуля на печатной плате применяется программное обеспечение Valor Process Preparation (VPP) [6—8].

На первом этапе VPP загружает из TC конструкторские данные по изделию, сравнивает



**Рис. 1. Обобщенный алгоритм подготовки производства модулей на печатных платах с использованием ПО компании Siemens Digital Industries Software**

информацию (например, по комплектующим) с данными из собственных библиотек, проверяет корректность данных, дополняет информацию об изделии своими данными из библиотеки компонентов ValorPartsLibrary (VPL) и создаёт виртуальный цифровой прототип (двойник) изделия. Обмен «интеллектуальными» данными проекта ведётся в стандартном отраслевом формате ODB++, который позволяет импортировать характерную для процесса сборки информацию практически из любой САД-системы, включая схемные обозначения и наименования компонентов, количество и шаг выводов, координаты установки, высоту, угол поворота, номера контактов и наименования цепей. Кроме того, загружаются данные по реперным знакам и, при наличии мультиплицирования, групповой панели. Важно отметить, что при этом происходит объединение данных конструкторских чертежей и спецификации и одновременно устраняются возможные противоречия между данными по компонентам из КЭСИ и в системе управления ресурсами предприятия (ERP).

Также на этом этапе можно обнаружить ошибки в назначении контактных площадок компонентам (например, когда компонент, выполняющий одинаковую электрическую

Item	CPN	Manufacturer	MPN	VPL-Package
1	G8316005-244	KEMET	C1210C22K5RAC-LWR	DSO-C2/X-L60W32T25
		WALSIN	I210B22K5KKCT-CRM	DSO-C2/X-L60W31T3
		AVX	10125C224KATA2A-KOL	DSO-C2/X-L64W25T3

**Рис. 2. Пример различного исполнения компонента одного назначения от различных поставщиков**

функцию, в зависимости от своего исполнения у различных поставщиков требует различных контактных площадок) (рис. 2), что может быть изначально не учтено в проекте [6].

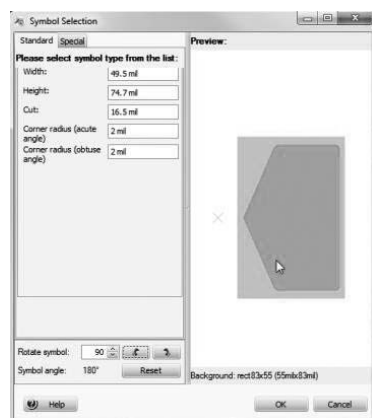
На следующем этапе проводится анализ цифрового двойника изделия на технологичность с точки зрения операций сборки / контроля [6, 7]. С помощью предварительно созданных в ПО VPP правил проверяют, например, такие ключевые параметры модуля на печатной плате, как допустимые зазоры между компонентами, разрешённые/запрещённые зоны для монтажа компонентов, правильность задания, расположения и оформления реперных знаков,

доступность мест установки компонентов для последующего ремонта и т. д. Здесь важно отметить, что анализ на технологичность проводится уже с учётом загруженных из библиотеки VPL реальных компонентов с точными значениями размеров корпусов, информация о которых не всегда доступна и актуальна на этапе конструкторского проектирования.

На этапе разработки технологического оснащения с помощью ПО VPP разрабатываются конструкции трафаретов для нанесения паяльной пасты. Используя настраиваемые правила, создаётся рисунок апертур, а результат конвертируется в формат OVB++ или Gerber 274X для отправки производителю трафаретов. Правила, относящиеся к конструкции апертур, включают в себя, например, скругления углов для качественного отделения паяльной пасты, уменьшение линейных размеров апертуры для предотвращения просачивания пасты под трафарет, определение минимально допустимого размера апертуры для типа используемой паяльной пасты, разбиение крупной апертуры на части перемычками для предотвращения вычерпывания пасты rakelом при нанесении и пр. В качестве примера на рис. 3 показано создание апертуры характерной формы, предотвращающей выдавливание излишков паяльной пасты под компонент с образованием шариков припоя при последующем оплавлении [6].

Далее технолог переходит к этапу создания УТП для автоматизированного сборочного оборудования. ПО VPP способно создавать такие программы не только для автоматов установки компонентов, но и для установок функционального контроля с летающими проб-





**Рис. 3.** Создание апертюры трафарета в форме исходной бейсбольной базы Homebase для предотвращения дефектов пайки

никами и адаптерами типа «ложе гвоздей», систем автоматической оптической инспекции нанесения паяльной пасты и готовых модулей, а также систем рентгеновского контроля. УТП автоматов установки компонентов предусматривают оптимизацию размещения питателей и последовательности захвата/установки компонентов [9], которая выполняется либо с привлечением ПО самих автоматов, либо внутренними алгоритмами ПО VPP. Здесь важно отметить, что в целях оптимизации используется полная кинематическая модель оборудования, включая приводы сборочных головок, конфигурацию питателей и их ёмкость, вакуумные захваты, камеры системы технического зрения и пр. Созданная УТП с помощью встроенного транслятора кодируется для применения в конкретном сборочном автомате конкретного производителя. Так как все данные хранятся непосредственно в цифровом двойнике, транс-

ляция УТП на оборудование другого производителя выполняется просто и не затрагивает исходные данные проекта.

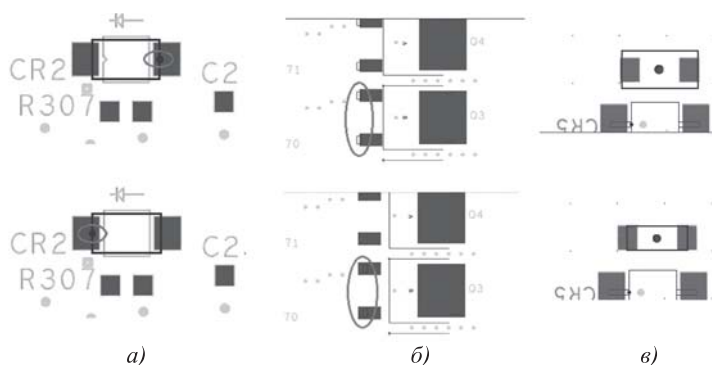
Помимо УТП для автоматизированных операций можно создавать электронные рабочие инструкции (статические либо интерактивные) для ручной сборки, приближая тем самым реализацию концепции безбумажного производства.

Полезная функция, наглядно демонстрирующая преимущества цифрового двойника изделия, носит название Virtualstickytape (виртуальная клейкая лента). С её помощью можно осуществить виртуальный пробный запуск изделия в производство на конкретном сборочном оборудовании, выявив возможные ошибки в составлении УТП. ПО VPP моделирует процесс установки компонентов, и результат может быть проанализирован на предмет возможных ошибок, среди которых можно выделить типовые проблемы с отсутствием компонентов, неправильной полярностью, неверными координатами установки и несоответствием выбранных типоразмеров корпусов и контактных площадок (рис. 4) [6].

Созданный и проверенный таким образом цифровой двойник загружается обратно в систему ТС, откуда данные могут поступать дальше в систему ERP для стратегического планирования производства и ниже на уровень производственного участка, в систему MES (Manufacturing Execution System) для решения задач оперативного планирования и управления производством.

В процессе своей работы технолог обращается к различным дополнительным программным системам визуального моделирования и системного анализа [10—17]. Например, модуль Tecnomatix Process Simulate применяется для решения вопросов моделирования, визуализации, проверки осуществимости и нормирования основных и вспомогательных технологических операций (рис. 5) [10]. Данный модуль выполняет имитационное моделирование работы производственного участка с вовлечением антропоморфных манекенов (так называемых Jack'ов) с оценкой принципиальной реализуемости, эргономичности и производительности операций [11, 12].

Помимо этого, на этапе планирования дополнительно составляется расписание запуска изделий в производство с оптимизацией распределения производственных заданий на смену, выполняются балансировка технологических линий, назначение и оптимизация персонала, расшивка



**Рис. 4.** Примеры ошибок, выявляемых на этапе виртуального запуска изделия в производство с помощью виртуальной клейкой ленты ПО VPP:

*а* — противоположная полярность компонента; *б* — смещение выводов компонента относительно контактных площадок вследствие неправильного задания координат центра; *в* — несоответствие типоразмера корпуса контактным площадкам

«узких мест» с точки зрения производительности сборки, оптимизация переналадок технологического оборудования по критерию повышения производительности, сокращения такта выпуска, минимизации простоев оборудования и прочих непроизводительных потерь. Также на производственном участке организуются оптимальные материально-логистические потоки комплектующих, технологических материалов, оснащения, незавершённого производства, готовой продукции и пр. Данные задачи необходимо решать при наличии производственных ограничений и вероятности отказов разного рода. Эти и другие подобные операции выполняются с помощью таких программных средств, как FactoryCAD, PlantSimulation, FactoryFLOW из состава пакета Tecnomatix, а также (в том числе на этапе управления и анализа действующего производства) ПО ValorProductionPlans OrcenterExecutionElectronics.

Созданный в результате цифровой двойник производства передаётся обратно в ТС и становится доступным на всех уровнях проектирования и управления производством. При внесении изменений в конструкцию изделия или технологический процесс его производства все изменения также отразятся в данных ТС.

Полученный таким образом цифровой двойник позволяет гибко управлять как конструкцией изделия, так и технологией его производства, отражать в технологическом процессе внесённые изменения в конструкцию изделия и выполнять различные виртуальные тесты производственной структуры без необходимости физического запуска изделия в производство, что в результате сокращает затраты предприятия на подготовку производства и ускоряет выход на рынок новых изделий.

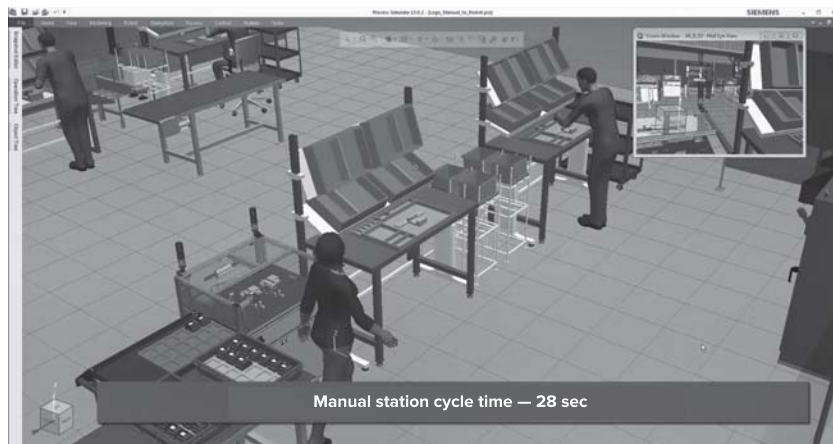


Рис. 5. Визуализация и хронометрирование ручных технологических операций, выполняемых на рабочем месте, с помощью модуля Tecnomatix Process Simulate

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 0705-2020-0041 «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

### Библиографические ссылки

1. Курносенко А.Е., Левин И.В., Семенякина В.О., Захаров Е.Р., Шерстюк А.Е. Методы и средства имитационного моделирования при изучении технологической подготовки производства электронной техники / В сб.: Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения: сборник трудов Международного форума. 2020. С. 310—314.

2. Шахнов В.А., Курносенко А.Е. Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции «Индустрия 4.0» / Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 2019. С. 585—594.

3. Левин И.В., Курносенко А.Е., Машина Н.А. Решения для проектирования, моделирования и оптимизации производств электронной аппаратуры // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1. С. 26—32.

4. Курносенко А.Е., Харитонов К.П. Применение системы управления данными об изделии Teamcenter при технологической подготовке производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 4. С. 42—48.

5. Курносенко А.Е., Харитонов К.П. Применение PLM-системы Teamcenter для управления жизненным циклом электронных изделий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 2. С. 56—62.

6. Siemens DI. Valor Process Preparation [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/en/valor-process-preparation-overview\\_tcm27-68922.pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/en/valor-process-preparation-overview_tcm27-68922.pdf) (дата обращения: 02.12.2020).

7. Isbell B. 2012. Process preparation for world-class competition [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mentor.com/pcb-manufacturing-assembly/resources/overview/process-preparation-for-world-class-competition-1c77dc2d-5789-4e0e-8d3a-7b376a25623f> (дата обращения: 02.12.2020).

8. Isbell B. 2011. SMT data preparation, load balancing, and schedule performance [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mentor.com/pcb-manufacturing-assembly/resources/overview/smt-data-preparation-load-balancing-and-schedule-performance-710a3b45-a559-49f3-a4f5-e0eb39ca6f74> (дата обращения: 02.12.2020).

9. Kurnosenko A.E., Arabov D.I. Optimization of electronic components mounting sequence for 3d mid assembly process /

Breakthrough directions of scientific research at MPEHI: Development prospects within the Strategic Academic Units, conference paper «KnE-Engineering». P. 311—321.

10. **Siemens Presents: ArtiMinds Advanced Robotics** [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.youtube.com/watch?v=5S1V2cG\\_lo4](https://www.youtube.com/watch?v=5S1V2cG_lo4) (дата обращения: 02.12.2020).

11. **Курносенко А.Е., Никольский Т.В., Ломаченко А.С.** Подготовка модели оборудования к выполнению имитационного моделирования в САПР // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 2. С. 24—30.

12. **Никольский Т.В., Ломаченко А.С., Курносенко А.Е.** Применение модуля Jack/Simulate human для имитационного моделирования операций сборки электроники // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2. С. 21—25.

13. **Власов А.И.** Концепция визуального анализа сложных систем в условиях синхронных технологий проектирования // Датчики и системы. 2016. № 8—9 (206). С. 19—25.

14. **Власов А.И., Ганев Ю.М., Карпунин А.А.** Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции «Бережливого производства» // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1 (161). С. 65—68.

15. **Vlasov A.I., Demin A.A.** Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering / ACM International Conference Proceeding Series. 13. Sep. CEE-SECR 2017 — Proceedings of the 13<sup>th</sup> Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia, 2017. No. 4. P. 1—7.

16. **Прудюс А.А., Карпунин А.А., Власов А.И., Фатхутдинов Т.М., Узенков Д.А.** Анализ технологических трендов развития корпоративных информационных систем в условиях цифровизации производства / Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 490—501.

17. **Juravleva L.V., Shakhnov V.A., Vlasov A.I.** Adaptation of professional engineering training to the challenges of modern digital production // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1134 AISC. P. 623—633.

#### Ссылка для цитирования

**Курносенко А.Е., Шахнов В.А.** Цифровая трансформация при подготовке производства изделий электроники // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 51—56. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-51-56.

УДК 621.7

**А.А. Силаев**, канд. техн. наук, доц., **О.Д. Сергеева**  
(Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ, г. Волжский)

oks21051993oxana@yandex.ru

## СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАСТМАССОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ЛИТЬЁМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

*Представлены современные системы автоматизированного управления термопластавтоматом (ТПА), которые позволяют решать такие задачи автоматизации, как контроль отдельных параметров, управление циклом производства отливок, контроль и управление качеством изготавливаемых изделий.*

*В результате проведённого анализа систем управления ТПА сделаны выводы о качестве работы, приведены технические характеристики и сформулированы основные критерии выбора систем управления для производителей пластмассовых изделий.*

**Ключевые слова:** литьё под давлением; термопластавтомат; технические средства автоматизации; изделия из пластмасс.

*The modern automated control systems for an injection molding machine (IMM), which allow solving such automation tasks as control of individual parameters, management of the production cycle of castings, control and management of the quality of manufactured products are presented. As analysis result of the injection molding machine control systems, conclusions were drawn about the quality are made, technical characteristics are adduced and the main criteria of the control systems choosing for manufacturers of plastic products were formulated.*

**Keywords:** injection molding; injection molding machine; technical automation means; plastic items.

**Введение.** В настоящее время производство изделий из пластмасс непрерывно увеличивается. Технический прогресс в этой об-

ласти постоянно развивается, с каждым годом появляются новые современные средства автоматизации. Благодаря этому, качество



пластмассовых изделий постоянно возрастает и изделия из пластмассы находят широкое применение в различных отраслях промышленности и повседневной жизни.

Технология литья пластмасс под давлением должна соответствовать постоянно растущему спросу на недорогие и высококачественные изделия и давать возможность получать качественные детали с высокой степенью точности при высокой производительности.

Литьё пластмасс под давлением — процесс переработки пластмассы из первоначального твёрдого состояния (гранул) в жидкое состояние и дальнейшего впрыска пластмассы в пресс-форму. Литьё под давлением позволяет производить разнообразные пластмассовые изделия [1].

При производстве пластмассовых изделий очень важно подобрать параметры процесса литья под давлением. Исследования, проведённые в последние годы, показали, что непосредственное влияние на качество отливки оказывают: температура расплава в зоне перед шнеком, температура стенки формы, скорость впрыска, давление в форме, деформация и герметичность формы. Все они легко поддаются измерению [2].

Чаще всего производители пластмассовых изделий сталкиваются с остаточным напряжением, которое возникает после его изготовления. Чтобы снизить остаточное напряжение после отливки изделия, необходимо решить проблемы, возникающие во время литья.

После изготовления пластмассового изделия остаточное напряжение непосредственно зависит от его геометрических характеристик, а также от технологических параметров (температуры, давления, скорости охлаждения и др.) [3].

Главная задача — правильно подобрать полимерный материал, который определяет качество готового изделия.

Прочность изделия зависит от технологических параметров, а также от конструкции технологической оснастки.

При выборе полимерного материала учитываются его эстетические и декоративные характеристики, но в первую очередь, необходимо обратить внимание на технологические свойства, в частности на текучесть расплава [3].

Одно из главных преимуществ методов литья под давлением заключается в его высокой экономичности. Только в результате одной рабочей операции можно изготовить высококачественные детали, которые готовы к использованию практически без доработки.

Таким образом, целью данной работы является подбор такой системы автоматизированного управления, которая позволила бы решить следующие задачи автоматизации: контроль от-

дельных параметров, управление циклом производства отливок, контроль и управление качеством изготавливаемых изделий.

В настоящее время применение автоматизированных систем управления при литье пластмассовых изделий является неотъемлемой частью технологического процесса. Для наиболее эффективной работы производители используют АСУ ТП, всё чаще отдавая предпочтение замене ручного труда на автоматические линии, поскольку стоимость ручного труда возрастает, а требования к качеству пластмассовых изделий со временем только растут [4].

Рассмотрим более подробно современные технические средства автоматизации для управления технологическим процессом литья под давлением.

**Система управления термопластавтоматом ИСУ-01А.** Система управления термопластавтоматом ИСУ-01А предназначена для управления рабочим циклом термопластавтомата и автоматического регулирования температуры в материальном цилиндре.

Система управления сконструирована так, что она позволяет подключать не один блок входов-выходов, а несколько (если требуется большее количество дискретных входов-выходов). Аналогично можно подключать несколько блоков измерения температуры, управления пропорциональными клапанами и т. д. [5].

Характеристики системы управления ИСУ-01А: режимы работы системы управления термопластавтоматом ИСУ-01А — наладочный, ручной, полуавтоматический, автоматический, работа с арматурой;

специальные режимы работы — декомпрессия, интрузия, дегазация, литьевое пресование.

Преимуществом данной системы является сохранение технологических параметров для разных форм и режимов литья. Энергонезависимая память позволяет хранить до 30 вариантов настроек станка, что позволяет значительно ускорить пусконаладочные работы на производстве.

Кроме того, для удобства пользования в системе управления ИСУ-01А параметры и настройки станка разбиты по узлам машины и выполняемым операциям. Например, меню «узел запирающего» разбито на подменю «запирание формы», «раскрытие формы», «выталькатель», «сброс изделия», «пневмосдуд».

Ещё одним важным преимуществом является блокировка изменения параметров литья. При попытке оператора выполнить неправильные действия они будут заблокированы с выводом сообщения на экран о причине блокировки.

Данная система успешно работает с расширенным списком термопластавтоматов. Она значительно упрощает контроль качества литья пластмассовых изделий и работу оператора. Применение данной системы актуально в условиях массового производства пластмассовых изделий ежедневного пользования, которые не требуют дополнительной механической обработки. Важным преимуществом является невысокая стоимость ИСУ-01А. Использование ИСУ-01А на производстве упрощает контроль за качеством готовой продукции.

**Система управления KePlast «КЕВА».** Технические специалисты австрийской компании КЕВА АГ предлагают оптимизированные экономические решения по автоматизации производства для индустрии переработки пластмасс, включая системы управления литьевым оборудованием [6].

Как и предыдущая система управления, система KePlast «КЕВА» способна работать с любым типом литьевой техники. Комплексная структура решений KePlast позволяет осуществлять управление всеми типами систем с помощью одного программного приложения.

В случае ужесточения требований к качеству изготавливаемых пластмассовых изделий необходимо произвести обновление только аппаратных компонентов, а программное обеспечение остаётся без изменений. Таким образом, снижаются затраты на программирование и сокращается срок ввода оборудования в эксплуатацию.

На рис. 1 представлен модельный ряд систем управления KePlast.

Основные технические характеристики KePlast i1000:

- предназначена для гидравлических стандартных литьевых машин;

- оснащена TFT-дисплеями от 7 до 12" с микропереключателем клавиатуры;

- процесс впрыска осуществляется по замкнутому контуру, включая мониторинг с помощью графика впрыска;

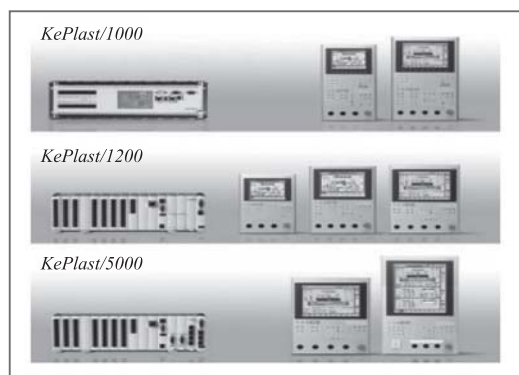


Рис. 1. Модельный ряд систем управления KePlast

- имеется SPC/статистический пакет управления технологическими процессами;
- расширяется через полевую шину;
- сетевая совместимость через Ethernet-соединение.

Благодаря мощному компьютерному ядру система управления KePlast i1000 работает в режиме реального времени, что обеспечивает непрерывный контроль качества продукции [7].

Основные технические характеристики KePlast i2000:

- предназначена для гидравлических, гибридных и полностью электрических литьевых машин;

- включает в себя масштабируемое оборудование на базе Intel Atom;

- оснащена высокоскоростной полевой шиной EtherCAT;

- оснащена TFT дисплеями от 12 до 15" с простым управлением;

- имеет бесшовную интеграцию технологии привода КЕВА, включая пакет приложений для полностью электрических литьевых машин;

- основанная на Linux и перспективная программная платформа для технологий Индустрии 4.0.

Аппаратное обеспечение серии i2000 состоит из высокопроизводительного одноплатного компьютера с масштабируемым уровнем производительности. Модули ввода-вывода или электроприводы подключаются через встроенную высокоскоростную шину EtherCAT в реальном времени [7].

Особенностью данной системы управления является индивидуальный подход к каждому типу литьевых машин. Так, например, компания разработала систему управления для вертикальных ТПА. Это специально разработанные панели управления модели KePlast i1000 V-IMM.

Основное преимущество модели KePlast i1000 V-IMM — обеспечение управления параметрами вертикального ТПА. Эта модель так же, как KePlast i1000, легко поддается настройке, что существенно упрощает пусконаладочные работы.

На рис. 2 представлена система KePlast i1000 V-IMM для автоматизации работы вертикальных ТПА.

В ряду представленных моделей КЕВА существует система для удалённого управления термопластавтоматом и мониторинга его состояния. Компания разработала устройство KePlast ServiceNet, которое, как заявляет производитель, действует по принципу «подключись и работай».

Одним из преимуществ системы KePlast ServiceNet является возможность подключения и управления технологическими пара-



Рис. 2. Система KePlast i1000 V-IMM

метрами из любой точки мира. Также с помощью KePlast ServiceNet возможно удалённо осуществлять диагностику машин.

При установке данной системы нет необходимости производить изменения в IT-инфраструктуре компании или схеме подключения ТПА. Благодаря этому, инженер может контролировать взаимодействие между оператором и оборудованием. Применение такой системы управления особенно актуально на крупном производстве пластмассовых изделий.

На рис. 3 представлена система KePlast ServiceNet для удалённого управления ТПА.

Линейка систем управления ТПА марки КЕВА удобна в использовании для контроля качества готовой продукции. Каждая из систем подходит для массового производства пластмассовых изделий высокого качества. Применение удалённого доступа управления и мониторинга значительно упрощает работу производства.

Такой современный набор технологических характеристик даёт возможность применять системы KePlast не только в условиях массового производства мелких деталей высокого качества, но и контролировать процесс литья тонкостенных изделий, а также позволяет избежать остаточного напряжения в процессе литья.

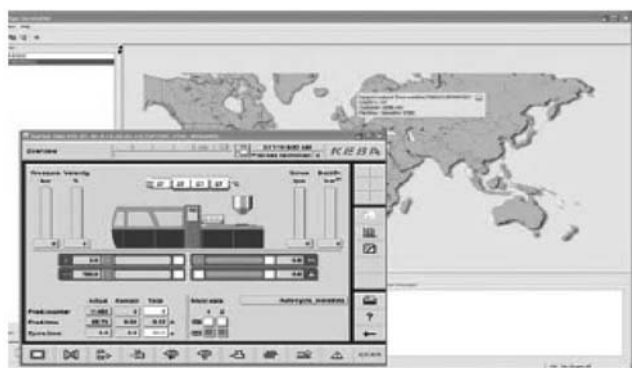


Рис. 3. Система KePlast ServiceNet для удалённого управления ТПА

Единственным недостатком систем управления ТПА марки КЕВА является высокая стоимость оборудования. Не всем производителям пластмассовых изделий будет выгодно использовать эти системы. Но применение данных систем в таких крупных производствах, как автомобильная промышленность, авиапромышленность и производство бытовой техники, использование KePlast будет обосновано.

**Заключение.** Приведён обзор технических средств для автоматизации процесса литья под давлением. Для автоматизации процесса литья под давлением рассмотрены 5 современных систем управления для термопластавтоматов. К основным критериям выбора современных систем управления относятся диапазон контролируемых параметров, удобство подключения к ТПА и IT-инфраструктуре компании, рабочая среда, технические характеристики и стоимость оборудования.

#### Библиографические ссылки

1. Сотник С.В., Иевлев Е.В. Особенности формирования показателя качества при изготовлении пластмассовых изделий // Вестник. 2011. № 58 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/15682/1/vesnik\\_HPI\\_2011\\_58\\_Sotnik\\_Osobennosti.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/15682/1/vesnik_HPI_2011_58_Sotnik_Osobennosti.pdf) (дата обращения: 05.09.2020).
2. Управление процессом литья под давлением [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://e-plastic.ru/specialistam/litie-pod-davleniem/upravlenie-processom-litya-pod-davleniem/> (дата обращения: 10.09.2020).
3. Бортников В. Г. Выбор марки полимера с учётом геометрических размеров изделий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-marki-polimera-s-uchyotom-geometricheskikh-razмеров-izdeliy> (дата обращения: 15.09.2020).
4. АСУ ТП производства по выпуску изделий из пластмасс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://asupro.com/work/asutp-manufactures-release-plastic-items.html> (дата обращения: 20.09.2020).
5. Система управления ICY-01A [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ogm-group.ru> (дата обращения: 25.09.2020).
6. КЕВА [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.keba.com/en/home> (дата обращения: 29.09.2020).
7. Автоматизация литьевого производства // Пластикс. 2011. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.plastics.ru/index.php?lang=ru&view=journal&category\\_id=173&year=2011](https://www.plastics.ru/index.php?lang=ru&view=journal&category_id=173&year=2011) (дата обращения: 01.10.2020).

#### Ссылка для цитирования

Силаев А.А., Сергеева О.Д. Современный уровень автоматизации производств пластмассовых изделий литьём под давлением // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 56—59.

УДК 004.942 + 625.7

**Е.В. Чирков**

(Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова),

**И.А. Высоцкая**, канд. физ.-мат. наук, **А.В. Скрыпников**, д-р техн. наук, проф., **А.О. Боровлев**  
(Воронежский государственный университет инженерных технологий),

**В.В. Никитин**, канд. техн. наук, доц.

(Мытищинский филиал Московского государственного технического университета  
им. Н.Э. Баумана)

i.a.trishina@gmail.com

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРАССЫ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

*Рассмотрена технология проектирования лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации. Разработаны методические рекомендации по автоматизированному проектированию, которые позволяют получить положение трассы, близкое к оптимальному, и учесть ряд технических и экономических критериев.*

**Ключевые слова:** технология проектирования; системы автоматизированного проектирования; критерии оптимальности.

*The technology of designing a timber-carrying motor road with the use of optimization methods is considered. Methodological recommendations for automated projection, which allow obtaining the position of the route close to the optimal one and taking into account a number of technical and economic criteria are developed.*

**Keywords:** projection technology; automated projection systems; optimality criteria.

**Введение.** Технология проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги в пространстве с использованием предложенных в данной работе методов принципиально отличается от технологии вариантного проектирования трассы. При вариантном проектировании инженер намечает трассу в плане, после чего проектирует оптимальный продольный профиль по заданному плану трассы. Затем проектировщик анализирует трассу в соответствии с полученным решением профиля, используя оценочные характеристики, которые могут быть определены с применением системы автоматизированного проектирования автомобильных дорог (САПР-АД) (например, суммарные приведённые затраты, строительная стоимость и др.) и намечает пути улучшения трассы. По новым направлениям вновь проектируется продольный профиль. Так повторяется до тех пор, пока не будет получено удовлетворительное решение.

В предлагаемой технологии, наоборот, проектировщик намечает продольный профиль, а оптимальное положение трассы в плане, соответствующее данному продольному профилю, определяется с помощью методов, из-

ложенных в работе [1]. Затем проектировщик одновременно оценивает решение профиля и плана, может скорректировать профиль и по уточнённому профилю вновь оптимизировать план трассы до получения окончательного решения.

Применение предложенной технологии при проектировании дорог на пересечённой местности позволит получать трассу, близкую к оптимальной.

**Технология проектирования трассы с применением методов оптимизации по технико-экономическому критерию.** Технология проектирования зависит от целого ряда факторов. В общем случае может быть предложен следующий порядок:

определение перспективных направлений трассы и назначение границ участков проектирования;

разработка эскизной трассы;

проектирование продольного профиля по эскизной трассе;

формирование информационной модели зоны варьирования;

проектирование оптимальной «цепочечной» трассы;

анализ «цепочечного» плана и профиля, при необходимости, уточнение отдельных характеристик и повторная оптимизация «цепочечного» плана трассы;

получение базовой трассы путём сглаживания «цепочечного» плана по методу аппроксимации последовательности точек;

корректировка информационной модели и привязка её к базовой трассе;

оптимизация геометрических характеристик элементов трассы.

При использовании методов оптимизации под направлением понимается множество возможных вариантов трассы, для которых в зоне варьирования могут быть созданы вполне точные модели критерия, обеспечивающие унимодальность целевой функции. Выбор направлений трассы осуществляется на основе анализа технико-экономических показателей района её проектирования.

Выбор направлений выполняется в несколько этапов. Сначала осуществляется построение оптимальной сети лесовозных автомобильных дорог, для чего могут быть использованы методы, предложенные в работах [2, 3]. Затем осуществляется выбор конкурентоспособных направлений. Для выполнения этого этапа в работах [4, 5] предложены методы поиска оптимального направления трассы дороги. Направления могут быть также намечены проектировщиком традиционными способами. Путём сопоставления их по укрупнённым технико-экономическим показателям отбираются одно или несколько направлений, по которым в дальнейшем выполнят более детальную проработку.

По конкурентоспособному направлению намечают эскизную трассу. Выполнение данного этапа также существенно зависит от особенностей объекта. Эскизная трасса может намечаться вручную проектировщиком или генерироваться программно.

Для сокращения этапов проектирования она должна, по возможности, учитывать технико-экономические требования к трассе, располагаться в пределах допустимой зоны варьирования и, хотя бы приблизительно, выдерживать ограничения по кривизне трассы, чтобы:

уменьшить искажения проектного продольного профиля за счёт изменения длины трассы в процессе оптимизации;

более точно учесть ограничения по кривизне на этапе проектирования «цепочечного» оптимального плана трассы.

В зависимости от рельефа местности участки трассы могут быть:

напряжённые в продольном профиле (например, перевальные);

однослоновые ненапряжённые;

переходящие с одного склона на другой (например, на холмистой местности или при пересечении водотоков).

При проектировании напряжённых в профиле ходов в горных районах или на пересеченной местности в качестве эскизной трассы может использоваться линия равных уклонов, получаемая автоматически или намечаемая проектировщиком традиционными методами. В последнем случае её укладывают, начиная с седловых точек. Продольный уклон линии принимается, как правило, на 5...15 % меньше допустимого в зависимости от извилистости трассы. При этом следует учитывать возможность устройства так называемых разгрузочных участков, где принимают уклон менее 2 %. При пересечении оврагов, хребтов или других препятствий линии равных уклонов желательнее спрямлять так, чтобы приблизительно выдерживалось ограничение по кривизне трассы.

По эскизной трассе проектируется продольный профиль. Эта работа может быть выполнена с использованием САПР-АД. При этом следует иметь в виду, что принципы проектирования продольного профиля отличаются от принятых в настоящее время. В практике на этом этапе внимание уделяется не столько требованию оптимальности, так как она будет обеспечиваться изменением трассы в плане, сколько требованиям к геометрии в продольном профиле, например, соблюдению требования к сочетанию элементов плана и профиля при трассировании на холмистой местности, или требований при трассировании напряжённых ходов и др.

Как установлено в работе [6], основные затраты можно систематизировать в четыре вида:

$K_1$  — затраты, пропорциональные длине трассы в пределах определённого участка (1-й вид);

$K_2$  — затраты по сосредоточенным объектам (2-й вид);

$K_3$  — линейно-изменяющиеся в пределах определённого участка удельные затраты на 1 м дороги (3-й вид);

$K_4$  — прочие затраты (4-й вид).

Требуемая степень детальности и точности информационной модели устанавливается в зависимости от стадии проектирования этапа оптимизации, особенностей местности и объекта, а также других условий.



Формирование информационной модели является наиболее ответственным и трудоёмким этапом, который включает:

формирование данных о геометрии эскизной трассы;

выбор зоны варьирования и назначение границ участков, отличающихся экономическими характеристиками;

формирование и описание зависимостей удельных затрат на освоение 1 м дороги на каждом из участков  $U_i$  [6];

формирование данных об ограничениях и других характеристик.

Сначала осуществляется предварительный выбор зоны варьирования, которая, по возможности, должна охватывать область конкурентоспособных вариантов трассы и обеспечивать требуемую точность моделей критерия и ограничений.

На предварительную зону варьирования формируется цифровая модель рельефа (ЦМР), с использованием которой в дальнейшем строятся зависимости [6]. На этом этапе зона варьирования уточняется, что окончательно представляется в информационной модели в виде ограничений по длине рассматриваемого участка. В зоне варьирования намечают места сооружений с сосредоточенными затратами и границы затрат 1 и 3-го видов. При этом следует иметь в виду, что детальность учёта различных факторов должна зависеть от этапа проектирования.

Методом предусмотрено, что границы участков с различными затратами 1-го вида представляются линейными зависимостями, в общем случае не совпадающими с направлением поперечных сечений, а границы затрат 3-го вида — прямыми перпендикулярными эскизной трассе.

Рассмотрим основные случаи выделения участков с различными по величине удельными затратами 1-го вида.

1. Конструкция и стоимость 1 м дорожной одежды зависят от интенсивности и состава движения, модуля упругости верхнего слоя земляного полотна, схемы организации строительства и др. [5]. Изменение конструкции дорожной одежды в зависимости от интенсивности движения может быть на пересечении проектируемой трассы с существующей лесовозной автомобильной дорогой. В этом случае границу затрат 1-го вида принимают по направлению существующей лесовозной автомобильной дороги. Наиболее часто в практике проектирования приходит-

ся сталкиваться с изменением стоимости дорожной одежды при чередовании участков выемок в скальных грунтах с насыпями или нескальными выемками. На участках скальных выемок дорожная одежда значительно дешевле, чем на остальном протяжении дороги, и это оказывает существенное влияние на выбор положения трассы. Для выделения участков с различными конструкциями дорожной одежды строят несколько поперечных профилей, на которых устанавливают границы скального типа дорожной одежды и наносят их на план. В общем случае полученные зависимости [6] являются кусочно-линейными функциями с разрывами, обусловленными переломами поперечного профиля земли и изменением типов проектных поперечных профилей.

2. На участках дорог с затяжными продольными уклонами устраиваются дополнительные полосы, что приводит к увеличению удельных затрат на устройство 1 м дорожной одежды приблизительно в 1,5 раза. Это необходимо учитывать при поиске оптимальной трассы. Границы участков с затратами 1-го вида в этих случаях следует принимать перпендикулярными к эскизной трассе в середине отгона дополнительной полосы. Также могут выделяться участки уширения дорожной одежды на вогнутых вертикальных кривых. Иначе обстоит дело с границами уширений, устраиваемых на кривых в плане. Так как в процессе оптимизации положение кривых в плане меняется, первоначально границы принимаются применительно к эскизной трассе и перпендикулярно к ней, а на последующих этапах они уточняются.

3. На участках насыпей, возводимых из пылеватых грунтов, верхний слой земляного полотна устраивается из дренирующих грунтов с использованием определённых резервов или выемок. В выемках с неблагоприятными грунтовыми условиями под дорожной одеждой производится замена слабого грунта на дренирующий. При этом стоимость удаления грунта учитывается при определении затрат 3-го вида, а стоимость устройства верхнего слоя земляного полотна в этих случаях относятся к 1-му виду. Определение границ затрат в данном случае производится аналогично выделению участков с различными конструкциями дорожной одежды.

4. Затраты на устройство средних и больших мостов и путепроводов относятся, как правило, к 1-му виду [5]. Метод позволяет

учитывать широкий диапазон особенностей выбора трассы мостовых переходов.

Рассмотрим некоторые из них на примерах. Для больших мостов по приближённой трассе с учётом работ [3, 5] намечается схема моста (рис. 1).

На основе анализа выделяют участки, в пределах которых стоимость 1 м моста может быть принята постоянной, и намечают положение границ участков затрат в плане (рис. 2, а).

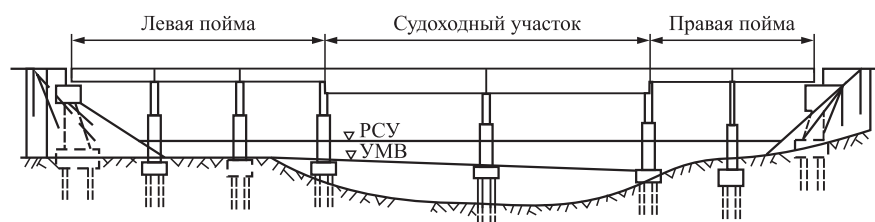


Рис. 1. Схема моста

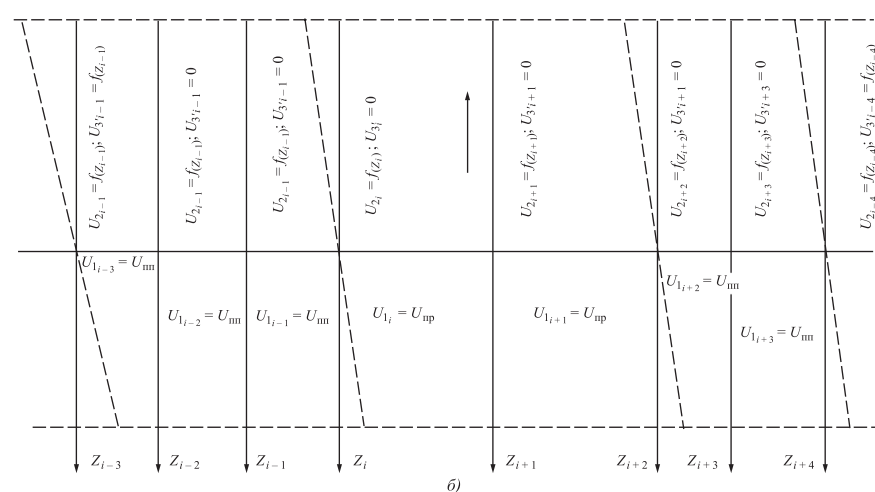
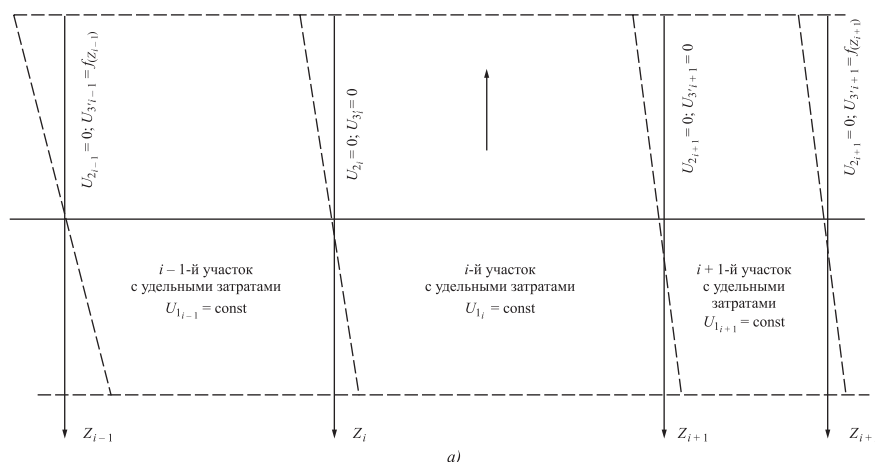


Рис. 2. Пример формирования информационной модели в районе мостового перехода:

а — схема разбивки на участки с выделением опор (затраты 2-го вида); б — схема разбивки на участки с выделением опор (затраты 2-го вида);  $U_{nm}$  и  $U_{np}$  — стоимость 1 м пролётного строения на пойменных и русловых участках соответственно

Если они не точно аппроксимируются линейными зависимостями в пределах зоны варьирования, то на последующих этапах уточняют границы участков с различными удельными затратами 1-го вида по аналогии с дорожной одеждой. В зависимости от стадии проектирования и особенностей объекта стоимость опор может включаться либо в затраты  $K_1$ , либо в затраты  $K_2$ . В последнем случае можно более точно учитывать влияние данного фактора, но увеличиваются затраты на подготовительные работы по созданию информационной модели, так как в этом случае дополнительно строятся зависимости для опор  $U_{2i} = f(Z_i)$ . Пример разбивки мостового перехода на участки показан на рис. 2, б.

В практике встречаются случаи, когда длина сооружения не зависит от угла пересечения трассы с руслом реки, например, на меандрирующих реках. Затраты на устройство таких сооружений следует относить к виду  $K_2$ .

5. Затраты на обстановку и принадлежности дороги ввиду своей незначительности, как правило, на общий объём затрат не влияют, но наиболее существенные из них могут добавляться к затратам вида  $K_2$  в пределах границ, намеченных основными составляющими затрат 1-го вида.

6. Удельные затраты на капитальный ремонт, текущий ремонт и содержание зависят от типа и ширины покрытия, следовательно, дополнительные границы для их учёта вводить не требуется. Величина данных затрат на 1 м<sup>2</sup> покрытия может быть определена в соответствии с работой [5].

7. Транспортно-эксплуатационные расходы, потери, связанные с затратами времени пассажиров, и потери от ДТП зависят от интенсивности и состава движения, а также других факторов. Границы этих затрат учитываются в местах пересечения дорог.

При создании информационной модели зоны варьирования

затраты 2 и 3-го видов объединяются и представляются в виде выпуклой гладкой кусочно-квадратичной зависимости  $U_{2i} + U_{3i} = f(Z_i)$  [6], строятся на основании предварительного конструирования земляного полотна и сооружений (при их наличии) в каждом сечении в соответствии с методикой [4]. При этом сначала строят фактические зависимости  $U_{2i} + U_{3i} = f(Z_i)$ , а затем они аппроксимируются кусочно-квадратичными зависимостями.

Точность аппроксимации может быть оценена и, если она недостаточна, необходимо скорректировать проектные решения (например, изменить ширину полосы варьирования в данном месте, конструкцию поперечных профилей или границы участков и т. д.).

Формирование информационной модели может быть выполнено с применением САПР-АД и использованием ЦМР в виде системы поперечных профилей, перпендикулярных эскизной трассе и совпадающих с назначенными границами участков. В общем случае информационная модель включает в себя:

- информацию о геометрии приближённой трассы в виде массивов координат точек;
- данные о границах затрат 1, 2 и 3-го видов;
- данные о границах зоны варьирования;
- данные об ограничениях геометрических характеристик элементов трассы и о границах их действия.

Информационная модель построена таким образом, что она может многократно использоваться на различных этапах проектирования. При необходимости детализации или уточнения модели она может модифицироваться.

**Заключение.** Приведённые методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением информационных моделей позволяют получить трассу с оптимальными геометрическими характеристиками её элементов и оптимальную по технико-экономическому критерию, т. е. при построении трассы учитываются участки с различными по величине удельными затратами.

На основе построенной таким образом информационной модели может выполняться проектирование плана трассы по методу, приведённому в работах [2—4]. Полученный в результате этого «цепочечный» план трассы анализируется проектировщиком. Необходимо обращать внимание на участки, где оптимизируемая трасса проходит по границе заданной полосы варьирования и, если в этих местах положение границ обусловлено нежёсткими тре-

бованиями, их целесообразно изменить, уточнив при этом остальные компоненты информационной модели. На данном этапе следует также проанализировать возможность изменения продольного профиля в целях улучшения общего пространственного решения трассы. При необходимости могут быть уточнены условия ограничений, стоимостные зависимости и другие компоненты информационной модели, после чего необходимо повторить цепочечную оптимизацию трассы в плане.

После того, как получена «цепочечная» линия, отвечающая всем предъявляемым к ней требованиям, её трансформируют в трассу, состоящую из общепринятых в практике проектирования элементов клотоид, круговых кривых и прямых. Это может быть выполнено с использованием программного обеспечения, реализующего метод аппроксимации последовательности точек.

Полученная в результате этого трасса принимается в качестве базовой для дальнейшей оптимизации геометрических характеристик элементов трассы в плане. На данном этапе необходимо преобразовать и уточнить информационную модель, которая имеет некоторые отличия по сравнению с моделью на предыдущем этапе, обусловленные особенностью используемого метода.

После оптимизации геометрических характеристик элементов трассы в плане информационная модель может включать в себя:

- информацию о геометрии базовой трассы в виде данных о начальных граничных условиях и массивов геометрических характеристик элементов трассы;

- пикетажное положение границ участков;
- данные об ограничениях геометрических характеристик элементов трассы;

- данные о границах участков, зонах варьирования и стоимостных зависимостях, структура которых принимается, как на предыдущем этапе.

На базе уточнённой информационной модели выполняется оптимизация геометрических характеристик элементов трассы в плане по методу, изложенному в работе [7].

Результаты анализируются, при необходимости может быть скорректирована информационная модель и повторён расчёт до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное решение.

Работы по проектированию оптимальной трассы выполняют по нескольким отобраным конкурентоспособным направлениям. Полученные в результате этого варианты

трассы сравниваются между собой по технико-экономическим показателям, что позволяет определить лучшее положение трассы лесовозной автомобильной дороги.

#### Библиографические ссылки

1. Умаров М.М., Скрыпников А.В., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Расчет плановых элементов криволинейной трассы, подобранной на стереомодели местности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 4 (364). С. 97—106.
2. Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В. Оптимизационная технико-экономическая модель реализации природоохранных мероприятий // Научное обозрение. Технические науки. 2014. № 2. С. 154.
3. Курьянов В.К. Повышение экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных лесовозных дорог // Экономика и производство. 2005. № 1. С. 35—37.
4. Чернышова Е.В., Скрыпников А.В., Самцов В.В., Абасов М.А. Лесовозные автомобильные дороги в транспортной сети лесопромышленного

предприятия // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 2. С. 95—101.

5. Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учётом влияния климата и погоды на условия движения: автореф. дис. д-ра техн. наук. 05.20.01 — технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Архангельск: САФУ, 2017. 40 с.

6. Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Саблин С.Ю., Высоцкая И.А. Информационная модель зоны варьирования трассы лесовозной автомобильной дороги // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 538—542.

7. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.

#### Ссылка для цитирования

Чирков Е.В., Высоцкая И.А., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Никитин В.В. Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 60—65.

УДК 621.313.13:621.314.571.001-24

И.Ф. Янгиров, д-р техн. наук, А.Р. Халиков, канд. физ.-мат. наук  
(Уфимский государственный авиационный технический университет),  
Р.А. Сафиуллин, канд. физ.-мат. наук  
(Башкирский государственный университет)

angirov@yandex.ru

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ПУТЕВОЙ ДАТЧИК

*Рассмотрена конструкция электрического линейного асинхронного путевого датчика для съёма состава железнодорожного транспорта. Датчик технологичен, прост в эксплуатации и при дальнейшем преобразовании может быть использован как опознаватель проходящего состава. Разработана математическая модель с выводами по полученным результатам. Датчик может быть применён при эксплуатации железнодорожного транспорта.*

**Ключевые слова:** привод асинхронный; электрический линейный датчик; магнитное число Рейнольдса; математическая модель электромагнитной силы; вагонный подвижной состав.

*The design of an electric linear asynchronous path-control transducer for counting the composition of railway transport is considered. The sensor is manufacturable, easy to operate and, upon further conversion, can be used as an identifier of a passing train. A mathematical model with conclusions based on the results obtained is developed. The sensor can be used in the exploitation operation of railway transport.*

**Keywords:** asynchronous drive; electric linear sensor; magnetic Reynolds number; mathematical model of electromagnetic force; carriage movable train.

**Введение.** В статье рассматривается линейный асинхронный путевого счётчик-датчик (ЛАПД) железнодорожного транспорта, который может найти широкое применение в современных системах интервального регули-

рования движения поездов железнодорожного транспорта. Функциональное назначение счётчика — фиксация и контроль осей подвижного состава (вагонов, локомотивов, дрезин и т. п.) по заданному участку пути. Выход-

ной сигнал счётчика используется в качестве источника первичной информации о движении поездов по станциям и перегонам.

Целями работы являются анализ процессов работы счётчика и получение необходимой информации на основе электрического сигнала [1].

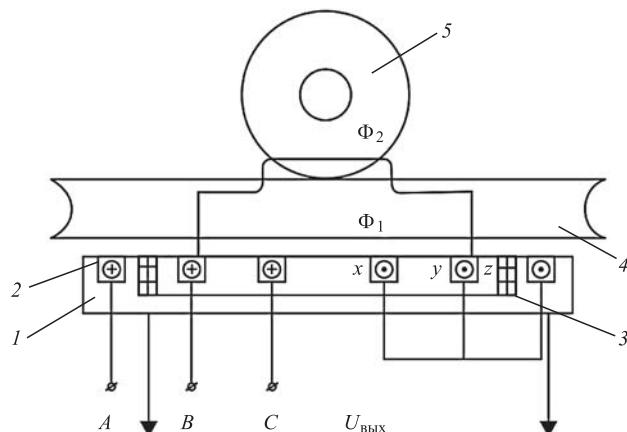
Несмотря на довольно широкое применение датчика, основные процессы его работы изучены недостаточно и отсутствуют достоверные практические рекомендации по оптимизации его характеристик, что ограничивает функциональные возможности его применения в некоторых случаях. В статье проведён анализ процессов работы датчика и влияния параметров составных элементов датчика на его основные эксплуатационные характеристики.

Упрощённое конструктивное расположение элементов путевого счётчика приведено на рис. 1.

**Конструкция.** Линейный асинхронный путевого датчик (рис. 1) содержит статор 1 с трёхфазной обмоткой 2. В статор 1 также встроены обмотки 3, подключённые встречно-последовательно. Датчик располагается под рельсами 4, по которым проходят колёса 5 железнодорожного транспорта. При прохождении колеса 5 под датчиком изменяется магнитное сопротивление между статором 2 с обмоткой 3 и колёсами 5, бегущее магнитное поле [2] обмотки 2 изменяется, из-за этого, в свою очередь, наводится ЭДС в сигнальной обмотке, т. е. фиксируется вагон состава.

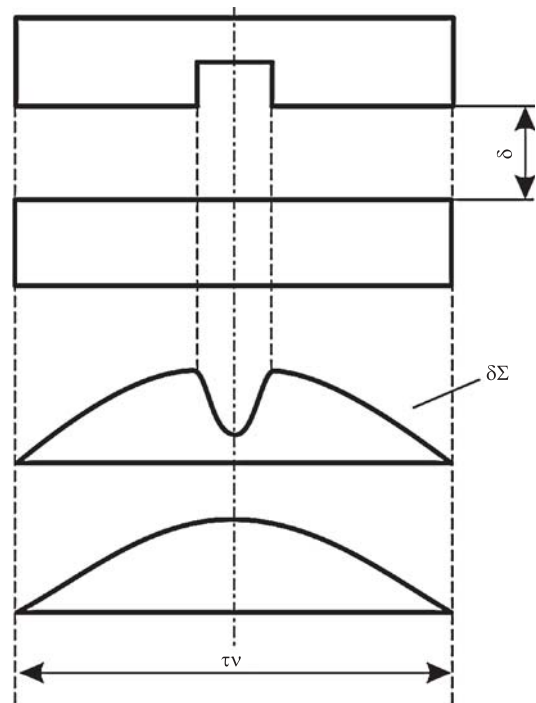
При решении и анализе были использованы методы теории магнитного поля, уравнения Максвелла и метод Фурье [3].

В применяемой математической модели были приняты допущения [1, 3], которые



**Рис. 1. Конструктивное расположение элементов путевого датчика:**

1 — статор; 2 — обмотка трёхфазной сети; 3 — обмотка; 4 — рельсы; 5 — колесо



**Рис. 2. Расчётная схема датчика**

не искажают картину явления и могут быть скорректированы соответствующими коэффициентами [1].

Расчётная модель датчика приведена на рис. 2, который позволит исследовать ЛАПД в работе.

**Математическая модель.** Электромагнитные процессы в ЛАПД описываются уравнениями Максвелла для медленно движущихся изотропных и проводящих сред. В системе координат, жёстко связанной с рельсом, комплексные амплитуды будут следующими [2]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{\delta} + \vec{\delta}_{\text{ст}}; \operatorname{rot} \vec{E} = -j\omega \vec{B}; \\ \vec{B} &= \mu\mu_0 \vec{H}; \vec{\delta} = \sigma \vec{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{\delta}_{\text{ст}}$  — плотность стороннего тока;  $\vec{H}$  — результирующая напряжённость магнитного поля;  $\vec{B}$  — магнитная индукция;  $\vec{E}$  — результирующая напряжённость электрического поля;  $\sigma$  — удельная проводимость обмотки;  $\delta$  — плотность наведённого тока.

Решение этих уравнений с учётом всех конструктивных особенностей ЛАПД не представляется возможным. Поэтому при решении принимаются допущения [4], мало искажающие реальную картину электромагнитных процессов:

толщина рабочего зазора значительно меньше среднего радиуса и магнитное поле плоскопараллельно;



индукция первичного магнитного поля в воздушном зазоре задана основной пространственной гармоникой;

вне индуктора поле равно нулю;

плотность вихревых токов по толщине ротора постоянна;

магнитная проницаемость материала ротора равна  $\mu_0$ , а магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности.

Для определения параметров ЛАПД необходимо найти распределение магнитного поля в зазоре и плотности вихревых токов в роторе. Согласно принятым допущениям, напряжённость магнитного поля имеет одну составляющую по оси  $z$ , а плотности токов будут иметь две составляющие:

$$\vec{\delta}_x = \frac{\partial \vec{H}z}{\partial y}; \quad \vec{\delta}_y = \frac{\partial \vec{H}z}{\partial x}. \quad (2)$$

Магнитное поле определяется в виде суммы поля индуктора (известное поле)  $H_0$  и поля индуцированных вихревых токов  $H$ . Тогда из выражения (1) с учётом принятых допущений можно получить уравнение в активной зоне системы координат  $x$  и  $y$ ,  $0 < x < b$ ,  $-a < y < a$ :

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} - j\varepsilon_f \alpha^2 H_a = j\varepsilon_f \alpha^2 \dot{H}_0 e^{-j\alpha x}, \quad (3)$$

где  $\alpha = \pi/\tau$ ;  $\tau$  — полюсное деление;  $\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$  — магнитное число Рейнольдса (МЧР);  $\omega = p\Omega/t$ ;  $\Omega$  — угловая скорость вращения колеса вагона;  $k_d$  — коэффициент приведения, учитывающий влияние пазов и насыщения.

В процессе решения уравнения (3) [3, 4] и проведения несложных математических преобразований получим выражение для электромагнитной силы, действующей на активную зону ротора:

$$F_x = \iiint_{xyz} f_{xc} dx dy dz = \frac{1}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \alpha \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f} 2bl_{cp} \Delta, \quad (4)$$

где  $\Delta$  — толщина колеса;  $l_{cp}$  — средний периметр колеса.

С учётом того, что  $\alpha = \pi/2a$ , получим окончательное выражение для интегральной электромагнитной силы:

$$F_z = \frac{\pi}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}. \quad (5)$$

Момент на ЛАПД составит

$$M_z = \frac{\pi}{2} \frac{\mu_0 H_{1m}^2}{k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} R. \quad (6)$$

Из основного уравнения динамики [2, 3] контролируемое угловое ускорение колеса

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \frac{\mu_0 H_{1m}^2}{k_d} \frac{\Delta l_{cp}}{mR} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f} = \varepsilon_{\text{баз}} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \quad (7)$$

где  $m$  — масса колеса вагона;  $\varepsilon_{\text{баз}}$  — базовое ускорение;  $k_d$  — коэффициент приведения [2];  $\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$  — МЧР.

Используя значение для МЧР или критической скорости, можно найти нужные параметры, изменив которые получим требуемую выходную характеристику. Например, для того чтобы сместить максимум сигнала в область более высоких скоростей, нужно увеличить числитель (число пар полюсов или зазор) или уменьшить знаменатель (радиус, толщину или электропроводность материала ротора).

На рис. 3 представлена выходная характеристика ЛАПД при прохождении колеса вагона без прорезей с немагнитным ротором ( $b = \infty$ )  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{баз}}}$ .

При проектировании различных электро-механических устройств [5] предъявляются различные требования к их выходным характеристикам — для одних существенна линейность зависимости крутизны характеристики и чувствительности от скорости, для других — желательно иметь максимальное значение чувствительности, для третьих важно незначительное их изменение в определённом диапазоне скоростей. Эти вопросы могут быстро решаться путём анализа значения МЧР — если  $\varepsilon \ll 1$ , то зависимость выхода от скорости практически линейна, если  $\varepsilon_f = 1$ , то выходные характеристики близки к максимуму и т. д.

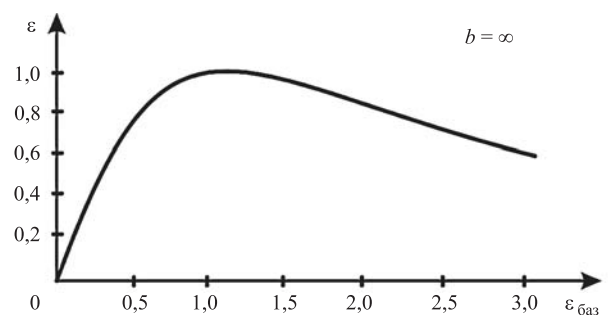


Рис. 3. Выходная характеристика ЛАПД, о. е.

Представленная конструкция ЛАПД имеет возможность работать и как тахогенератор. Выходная характеристика в ЛАПД выглядит следующим образом:

$$E = 4,44fk_{об}W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1+\varepsilon_f^2}} sH_{1m} = \frac{2,22\omega}{\pi} k_{об}W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1+\varepsilon_f^2}} sH_{1m}, \quad (8)$$

где  $\omega$  — угловая скорость колеса вагона;  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  — частота вращения колеса;  $W_2$  — число витков сигнальной обмотки;  $k_{об}$  — обмоточный коэффициент [2];  $s$  — скольжение;  $H_{1m}$  — первичное магнитное поле.

Чувствительность ЛАПД рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{dE}{d\omega} = \frac{2,22}{\pi} k_{об}W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1+\varepsilon_f^2}} sH_{1m}. \quad (9)$$

Базовая чувствительность имеет вид

$$\beta^{баз} = \frac{2,22}{\pi} k_{об}W_2 sH_{1m};$$

$$\beta^* = \beta/\beta^{баз} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1+\varepsilon^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{\varepsilon^2}}}.$$

Зависимость чувствительности ЛАПД от МЧР приведена на рис. 4.

Таким образом, предложенная конструкция ЛАПД позволяет расширить метрологические характеристики при увязке её с другими элементами информационной системы

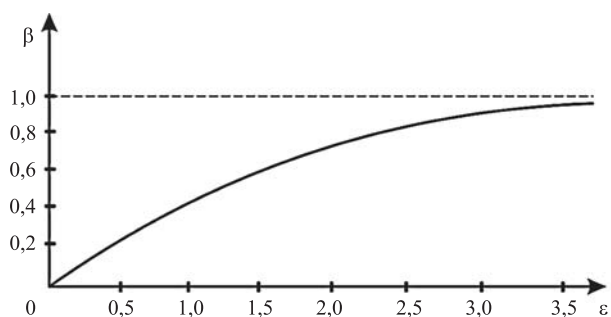


Рис. 4. Зависимость чувствительности ЛАПД от МЧР, о. е.

и контроля, а полученные в работе аналитические выражения могут быть использованы при анализе работы путевых датчиков подобного класса.

**Выводы.** Разработана оригинальная конструкция путевого датчика на базе линейного асинхронного двигателя. Создана математическая модель ЛАПД, получены выражения для определения его чувствительности в зависимости от геометрических размеров и его магнитных характеристик.

ЛАПД экономичен, технологичен и обладает высокой точностью. Разработаны технологии его изготовления на известных технологических оснастках. При секционном расположении ЛАПД вдоль железной дороги можно с высокой точностью определить место дефектов рельса, их точки обрыва, что позволит предотвратить возможные катастрофы.

Полученные теоретические положения и конструкцию путевого датчика можно будет использовать в дальнейшем при проектировании поездов на магнитных подушках с бегущим магнитным полем. ЛАПД найдёт широкое применение при высокоточных измерениях оборотов и угловых ускорений контролируемых объектов различного функционального назначения.

#### Библиографические ссылки

1. Шиголов С.А., Сергеев Б.С. Анализ работы электромагнитного путевого датчика ДПЭП // Электротехника. 2000. № 7. С. 41—46.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 830 с.
3. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р. Электрормагнитные демпферы с продольными прорезями полого ротора // Электротехника. 2000. № 8. С. 27—29.
4. Янгиров И.Ф. Математическая модель датчика неразрушающего контроля // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 21—22.
5. Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Халиков А.Р. Спиральный вибрационный стенд для научных лабораторных исследований // Технология машиностроения. 2016. № 8. С. 43—45.

#### Ссылка для цитирования

Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А. Электрический линейный асинхронный путевой датчик // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 65—68.

УДК 628.9:621.382.2:001

**С.А. Амелькина**, канд. техн. наук, доц., **К.А. Дупленкова**  
(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
им. Н.П. Огарёва», г. Саранск),  
**С.А. Микаева**, д-р техн. наук, проф.  
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)  
mikaeva@npo.lit.ru

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

*На примере освещения административного здания рассмотрено соблюдение актуальных нормативных документов, регламентирующих требования по энергоэффективности осветительных установок и осветительных приборов, используемых в них. Проведён анализ влияния существующих нормативных требований в области энергоэффективности освещения общественных помещений на динамику номенклатуры выпускаемых инновационных осветительных приборов в России.*

**Ключевые слова:** осветительная установка общественного здания; энергоэффективность освещения; световая отдача; световой прибор; нормы освещения.

*As an example of the lighting of an administrative building, the compliance of the actual normative documents governing the energy efficiency requirements of lighting installations and lighting devices used in them are considered. The analysis of the influence of the existing normative requirements in the field of energy efficiency of public premises lighting on the dynamics of the range of manufactured innovative lighting devices in Russia is carried out.*

**Keywords:** public building lighting installation; energy efficiency of lighting; light output; light apparatus; lighting standards.

В современных условиях, когда внедрение светодиодного освещения в общественных и административных зданиях является одной из актуальных задач, важно определить критерии выбора осветительных приборов, которые при равных осветительных условиях и соблюдении нормативных параметров будут обеспечивать наибольшую эффективность осветительной установки [1].

В последние годы значительные научные исследования, проводимые ведущими производителями светотехники, были направлены на повышение эффективности светового потока полупроводниковых источников света и осветительных приборов на их основе, снижение их себестоимости и увеличение срока службы.

Россия отстаёт от развитых стран в области внедрения не только светодиодной продукции, но и энергосберегающих технологий в целом. Рынок светодиодной осветительной техники в нашей стране сегодня находится в стадии формирования. Причина отставания кроется в относительно дешёвой, по сравнению с другими странами, электроэнергии, что создаёт благоприятные условия для применения традиционных ламп накаливания и других низкоэффективных решений. Спрос

на российскую светодиодную продукцию во многом сдерживается также высоким удельным весом импорта и её высокой стоимостью.

В рамках реализации проекта перехода на энергоэффективные источники света правительство поставило задачу сформировать в ближайшее время нормативно-правовую базу энергоэффективных технологий (технические регламенты, стандарты, СНиПы, СанПиНы, маркировка энергоэффективных товаров). Вопросы о техническом регулировании в области освещения постоянно обсуждаются [2].

На правительственном уровне планируются также следующие меры:

поддержка государством разработок перспективных конструкций светодиодов (СД);

оказание инвестиционной поддержки отечественным производителям оборудования для производства СД;

содействие развитию малотоннажного химического производства материалов для оптоэлектронной промышленности;

введение дополнительных мер (нормативов и т. п.), поощряющих энергосбережение и внедрение осветительных приборов на СД для общего освещения и освещения транспортных средств.

Программы поддержки использования энергоэффективных технологий начинают реализовываться и в регионах. Одними из первых концепции энергосбережения приняты в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи. В ряде регионов приняты законы, направленные на повышение энергоэффективности. Реализуются также и отраслевые программы по расширению использования энергосберегающей светотехники (РЖД, Росавтодор, военно-промышленный комплекс). Так, согласно комплексной программе по внедрению светодиодной техники РЖД призваны стать одним из крупнейших потребителей СД в России. Предусматриваются внедрение светодиодных систем сигнализации, использование светодиодных источников света в подвижных составах, применение светофоров нового поколения со светооптическими системами.

От условий освещения помещения, где работают и находятся люди, зависят их здоровье, сопротивляемость стрессам, усталости, физическим и умственным нагрузкам. В связи с этим следует чётко соблюдать нормативные требования, ведь от этого зависит экологическая обстановка в нежилых зданиях и физическое и психологическое здоровье работающих или пребывающих в них людей [3].

Существует несколько разновидностей нормативных документов, по которым производится проектирование освещения. На сегодняшний день основными документами, по которым при проектировании определяются параметры освещения административных зданий, являются СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [4], СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий», СанПиН 2.2.1/2.1.1.2585-10 «Изменения и дополнения № 1 к санитарным правилам и нормам СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, ГОСТ Р 55710—2013 «Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений».

Кроме того, требования по энергоэффективности осветительных приборов содержатся в ГОСТ Р 54350—2015 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний» и в постановлениях Правительства РФ. Одним из последних документов является Постановление № 1356 от 10 ноября 2017 г. «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного

тока в целях освещения» [5] с изменениями от 3 ноября 2018 г. № 1312.

Если речь идёт о модернизации действующей осветительной установки, то рекомендуется основываться на результатах светотехнического аудита, а профессионально выбранные энергосберегающие мероприятия позволят сэкономить электроэнергию на освещении. Такая экономия может быть получена благодаря совершенствованию систем освещения; использованию эффективных источников света; правильному выбору и рациональному размещению светильников и применению новых осветительных приборов и устройств; организации управления освещением и его автоматизации; рациональному построению осветительных сетей; введению планомерной эксплуатации освещения [6—10].

Рассмотрим изменения, которые в последние годы достаточно часто происходят в нормативных документах, относящихся к освещению общественных и административных зданий в части именно энергоэффективности осветительных установок.

В СП 52.13330.2011 были установлены требования по энергоэффективности источников света, в том числе светодиодных ламп и светодиодных модулей. Для общественных зданий при индексе цветопередачи  $R_a \geq 80$  световая отдача должна была быть не менее 70 лм/Вт. К осветительным приборам в отдельности требования отсутствовали. Такие требования были установлены ГОСТ Р 54350—2011 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний», а затем введённым взамен него ГОСТ Р 54350—2015.

На основе результатов светотехнического аудита действующей осветительной установки административного здания (этаж заводоуправления ООО «ЗСП» в г. Саранск) установлено, что все используемые в обследованной осветительной установке световые приборы соответствуют требованиям энергоэффективности ГОСТ Р 54350—2011 для светильников общественных зданий со светодиодами. На момент проектирования осветительной установки этот стандарт был актуален (табл. 1).

Анализ на соответствие требованиям ГОСТ Р 54350—2015 по минимальной световой отдаче светильников со светодиодами показал, что светильник DVO11-40-003 (производства ООО «АСТЗ») не соответствует требованиям энергоэффективности. Отметим, что для светильников, имеющих мощность менее 30 Вт, требования не установлены (табл. 2).

Таблица 1

**Соответствие световой отдачи световых приборов (СП), используемых в действующей в ООО «ЗСП» осветительной установке, требованиям ГОСТ Р 54350—2011**

Тип СП	Световой поток СП, лм	Мощность СП, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Требования ГОСТ Р 54350—2011 по минимальной световой отдаче светильников со светодиодами в зависимости от типа рассеивателя для класса П	Соответствие требованиям ГОСТа
DVO11-40-003	2728	38,9	70,1	65	Да
DVO12-30-001 Prizma	2606	29,0	89,9	65	—
DSP44-19-002 Flagman F	1716	20,2	85,0	65	—
DSP44-38-002 Flagman F	3580	39,2	91,3	65	Да
DVO21-14-202	790	14,0	56,4	55	—
DPO46-19-801	1241	21,1	58,8	55	—
ДБО88-18-001	1494	18,3	81,6	65	—

Таблица 2

**Соответствие световой отдачи световых приборов, используемых в действующей в ООО «ЗСП» осветительной установке, требованиям ГОСТ Р 54350—2015**

Тип СП	Световой поток СП, лм	Мощность СП, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Требования ГОСТ Р 54350—2015 по минимальной световой отдаче светильников со светодиодами	Соответствие требованиям
DVO11-40-003	2728	38,9	70,1	85	Нет
DVO12-30-001 Prizma	2606	30,0	87,0	85	Да
DSP44-19-002 Flagman F	1716	20,2	85,0	Для мощности менее 30 Вт не установлены	—
DSP44-38-002 Flagman F	3580	39,2	91,3	85	Да
DVO21-14-202	790	14,0	56,4	Для мощности менее 30 Вт не установлены	—
DPO46-19-801	1241	21,1	58,8	То же	—
ДБО88-18-001	1494	18,3	81,6	—” —	—

Дальнейший анализ световой отдачи этих же светильников на соответствие требованиям СП 52.13330.2016 показал, что установленным требованиям соответствует только один из них: DSP44-38-002 Flagman F (производства ООО «АСТЗ») (табл. 3). Причём в этом нормативном документе требования по энергоэффективности осветительных приборов не зависят от их мощности. Устанавливается рекомендуемая световая отдача световых приборов, используемых для общего искусствен-

ного освещения помещений, освещения мест производства вне зданий и наружного утилитарного освещения при минимально допустимых индексах цветопередачи.

Таким образом, новые стандарты способствуют интенсивному движению в сторону значительного повышения требований к энергоэффективности СП.

В ходе проведённого маркетингового исследования рынка светодиодных светильников в России установлено, что рынок активно



Таблица 3

**Соответствие световой отдачи световых приборов, используемых в действующей в ООО «ЗСП» осветительной установке, требованиям СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»**

Тип СП	Световой поток СП, лм	Мощность СП, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Требования СП 52.13330.2016 по минимальной световой отдаче светильников со светодиодами при $R_a \geq 80$	Соответствие требованиям
DVO11-40-003	2728	38,9	70,1	90	Нет
DVO12-30-001 Prizma	2606	29,0	89,9	90	Нет
DSP44-19-002 Flagman F	1716	20,2	85,0	90	Нет
DSP44-38-002 Flagman F	3580	39,2	91,3	90	Да
DVO21-14-202	790	14,0	56,4	90	Нет
DPO46-19-801	1241	21,1	58,8	90	Нет
ДБО88-18-001	1494	18,3	81,6	90	Нет

развивается, что связано как с импортом продукции, так и с ростом производства светодиодных СП в России.

В ноябре 2019 г. утверждены Изменения № 1 к СП 52.13330.2016 (СНиП 23-05-95\* «Естественное и искусственное освещение»), которые введены в действие в мае 2020 г. [7]. Рекомендуемые световые отдачи световых приборов со светодиодами с индексом цветопередачи  $R_a$  более 85 должны быть не менее 100 лм/Вт, а с  $R_a$  от 80 до 85 — не менее 105 лм/Вт. Кроме того, максимально допустимые удельные установленные мощности искусственного освещения в помещениях общественных зданий также изменены в сторону энергосбережения.

В современных условиях производители светильников должны гибко управлять своим производством и постоянно принимать меры по повышению энергоэффективности СП, для того чтобы быть конкурентоспособными на рынке.

#### **Библиографические ссылки**

1. Бакир Кючуккая И., Алакавук Е. Оценка соответствия административного здания требованиям программы LEED // Светотехника. 2019. № 4. С. 52—57.
2. Инюцын А.Ю., Мельников Д.А. О логике технического регулирования в области освещения // Светотехника. 2018. № 1. С. 35—37.

3. Железникова О.Е., Амеликина С.А., Сеницына Л.В. Об эффективности освещения светодиодами по зрительной работе // Светотехника. 2018. № 2. С. 6—10.

4. СП 52.13330.2016 (Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*) «Естественное и искусственное освещение».

5. Постановление Правительства РФ № 1356 от 10 ноября 2017 г. «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения».

6. Амеликина С.А. Энергоэффективность в освещении: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. 56 с.

7. Изменения № 1 к СП 52.13330.2016 (СНиП 23-05-95\* «Естественное и искусственное освещение»).

8. Микаева С.А., Микаева А.С. Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. С. 150.

9. Микаева С.А. Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. С. 135.

10. Микаева С.А., Микаева А.С. Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. С. 186.

#### **Ссылка для цитирования**

**Амеликина С.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А.** Сопоставительный анализ актуальных нормативных документов в области энергоэффективного освещения // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 69—72.



Т.Ю. Цибилова, д-р пед. наук, В.В. Клычников, А.В. Косовский  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

vesta952006@yandex.ru

## НЕЛИНЕЙНЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА С САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ МОДЕЛЮ

*Для повышения точности навигационного комплекса летательного аппарата используется коррекция ошибок в выходном сигнале. Ошибки навигационного комплекса оцениваются с помощью нелинейного фильтра Калмана. В качестве модели оцениваемого процесса предложено использовать нелинейную модель, построенную методом самоорганизации. Эффективность алгоритма самоорганизации по сравнению с генетическим алгоритмом и нейронной сетью подтверждена результатами математического моделирования.*

**Ключевые слова:** летательный аппарат; инерциальная навигационная система; модель погрешностей; алгоритм самоорганизации.

*To improve the accuracy of the aircraft navigation system error correction in the output signal is used. The errors of the navigation complex are estimated by using a nonlinear Kalman filter. It is proposed to use a nonlinear model constructed by the method of self-organization as a model of the process being evaluated. The effectiveness of the self-organization algorithm in comparison with the genetic algorithm and the neural network is confirmed by the results of mathematical modeling.*

**Keywords:** aircraft; inertial navigation system; error model; self-organization algorithm.

**Введение.** Работа относится к области управления подвижными объектами. В качестве подвижных объектов рассматриваются летательные аппараты (ЛА), поскольку ЛА как объект управления является наиболее сложным из-за высоких требований к точности управления [1–3].

Для получения информации, такой как местоположение, скорость и ориентация ЛА в пространстве, используются навигационные системы. В настоящее время разработаны различные навигационные методы и, соответственно, навигационные системы. Они имеют свои особенности. Например, особенность инерциальных навигационных систем (ИНС) заключается в том, что обновление информации проводится полностью автономно, на неё не влияют внешние помехи, но её погрешность быстро увеличивается со временем, а точность навигации невысока в течение длительного времени; спутниковые навигационные системы (СНС) характеризуются большим охватом и погрешность не увеличивается со временем. Однако обновление информации спутниковой навигации происходит медленно, спутниковые сигналы легко блокируются или мешают, а сигнал от СНС не

всегда доступен. Поэтому трудно решать задачу высокоточной навигации для дальнемагистральной навигации, используя один способ навигации. Сочетание одного или нескольких способов навигации является основным направлением и тенденцией для решения отмеченных проблем.

В середине 1980-х гг. в США разработали высокоэффективную комплексную навигационную систему. Комплексная навигация привлекла внимание во всем мире и стала важным средством улучшения навигационного качества. Раньше навигация такого вида в основном использовалась в военной области, например для баллистических ракет, транспортных самолётов большой дальности и систем вооружения самолётов-разведчиков.

При превышении ЛА определённой высоты или в боевой среде СНС недоступна. Это обуславливает важность метода навигации с использованием ИНС из-за его полной автономности. Коррекция параметров ИНС позволит повысить точность навигации.

Измерительные сигналы этих систем имеют погрешности [4–6], обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Повышение точности

измерительной информации осуществляется конструкторским и алгоритмическим путями. Разработка новых конструкций измерительных систем требует новой технологической базы и больших финансовых затрат. Алгоритмический подход позволяет существенно повысить точность определения навигационных параметров с использованием измерительных систем современного уровня точности.

Алгоритмическая коррекция навигационных систем обычно осуществляется с помощью алгоритмов коррекции высокого уровня — алгоритмов оценивания, прогнозирования и комплексирования [7—9]. Такая алгоритмическая коррекция предусматривает использование второго измерительного датчика информации, внешнего по отношению к корректируемой системе. С помощью этого внешнего датчика формируется измерительный сигнал для алгоритмов, представляющий собой смесь ошибок измерительной системы и внешнего датчика.

В современных навигационных комплексах ИНС обычно служит базовой измерительной системой. Для повышения точности ИНС обычно используются датчики внешней навигационной информации. Коррекция показаний ИНС ЛА часто осуществляется с помощью СНС.

Для компенсации погрешностей в выходном сигнале базовой измерительной системы применяются алгоритмы оценивания [10, 11]. В схемах коррекции навигационной информации используются алгоритмы оценивания, включающие различные математические модели исследуемых процессов, в частности модели погрешностей ИНС. Эти модели различаются уровнем подробности и сильно влияют на результаты оценивания параметров ЛА.

В нелинейных алгоритмах оценивания, например в нелинейном фильтре Калмана (НФК) [12—14], модели оцениваемого процесса могут быть построены различными эволюционными алгоритмами.

**Навигационный комплекс с нелинейным фильтром Калмана.** Пусть уравнение вектора состояния имеет вид

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_k$  — вектор состояния;  $\Phi_{k,k-1}(\mathbf{x}_{k-1})$  — матрица нелинейной модели системы.

Часть вектора состояния измеряется:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где  $\mathbf{z}_k$  — вектор измерений;  $\mathbf{H}_k$  — матрица измерений.

В формулах (1) и (2)  $\mathbf{w}_k$ ,  $\mathbf{v}_k$  — дискретные аналоги гауссовского белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами ковариаций  $\mathbf{Q}_k$  и  $\mathbf{R}_k$  соответственно, не коррелированные между собой.

Уравнения НФК имеют следующий вид [12]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})[\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}]; \\ \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} &= \Phi_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}); \\ \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) &= \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1}; \\ \mathbf{P}_{k,k-1} &= \frac{\partial \Phi_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}^T} \mathbf{P}_{k-1} \times \\ &\times \left[ \frac{\partial \Phi_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}^T} \right]^T + \mathbf{Q}_k; \\ \mathbf{P}_k &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$  — матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана;  $\mathbf{P}_{k,k-1}$  — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания;  $\mathbf{P}_k$  — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания;  $\mathbf{I}$  — единичная матрица.

Известны различные способы реализации НФК. Рассмотрим НФК с алгоритмом построения модели оцениваемого процесса с помощью алгоритма самоорганизации [15, 16].

**Алгоритм самоорганизации для построения моделей.** Прогнозирующие модели широко используются в схемах коррекции навигационных систем при исчезновении сигналов от внешних измерительных систем. В системах управления прогнозирующие модели используются в алгоритмах управления по прогнозу, а также для прогнозирования внешних возмущающих факторов.

В практических приложениях прогнозирование состояния маневрирующего объекта с использованием априорных математических моделей не представляется возможным. При функционировании динамического объекта в стохастических условиях объём априорной информации о нём, как правило, минимален. Поэтому целесообразно использовать для экстраполяции подход самоорганизации [15, 16].

Самоорганизация позволяет построить математическую модель без априорного указания особенностей функционирования исследуемого объекта. Разработчик математической модели должен задать ансамбль критериев селекции (критериев самоорганизации) выбора модели, а математическая модель оптимальной сложности выбирается уже автоматически.

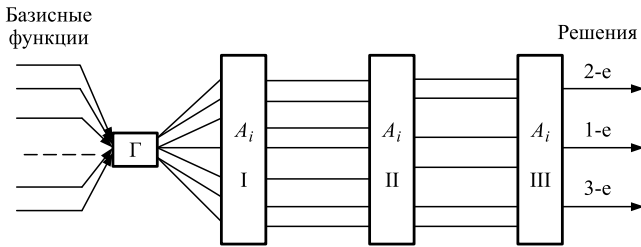


Рис. 1. Система Стэнфордского университета:

$A_i$  — пороговые самоотборы полезной информации;  
 $\Gamma$  — генератор случайных комбинаций (гипотез);  
 I...III — критерии самоотбора

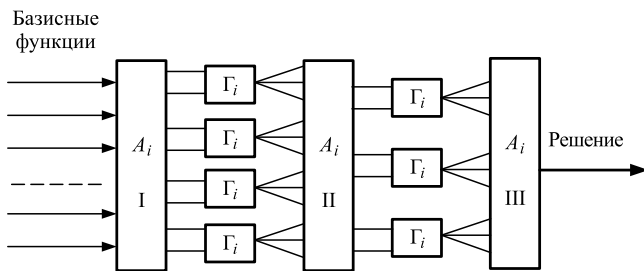


Рис. 2. Система, построенная по методу группового учёта аргументов:

$A_i$  — пороговые самоотборы полезной информации;  
 $\Gamma_i$  — генератор случайных комбинаций (гипотез);  
 I...III — критерии самоотбора

Некоторые самые известные примеры систем эвристической самоорганизации приведены на рис. 1 и 2.

Реализация алгоритма самоорганизации предполагается на борту динамического объекта. Обычно к таким алгоритмам предъявляются достаточно жёсткие требования по быстродействию, компактности и простоте реализации в бортовой цифровой вычислительной машине. Особенно большое значение эти требования имеют при прогнозировании состояния высокоманевренных динамических объектов.

В алгоритмах самоорганизации с выделением трендов используют такие опорные функции, как степенные полиномы, тригонометрические функции, экспоненциальные функции. Если в систему опорных функций одновременно включаются несколько их типов, то получаются смешанные функции, содержащие сумму или произведение степенных полиномов и экспоненциальных функций.

**Метод группового учёта аргументов (МГУА).** В методе группового учёта аргументов [17, 18] используются алгоритмы, которые напоминают правила селекции семян (используется правило порогового самоотбора). Пользуясь идеей селекции при составлении математических ал-

горитмов, мы принимаем гипотезу о том, что малоэффективные комбинации, отброшенные на первых рядах самоотбора, не могли бы дать оптимальные комбинации следующего ряда, если бы мы их пропустили дальше. Эта гипотеза ещё не доказана в общем виде как теорема, но, по-видимому, верна, так как подтверждена многими примерами.

**Результаты математического моделирования фильтра Калмана (ФК) с алгоритмом самоорганизации.** Для исследования точности ФК с самоорганизующейся моделью использована тестовая нелинейная модель погрешностей навигационного комплекса. Модели погрешностей ИНС строятся в процессе оценивания погрешностей ИНС на основе подхода самоорганизации.

При проведении моделирования учитывалось, что характер исследуемого процесса приблизительно известен.

Заметим, что набор данных для обучения составляет 85 % от исходных данных. В качестве исходных данных использованы значения измерений, полученные в период устойчивой работы системы в режиме коррекции от спутниковой системы.

В качестве критерия селекции выбран минимум среднего квадратичного отклонения (СКО) модели на проверочной выборке  $\Delta^2(B) = \sum_{t \in N} (y_t^M - y_t)^2 \rightarrow \min$  ( $B$  — проверочная выборка;  $y_t^M$  — значение модели;  $y_t$  — измеренное значение), с помощью которого осуществляется селекция моделей.

Адекватность функции проверяется на проверочной последовательности — СКО должно уменьшаться. В случае отсутствия ограничения по времени признаком получения оптимальной функции является нахождение глобального минимума критерия селекции.

Сигнал ИНС, корректируемой от СНС, представлен на рис. 3.

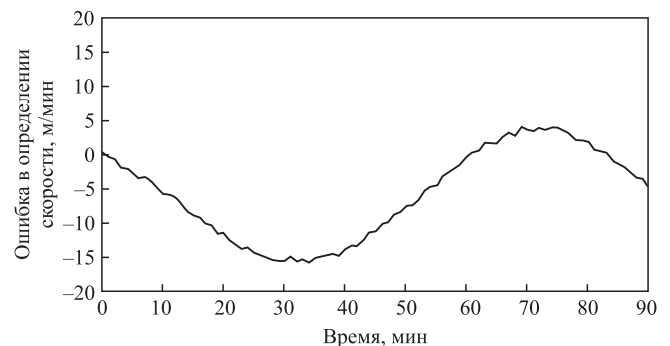
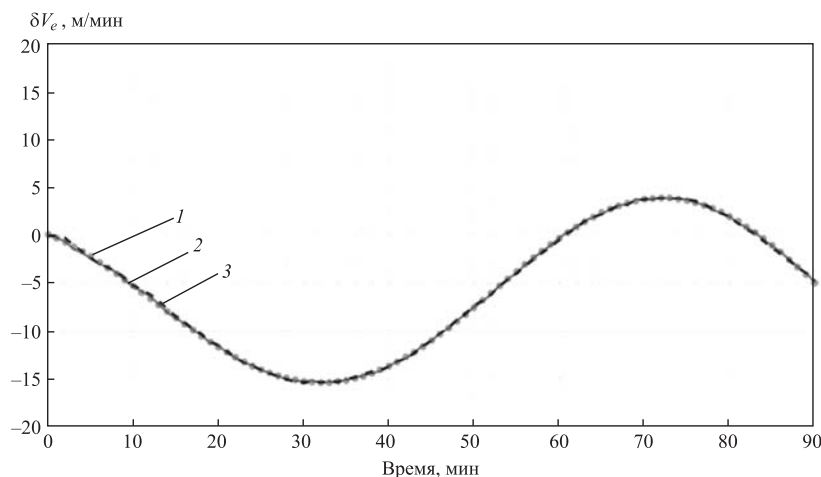
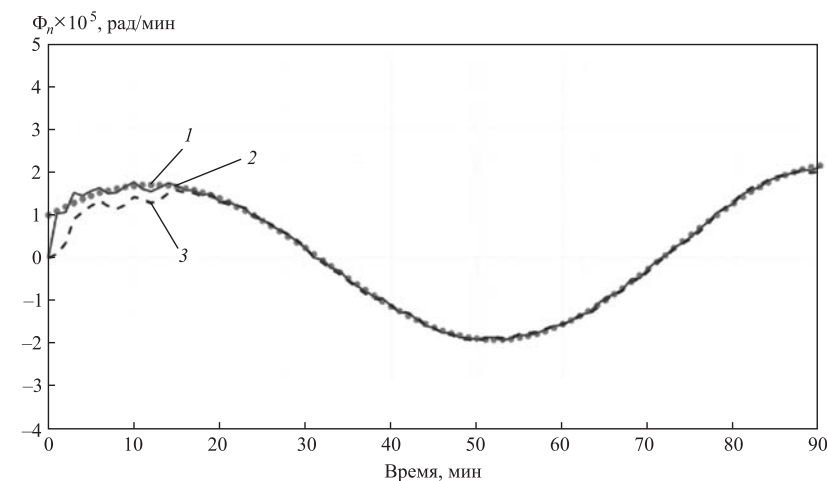


Рис. 3. Сигнал измерения



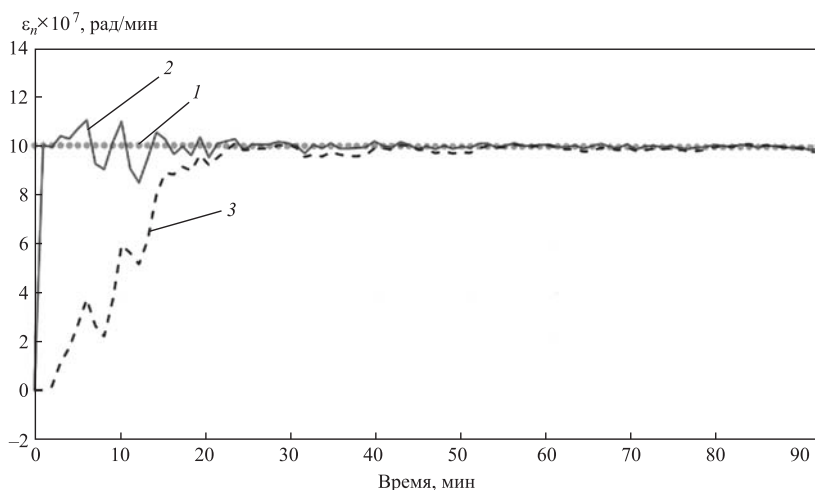
**Рис. 4. Оценка ошибки в определении скорости ЛА  $\delta V_e$ :**

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — оценка ошибки ИНС с использованием подхода самоорганизации; 3 — оценка ошибки ИНС без использования подхода самоорганизации



**Рис. 5. Оценка ошибки по углу отклонения ГСП  $\Phi_n$ :**

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — оценка ошибки ИНС с использованием подхода самоорганизации; 3 — оценка ошибки ИНС без использования подхода самоорганизации



**Рис. 6. Оценка скоростям дрейфа ГСП ИНС  $\epsilon_n$ :**

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — оценка ошибки ИНС с использованием подхода самоорганизации; 3 — оценка ошибки ИНС без использования подхода самоорганизации

Результаты моделирования представлены на рис. 4..6 и в таблице. На рисунках представлены оценки ошибки в определении скорости ЛА  $\delta V_e$ , по углу отклонения  $\Phi_n$  гиросtabilизированной платформы (ГСП) и скорости дрейфа ГСП  $\epsilon_n$ , полученные с помощью алгоритма оценивания — ФК с использованием самоорганизующихся моделей и алгоритма оценивания без использования самоорганизующихся моделей.

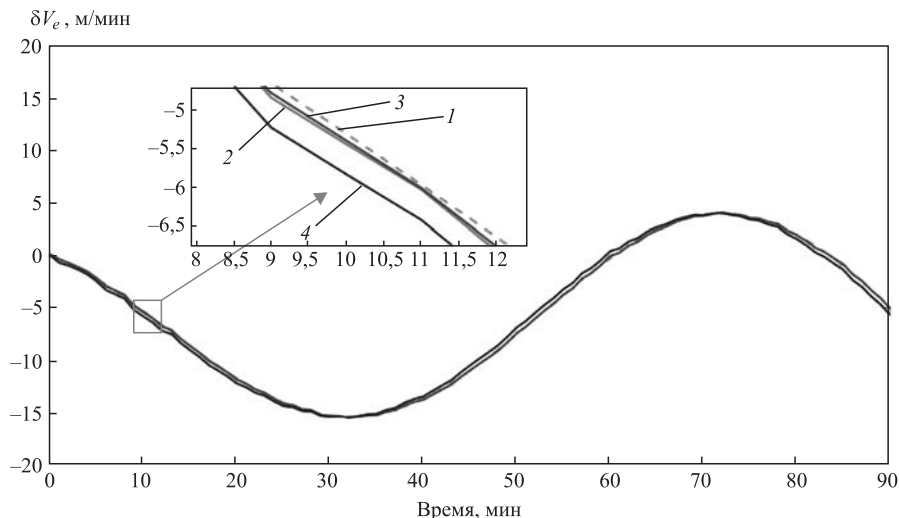
На рис. 4..6 очевидно, что после 30-й минуты для всех трёх компонентов вектора состояний исследуемого объекта кривые для алгоритмов, у которых имеется самоорганизующаяся модель, глаже по сравнению с кривыми для алгоритмов, у которых её нет, и одновременно они быстрее приближаются к истинной ошибке, особенно для погрешностей угла отклонения ГСП и скорости дрейфа ГСП.

На основе анализа приведённых на рис. 4..6 результатов моделирования можно сделать вывод о том, что ФК с использованием подхода самоорганизации имеет наиболее высокую точность.

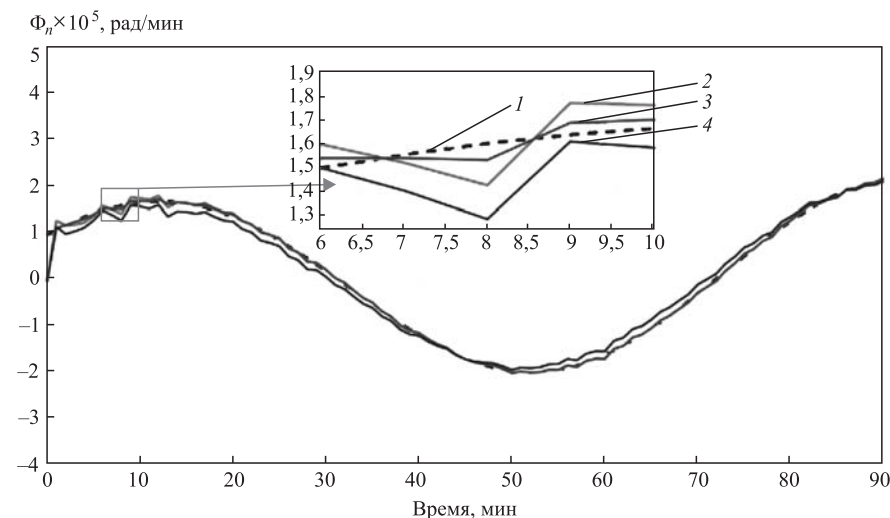
Результаты моделирования модифицированного алгоритма (ФК + МГУА) представлены на рис. 7..9 и в таблице. На рисунках представлены оценки ошибки в определении скорости ЛА  $\delta V_e$ , по углам отклонения  $\Phi_n$  ГСП и скоростям дрейфа ГСП  $\epsilon_n$ , полученные алгоритмом оценивания ФК с использованием моделей на основе подхода самоорганизации (SOA — self-organizing algorithm), генетического алгоритма (GA — genetic algorithm) и нейронной сети (NN — neural networks).

В таблице показаны результаты расчёта точности коррекции — средние квадратичные отклонения в определении скорости ЛА, угла отклонения ГСП и скорости дрейфа ГСП, полученные с помощью трёх исследованных методов.

На основе анализа данных, приведенных в таблице, можно



**Рис. 7. Оценка ошибки в определении скорости ЛА  $\delta V_e$ :**  
 1 — истинная ошибка ИНС; 2 — ошибка оценивания с использованием модели на основе подхода самоорганизации; 3 — ошибка оценивания с использованием модели на основе генетического алгоритма; 4 — ошибка оценивания с использованием модели на основе нейронной сети



**Рис. 8. Оценка ошибки по углам отклонения ГСП  $\Phi_n$ :**  
 1 — истинная ошибка ИНС; 2 — ошибка оценивания с использованием модели на основе подхода самоорганизации; 3 — ошибка оценивания с использованием модели на основе генетического алгоритма; 4 — ошибка оценивания с использованием модели на основе нейронной сети

сделать выводы о том, что в-первых, ФК с использованием генетического алгоритма обеспечивает наиболее высокую точность оценки, но соответствующее время работы алгоритма также очень велико, что не может удовлетворить требование обработки информации в режиме реального времени, во-вторых, время работы ФК с нейронной сетью достаточно велико и использовать его для коррекции ИНС нецелесообразно; в-третьих, точность ФК с использованием подхода самоорганизации находится на среднем уровне, но его производительность выше, чем у всех других рассмотренных методов, что может удовлетворить требование оперативной и надежной обработки информации.

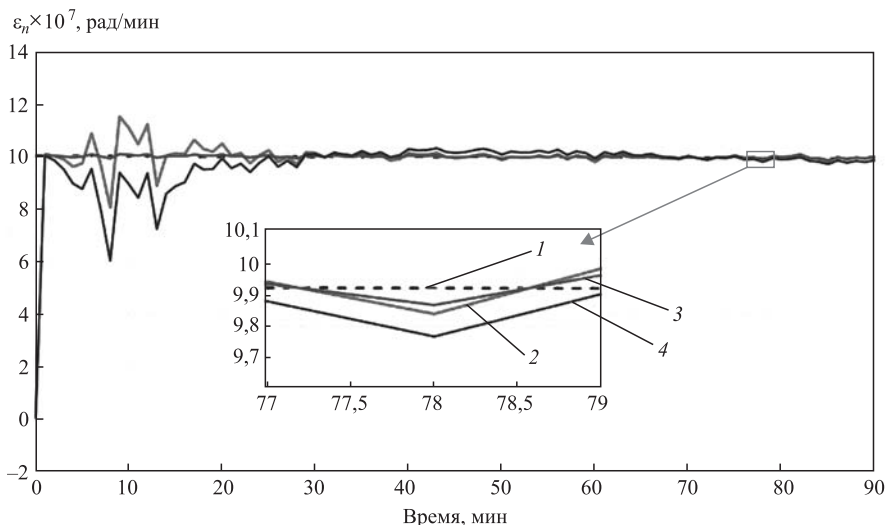
**Выводы.** Приведены результаты математического моделирования алгоритмов и проведён их анализ. Показано, что ФК с использованием самоорганизующихся моделей имеет высокую точность. Точность оценивания ИНС с использованием модели на основе подхода самоорганизации выше, чем при использовании классического ФК. По сравнению с генетическим алгоритмом и нейронной сетью точность ФК с использованием моделей на основе подхода самоорганизации находится на среднем уровне, но его производительность выше, чем у всех других рассмотренных методов, что может удовлетворить требование оперативной и надёжной обработки информации.

Таким образом, ФК с использованием модели на основе подхода самоорганизации имеет высокую точность по сравнению с ФК и высокую производительность по

**Точности оценивания погрешностей**

Метод	СКО $\delta V_e$ , м/мин	СКО $\Phi_n$ , рад/мин	СКО $\epsilon_n$ , рад/мин	Время, с
ФК	0,2095	$2,2597 \cdot 10^{-6}$	$2,7699 \cdot 10^{-7}$	0,1286
ФК с SOA	0,1171	$1,3188 \cdot 10^{-6}$	$1,1898 \cdot 10^{-7}$	0,5733
ФК с GA	0,0948	$1,1077 \cdot 10^{-6}$	$1,0487 \cdot 10^{-7}$	16,8479
ФК с NN	0,3703	$1,9272 \cdot 10^{-6}$	$1,4415 \cdot 10^{-7}$	10,5580





**Рис. 9. Оценка ошибки по скорости дрейфа ГСП  $\epsilon_n$ :**

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — ошибка оценивания с использованием модели на основе подхода самоорганизации; 3 — ошибка оценивания с использованием модели на основе генетического алгоритма; 4 — ошибка оценивания с использованием модели на основе нейронной сети

сравнению с генетическим алгоритмом и нейронной сетью. Он обеспечивает стабильную работу навигационного комплекса ЛА.

#### Библиографические ссылки

1. Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.
2. Селезнева М.С., Клычников В.В., Неусыпин К.А., Хэ Юн. Исследование перспективных измерительных комплексов летательных аппаратов // Достижения вузовской науки: Труды Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 28—35.
3. Кай Ш., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Пролетарский А.В. Исследование высокоточных измерительных комплексов современных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 124—130.
4. Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18—24.
5. Кабакова А.С., Высокова М.С., Чан Н.Х. Методы коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 2. С. 18.
6. Цибизова Т.Ю., Нгуен Д.Т. Алгоритмические способы коррекции навигационных систем в выходном сигнале // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 3 (28). С. 127.
7. Селезнева М.С., Шень К., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Динамический системный синтез алгоритмического обеспечения навигационного комплекса летательного аппарата // Приборы и системы. Управ-

ление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 36—42.

8. Цибизова Т.Ю., Шень К., Неусыпин К.А. Исследование алгоритмов оценивания в задаче коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. С. 301—305.

9. Neusyypin K.A., Selezneva M.S., Tsibizova T.Yu. Diagnostics algorithms for flight vehicles navigation complex // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 2018. С. 1—6.

10. Лян Ц., Литвиненко Ю.А. Алгоритм оценивания погрешностей инерциальных датчиков с использованием двух блоков микромеханических гироскопов // Навигация и управление движением. 2016. С. 556—564.

11. Тан Н. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 9. С. 6.

12. Шахтарин Б.И., Шень К., Неусыпин К.А. Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.

13. Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 428—432.

14. Пролетарский А.В., Чжан Л., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 8. С. 9—18.

15. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. 223 с.

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

17. Бояринов Ю.Г. и др. Применение нейро-нечеткого метода группового учета аргументов для построения моделей социально-экономических систем // Программные продукты и системы. 2006. № 3.

18. Тоноян С.А., Селиверстова А.В., Терехов В.И. Основные показатели метода группового учета аргументов для построения оптимальной модели // Аллея науки. 2017. Т. 3. № 15. С. 631—638.

#### Ссылка для цитирования

Цибизова Т.Ю., Клычников В.В., Косовский А.В. Нелинейный фильтр Калмана с самоорганизующейся моделью // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 73—78.

УДК 623.746.4-519

**М.М. Исмаилов**

(Азербайджанский государственный научно-исследовательский институт горных проблем, г. Баку),

**А.Б. Асланова**(Научно-исследовательский институт космических исследований природных ресурсов  
Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика)

asadzade@rambler.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛЁТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИВОДНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

*Статья посвящена оптимизации высоты полёта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с бортовой гиперспектральной системой формирования цветных изображений поверхности морских вод в зонах платформенной нефтедобычи в условиях двухслойного аэрозольного загрязнения приводного слоя атмосферы. Определена оптимальная взаимосвязь динамики изменения расстояния от БПЛА до исследуемого объекта на поверхности земли и шумового сигнала, вносимого верхним аэрозольным слоем, в зависимости от длины волны. Отмечено, что результаты, изложенные в статье, верны также для множества слоёв аэрозольных загрязнений, встречаемых в атмосфере в период функционирования бортовой изображающей системы. Определён оптимальный режим изменения высоты полёта при формировании цветных изображений морской поверхности, покрытой слоями аэрозоля.*

**Ключевые слова:** атмосфера; аэрозоль; беспилотный летательный аппарат; оптимизация; нефтедобыча.

*The article is devoted to the optimization of the flight altitude of unmanned aerial vehicles UAVs with an onboard hyperspectral system for forming color images of the surface of sea waters in the zones of platform oil production under conditions of two-layer aerosol pollution of the near-water layer of the atmosphere. The optimal relationship between the dynamics of changes in the distance from the UAV to the object under study on the earth's surface and the noise signal introduced by the upper aerosol layer, depending on the wavelength, is determined. It is noted that the results presented in the article are also true for many layers of aerosol pollution found in the atmosphere during the operation of the onboard imaging system. The optimal mode of flight altitude change in the formation of color images of the sea surface covered with aerosol layers is determined.*

**Keywords:** atmosphere; aerosol; unmanned aerial vehicle; optimization; oil production.

Хорошо известно, что важнейшим фактором, влияющим на достоверность гиперспектрального дистанционного зондирования Земли, является атмосфера, включая малые газовые составляющие, аэрозоль и водяные пары. Атмосферный аэрозоль в отличие от малых газов и водяных паров имеет непрерывный спектр поглощения, характеризуется динамически изменяемой структурой. Эти особенности аэрозоля являются физической основой для использования искусственно созданных аэрозольных облаков для ухудшения качества гиперспектральных изображений, получаемых бортовыми изображающими системами, осуществляющими мониторинг состояния поверхности морской акватории, загрязнённой нефтепродуктами. Аэрозольное облако способствует искажению цветности изображений

морской поверхности, избирательно воздействуя на длины волн проходящих через него оптических лучей. В конечном итоге воздействие аэрозоля приводит не только к искажению цветности, но и к уменьшению отношения сигнал/шум на разных длинах волн, что эквивалентно уменьшению достоверности информации, получаемой бортовыми цветными изображающими системами.

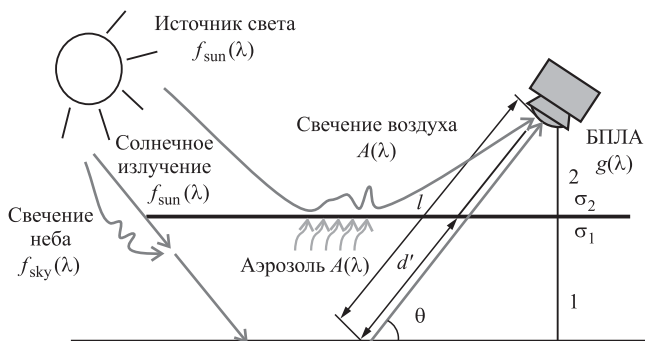
Существуют различные методы для снижения степени воздействия аэрозольного фактора на бортовые цветные изображения. Например, в работе [1] предложено комбинирование сигнала «тёмного» канала и усиления локального контраста для удаления искажений цветности, вызванных влиянием атмосферного аэрозоля. В работах [2—4] искажения цветности частично устраняются путём филь-

трации и учёта сигнала «тёмного» канала, а в работе [5] предлагается улучшить качество изображений по критерию достижения максимальной видимости по трассе прохождения оптических лучей. Однако почти отсутствуют работы, посвящённые реализации адаптивных режимов функционирования гиперспектральных изображающих систем, предназначенных для исследования цвета морской поверхности в условиях наличия сильной аэрозольной загрязнённости в определённом слое приземной атмосферы.

Целью настоящей статьи является исследование возможности разработки оптимального режима полёта беспилотного летательного аппарата (БПЛА), содержащего гиперспектральную изображающую систему, предназначенную для ведения съёмки в зоне, где в некотором приземном слое организована аэрозольная завеса в целях недопущения бортовых съёмок этой зоны. Направления радиационных потоков в двухслойной приземной зоне показаны на рисунке.

В соответствии с работой [6] изображение морской поверхности, формируемое гиперспектральной изображающей системой с учётом двухслойной промежуточной аэрозольной среды, где в первом слое преобладает морской аэрозоль, а во втором — мелкодисперсный городской аэрозоль, может быть вычислено попиксельно на основе следующей математической модели:

$$I_0 = I_1(\lambda)e^{-\sigma_1(\lambda)d'}e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} + A(\lambda)[1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)l}], \quad (1)$$



**Направления радиационных потоков в двухслойной приземной зоне:**

$f_{\text{sun}}(\lambda)$  — свечение Солнца;  $f_{\text{sky}}(\lambda)$  — свечение неба;  $\lambda$  — длина волны;  $\sigma_1, \sigma_2$  — коэффициенты ослабления в зонах 1 и 2 соответственно

где  $I_1(\lambda) = f_{\text{sun}}(\lambda) + f_{\text{sky}}(\lambda)$  — исходное попиксельное изображение морской поверхности;  $A(\lambda)$  — свечение атмосферы;  $\lambda$  — длина волны;  $l$  — расстояние от БПЛА до исследуемой точки на поверхности моря.

Введём функцию

$$l = \varphi(\lambda), \quad (2)$$

где  $\varphi$  — функция зависимости  $l$  от длины волны; если БПЛА «смотрит» вертикально вниз, то  $l$  равно высоте его полёта.

С учётом выражений (1), (2) сформируем следующий интегральный функционал:

$$I_{0\text{ин}} = \int_0^{\lambda_{\text{max}}} I_0 d\sigma_1 = \int_0^{\lambda_{\text{max}}} I_1(\lambda)e^{-\sigma_1(\lambda)d'}e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')}d\lambda + \int_0^{\lambda_{\text{max}}} A(\lambda)[1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - e^{-\sigma_2(\lambda)l}]d\lambda + \gamma \left[ \int_0^{\lambda_{\text{max}}} \varphi(\lambda)d\lambda - C_1 \right], \quad (3)$$

где  $\gamma$  — множитель Лагранжа;  $C_1 = \text{const}$ .

Формула (3) является математическим выражением задачи безусловной вариационной оптимизации. При этом допускаем, что функция  $\varphi(\lambda)$  удовлетворяет условию

$$\int_0^{\lambda_{\text{max}}} \varphi(\lambda)d\lambda = C_1. \quad (4a)$$

Согласно уравнению Эйлера [7] оптимальная функция  $l = \varphi(\lambda)_{\text{опт}}$ , при которой функционал (3) достиг бы экстремального значения, должна удовлетворить условию

$$d\{I_1(\lambda)e^{-\sigma_1(\lambda)d'}e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} + A(\lambda)[1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d} - e^{-\sigma_2(\lambda)l(\lambda)}] + \gamma\varphi(\lambda)\}/d\varphi(\lambda) = 0. \quad (4b)$$

Из выражения (4б) получим

$$-\sigma_2(\lambda)I_1(\lambda)e^{-[\sigma_1d'+\sigma_2(l-d)]} + A(\lambda)\sigma_2(\lambda)e^{-\sigma_2(\lambda)l(\lambda)} + \gamma = 0. \quad (5)$$

Из выражения (5) получаем

$$l(\lambda) = \frac{1}{\sigma_2(\lambda)} \times \ln \left[ \frac{\sigma_2(\lambda)[I_1(\lambda)e^{-d'[\sigma_2(\lambda)-\sigma_1(\lambda)]} - A(\lambda)]}{\gamma} \right]. \quad (6)$$

Для вычисления значения множителя Лагранжа  $\chi$  достаточно воспользоваться формулами (4а) и (6) с учётом равенства  $l(\lambda) = \varphi(\lambda)$ . Опустив математические подробности определения множителя Лагранжа, в дальнейших вычислениях обозначим вычисленное значение этого множителя  $\chi_0$ .

Для определения характера экстремума функционала (3) при решении (6) вычислим вторую производную интегранта выражения (3). Имеем

$$\begin{aligned} & d^2\{I_1(\lambda)e^{-\sigma_1(\lambda)d'}e^{-\sigma_2(\lambda)(l-d')} + \\ & + A(\lambda)[1 - e^{-\sigma_1(\lambda)d'} + e^{-\sigma_2(\lambda)d'} - \\ & - e^{-\sigma_2(\lambda)l(\lambda)}] + \gamma\varphi(\lambda)\}/d\varphi(\lambda)^2 = \\ & = \sigma_2^2(\lambda)I_1(\lambda)e^{-[\sigma_1d'+\sigma_2(l-d')]} - \sigma_2^2(\lambda)A(\lambda)e^{-\sigma_2(\lambda)l\lambda} = \\ & = \sigma_2^2(\lambda)e^{-\sigma_2(\lambda)l}[I_1(\lambda)e^{-[\sigma_1d'-\sigma_2d']} - A(\lambda)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как в наиболее вероятном случае

$$I_1(\lambda)e^{-[\sigma_1d'-\sigma_2d']} > A(\lambda), \quad (8)$$

то функционал (3) при условии (8) достигает минимальной величины. Следовательно, оптимальный режим гиперспектральной изображающей системы организуется на основе следующих предположений:

1. Общую закономерность кривой изменения  $l(\lambda)$  согласно выражению (6) определяет обратная зависимость  $l(\lambda)$  от величины  $\sigma_2(\lambda)$ , стоящей в знаменателе.

2. Во избежание обратной зависимости между  $l(\lambda)$  и  $\sigma_2(\lambda)$ , согласно (6) приводящей к минимуму функционала цели, следует организовать синфазное изменение  $l(\lambda)$  и  $\sigma_2(\lambda)$ , т. е. рост  $l$  должен сопровождаться ростом  $\sigma_2(\lambda)$ .

3. С учётом изложенного предлагается следующая схема прямой взаимосвязи между  $l(\lambda)$  и  $\sigma_2(\lambda)$ : рост  $\lambda$  приводит к уменьшению  $\sigma_2(\lambda)$ , следовательно, при росте  $\lambda$  следует обеспечить уменьшение  $l(\lambda)$ , т. е. при принятых выше допущениях рост  $\lambda$  должен сопровождаться уменьшением высоты полёта носителя гиперспектральной аппаратуры, что приведёт к уменьшению расстояния от БПЛА до исследуемой точки на поверхности моря.

Такой характер изменения функции  $l(\lambda) = \varphi(\lambda)$  в неявном виде был предусмотрен в ограничении (4б), которое исходно предполагало возможность как прямой, так и об-

ратной зависимости  $l$  от  $\lambda$ . В соответствии с выражением (8) зависимость  $l$  от  $\sigma_2$  имеет достаточно сложный характер, однако доминирующей является обратная зависимость. Так как при этом целевой функционал достигает минимума, целесообразен такой режим, когда уменьшение  $\sigma_2$  должно привести к уменьшению  $l$ .

В заключение отметим, что полученные в настоящей статье результаты верны не для конкретного случая наличия одного слоя морского аэрозоля, а для множества слоёв аэрозольных загрязнений  $\{\sigma_{li}\}; i = \overline{1, n}$ , в приводном слое, встречаемых в период функционирования бортовой изображающей системы, а выражение (6) определяет оптимальный режим изменения высоты полёта при формировании цветных изображений морской поверхности, покрытой слоями аэрозолей — элементами указанного множества.

#### Библиографические ссылки

1. Yeh C., Kang L., Lee M., Lin C. Haze effect removal from image via haze density estimation in optical model // Opt. Express. 2013. No. 21. P. 27127—27141.
2. He R., Wang Z., Fan Y., Feng D. Multiple scattering model based single image dehazing / Proceedings of the IEEE Intern. Conf. on Applications, Melbourne, Australia, 19—21 June 2013. P. 733—737.
3. Shi Z., Long J., Tang W., Zhang C. Single image dehazing in inhomogeneous atmosphere // Opt. Int. J. Light Electron Opt. 2014. No. 15. P. 3868—3875.
4. Yoon I., Jeong S., Jeong J., Seo D., Paik J. Wavelength adaptive dehazing using histogram merging based classification for UAV images // Sensors. 2015. No. 15. P. 6633—6651.
5. Gao R., Fan X., Zhang J., Luo Z. Haze filtering with aerial perspective // Proceedings of the IEEE Intern. Conf. on Image Processing, Orland, FL, USA, 30 September 2012. P. 989—992.
6. Yuqing H., Wenrui D., Hongguang L. Haze removal for UAV reconnaissance images using layered scattering model // Chinese J. of Aeronautics. 2016. No. 29(2). DOI: 10.1016/j.cja.2016.01.012.
7. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

#### Ссылка для цитирования

Исмаилов М.М., Асланова А.В. Оптимизация полёта беспилотных летательных аппаратов для гиперспектрального исследования морской поверхности в условиях аэрозольного загрязнения приводного слоя атмосферы // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 79—81.



УДК 681.51

**Е.М. Воронов**, д-р техн. наук, проф., **А.Л. Репкин**, канд. техн. наук,  
**Ф.М. Хромов, С.И. Сычёв**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)  
alexr\_bmstu@mail.ru

## МОДЕЛЬ КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППИРОВОК С СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ СТРОЕМ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

*Сформирована модель сетецентрического управления строем управляемых средств поражения при конфликтном многорубежном взаимодействии с соединением надводных кораблей. Предложен алгоритм сведения объектов группы управляемых средств поражения в импульсный объём по парам объектов на этапе формирования динамического строя. Реализована стохастическая модель воздействия средств соединения надводных кораблей на управляемые средства поражения в группе на различных рубежах конфликтного взаимодействия по дальности (авиационная группировка, барьер, ядро). Рассмотрен пример базового варианта конфликтного взаимодействия, показывающий эффективность наличия сетецентрического управления строем по сравнению с независимыми действиями объектов группы управляемых средств поражения, при эффективном применении системы радиоэлектронной борьбы.*

**Ключевые слова:** группировка управляемых средств поражения; соединение надводных кораблей; сетецентрическое управление; динамический строй; конфликтное многорубежное взаимодействие; целераспределение; стохастическое моделирование.

*A network-centric control model for the controlled destruction means system in the case of multi-border conflict interaction with a connection of above-water ships is formed. An algorithm for converting group objects of controlled destruction means system into a pulse volume by pairs of objects at the stage of forming a dynamic system is proposed. A stochastic influence model of the surface ships' connection means on controlled destruction means in a group at various lines of conflict interaction in terms of range (air grouping, barrier, core) is implemented. An example of the basic variant of conflict interaction, showing the effectiveness of the presence of network-centric formation control in comparison with the independent actions of group objects of controlled destruction means, at the effective use of a radio technical protection system is considered.*

**Keywords:** grouping of controlled destruction means; connection of above-water ships; network-centric control; dynamic system; conflicting multi-border interaction; target allocation; stochastic modeling.

**Введение.** Развитие средств ПВО соединений надводных кораблей (СНК) обуславливает требование пуска управляемых средств поражения (УСП) вне зоны досягаемости ПВО. В связи с этим целеуказание (ЦУ) возможно только от внешних (по отношению к системам носителя) источников. Вместе с тем возникает ряд сложностей обеспечения наведения ракет, обусловленный наличием неопределённости области вероятного положения цели (ОВПЦ), а также сложностью поиска и распознавания одиночной цели в группе НК. Размер ОВПЦ зависит от погрешностей ЦУ и от времени устаревания развединформации при её трансляции на самолёт-носитель (СН) группировки УСП.

Основным способом борьбы с СНК является применение групп противокорабельных крылатых ракет (ПКР) в составе группировки

УСП. Борьба с высокотехнологичным противником подразумевает противодействие с его стороны, что может выражаться в активном применении средств ПВО, снижении эффективной отражающей поверхности кораблей, постановке активных и пассивных помех бортовым системам управления ракет, а также средствам целеуказания. При этом имеет место тенденция к увеличению числа стрельбовых каналов средств ПВО и каналов подавления средств радиоэлектронной борьбы. Это приводит к значительному снижению эффективности боевого применения залпа УСП при автономной работе их бортовых систем управления.

Существенного повышения эффективности применения УСП можно достичь при использовании бортовых элементов инфор-

мационно-управляющего принятия решений, в частности обеспечения информационного взаимодействия УСП в полёте и согласованной выработки управляющих решений.

Таким образом, развитие средств СНК приводит к необходимости поиска новых путей борьбы группировки УСП с перспективными СНК, одним из которых может стать формирование управляемого залпа (УЗ) [1, 2]. При этом под УЗ подразумевается группа УСП, которая посредством широкополосной радиосети позволяет на борту каждого УСП создать целостную картину происходящих событий и обеспечить скоординированное взаимодействие ракет группы, а именно:

- 1) повысить эффективность преодоления средств ПВО СНК противника группой УСП из состава УЗ путём организации строя и формирования пространственно-разнесённых помех;

- 2) обеспечить наиболее рациональное распределение каналов подавления системы активных помех ПВО СНК за счёт комплексной обработки информации в группе УСП;

- 3) обеспечить наиболее рациональное распределение залпа ПКР по целям с учётом неизбежных в боевых условиях потерь УСП;

- 4) повысить вероятность поражения СНК при наведении УСП в условиях неопределённости или недостаточности информации от средств целеуказания, а также в условиях радиоэлектронного противодействия противника за счёт комплексной обработки информации, получаемой системами наведения УСП.

Выполнение задачи в данных условиях может осуществляться путём оснащения УСП системой обмена данных (СОД). Это позволит создавать целостную картину происходящих событий и обеспечивать скоординированное взаимодействие в группе УСП [3, 4].

В процессе движения УСП осуществляется формирование динамического строя путём изменения плотности строя по фронту:

1. На стартовом участке после отделения от самолёта-носителя (СН), участках разгона и выхода на маршевый полёт положение УСП в группе носит случайный характер. В процессе движения группы обеспечивается выполнение следующих условий: отсутствие выхода соседних УСП из области действия СОД и сближения между УСП для обеспечения безопасности от столкновения.

2. При выходе на маршевый участок движения формируются пары УСП путём попарного взаимодействия СОД между соседними УСП, что обеспечивает более эффективное

радиоэлектронное противодействие (РЭП) системам наведения авиационных управляемых ракет. Расстояние между парами задаётся из расчёта невозможности обстрела на большой дальности нескольких пар УСП одним истребителем-перехватчиком (ИП) ядра СНК.

3. На дальности работы РЛС НК барьера осуществляется формирование плотного строя для затруднения обнаружения истинного числа УСП системами ПВО СНК, что обеспечивает уменьшение общего числа ЗУР, пускаемых по группировке УСП.

4. На конечном участке движения, после селекции целей и окончания сетцентрического целераспределения (ЦР), осуществляется конечное наведение с расформированием плотного строя УСП.

Основными параметрами строя УСП, влияющими на эффективность преодоления УСП противовоздушной обороны СНК, являются временная протяжённость последовательности пусков и его ширина по фронту. В связи с тем, что временная протяжённость относится, в первую очередь, к способу пуска группы УСП и их лётно-техническим характеристикам, рассматривается обоснование требований к параметрам строя УСП на маршевом участке траектории в части ширины по фронту. Следует учитывать, что вычисление количественных требований к параметрам строя основывается на характеристиках средств ПВО и, в первую очередь, на характеристиках ЗУР [5, 6].

Анализ стоящих на вооружении и разрабатываемых ЗУР показал, что большая их часть оснащена активными радиолокационными головками самонаведения (АРГС) [1, 2, 5]. Бортовые системы управления таких ЗУР определяют угловые координаты, дальность и скорость целей, сопровождают эти цели и обеспечивают работу системы управления для реализации требуемого закона наведения ЗУР. Если наведение происходит на парную цель, расстояние между объектами которой по фронту меньше, чем разрешающая способность АРГС, то ЗУР в начальный момент движется в направлении энергетического центра совокупности отражённого сигнала. По мере сближения угол между направлениями на парные УСП увеличивается, в результате наступает момент, когда АРГС начинает различать отдельные УСП и двигаться в направлении одной из них с максимальной перегрузкой. Если ширина диаграммы направленности сравнительно велика, а максимальная перегрузка мала, то ЗУР не успевает завершить манёвр разворота на цель после того,



как АРГС ЗУР сможет различить цели. Реализованную таким образом парную цель называют «пространственно-разнесённая помеха».

Собственно залп УСП в составе группировки УСП состоит из 6...8 групп УСП по 8 УСП (при наличии соответствующего количества СН группировки УСП) с временным интервалом между группами 10 с. Рассматривается такая последовательность этапов полёта группировки УСП к цели [1, 5]:

1) пуск объектов УСП с носителей УСП, который производится в заданных «коридорах» для пуска, в результате чего формируются 6 групп УСП по 8 объектов;

2) сведение объектов каждой группы УСП в пары с соблюдением заданного «коридора» по фронту для каждой подгруппы;

3) начало движения к точке заданного полётного задания (центр СНК) с синхронизацией движения УСП в каждой паре;

4) противодействие авиационной группировке СНК до подлёта к барьеру СНК на двух рубежах пуска авиационных ракет (АР);

5) противодействие барьеру СНК с рассмотрением многорубежного воздействия барьера на группу УСП;

6) сканирование области нахождения СНК после прохождения барьера СНК с определением реального центра ядра СНК и обнаружением типа каждого объекта СНК;

7) противодействие ЗРК СПВО основной группы (ядра СНК) на нескольких рубежах обороны СПВО;

8) целераспределение объектов группы УСП по объектам СНК.

**Формирование конфигурации группировки УСП.** Для имитации противодействия группировки УСП с системой ПВО СНК предлагается задание «коридоров» пуска для каждого объекта группировки, в которых осуществляется случайная генерация местоположения каждой УСП, со следующими параметрами: количество и базовая скорость объектов УСП в группе; координаты «коридоров» для пуска объектов группы УСП; координаты объектов группировки в группе УСП, которые задаются случайным образом в формируемых «коридорах» пуска; рекомендуемые расстояния для организации строя между объектами в паре и ширина фронта группы УСП соответственно.

**Сведение объектов группы УСП в пары с соблюдением заданного «коридора» по фронту для каждой группы УСП.** Начальные данные алгоритма:  $N_{gusp}$  — количество объектов в группах УСП;  $N_{gusp\_group}$  — количество групп

УСП;  $[x_{0\_gusp}; y_{0\_gusp}]$  — начальная точка для генерации объектов группы УСП;  $v_{0\_gusp}$  — базовая скорость объектов групп УСП;  $\Delta_1$  — расстояние для образования пары объектов группы УСП;  $\Delta_2$  — общее расстояние для сведения групп УСП; векторы тактики действий СНК:  $s_{snk\_avia}$  — авиационная группа (АГ);  $s_{snk\_barier}$  — барьер СНК;  $s_{snk\_core}$  — ядро СНК;  $s_i$  — максимальная размерность векторов тактики,  $s_i = 3, 4$  и  $4$  элемента соответственно; значения в векторах означают следующее: «4» — группа УСП в количестве 8 объектов видна как одна цель для СНК; «3» — половина группы УСП в количестве 4 объектов видна как одна цель; «2» — пара объектов группы УСП видна как одна цель; «1» — каждый объект группы УСП виден как одна цель; комбинирование данных значений является основой тактики действий СНК при применении по организованной группировке УСП с наличием управления строем;  $N_{snk\_avia}$  — количество истребителей-перехватчиков (ИП) и АР на борту ИП;  $N_{snk\_barier}$  и  $N_{snk\_core}$  — количество СНК барьера, ядра и ЗРК СНК;  $[x_{0\_barier}; y_{0\_barier}]$  — начальная точка для генерации объектов барьера СНК;  $x_{snk\_avia}$  — дальность до границы применения АГ СНК;  $d_{snk\_avia}$  — вектор дальностей для рубежей применения АГ СНК, размерность — согласно вектору  $s_{snk\_avia}$ ;  $p_{snk\_avia}$  — вероятности поражения для АГ СНК (пары, одного объекта пары и одиночного объекта соответственно);  $x_{snk\_barier}$  — дальность до границы применения барьера СНК;  $d_{snk\_barier}$  — вектор дальностей для рубежей применения барьера СНК, размерность — согласно вектору  $s_{snk\_barier}$ ;  $p_{snk\_barier}$  — вероятности поражения для барьера СНК (пары, одного объекта пары и одиночного объекта соответственно);  $x_{snk\_core}$  — дальность до границы применения ядра СНК;  $d_{snk\_core}$  — вектор дальностей для рубежей применения ядра СНК, размерность — согласно вектору  $s_{snk\_core}$ ;  $p_{snk\_core}$  — вероятности поражения для ядра СНК (пары, одного объекта пары и одиночного объекта соответственно).

Этапы алгоритма взаимодействия СНК с группировкой УСП:

1) генерация конфигурации группировки УСП согласно заданным «коридорам» пуска УСП с носителей для подгруппы  $i_{group} = 1, N_{gusp\_group}$ ;

2) генерация конфигурации СНК (барьер, ядро, численности объектов);

3) формирование пар объектов группы УСП.

Вариант конфигурации группировки УСП с результатами сведения в подгруппы с формированием пар и наличием ЦР со стороны

первого рубежа взаимодействия с АГ СНК приведён на рис. 1. Справа обозначены координаты каждой УСП, от которой они начинают движение после пуска с носителя, промежуточные точки — координаты для формирования пар объектов согласно заданным параметрам  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ .

В процессе сближения двух УСП в пару анализируется расстояние между ними: при сближении на расстояние  $R < R_{\text{пары}} = \Delta_1$  движение в заданную точку прекращается, и объекты движутся параллельно друг другу в точку полётного задания;

4) взаимодействие группировки УСП с авиационной группой СНК на этапах  $s_{\text{snk\_avia}}$ , предполагается, что по каждой паре УСП или оставшемуся объекту пары запускается пара ЗУР;

5) взаимодействие группировки УСП с барьером СНК на этапах  $s_{\text{snk\_barier}}$ , предполагается, что по каждой паре УСП или оставшемуся объекту пары запускается пара ЗУР;

6) взаимодействие группировки УСП с ядром СНК на этапах  $s_{\text{snk\_core}}$ , предполагается, что по каждой паре УСП или оставшемуся объекту пары запускается пара ЗУР.

**Функция имитации воздействия авиационной группы СНК.** Предполагается, что по каждой паре объектов или оставшемуся объекту пары группы УСП запускается пара АР со стороны АГ СНК противодействия подгруппы УСП авиационной группе СНК. В базовом варианте рассматривается двухрубеж-

ная последовательность действий АГ СНК при воздействии на группу УСП на дальнем рубеже подлёта к барьеру СНК, при которой предполагается видимость сформированных ранее пар объектов группировки УСП как одной цели. Против каждой обнаруженной цели один ИП одновременно выпускает по две АР, вероятность поражения при этом принимается следующей: если объект группировки УСП является парой, то вероятность поражения одного объекта в паре равна 0,4, двух — 0,1; если объект группировки УСП является одиночным объектом, то вероятность поражения его со стороны СПВО равна 0,8.

Вводится ещё одна переменная — количество противоракет АГ СНК, выпускаемых по одной цели группировки УСП; базовое значение равно 2, т. е. по одной цели запускается две АР. Если же по условию необходимо задать, что по одной цели группировки УСП запускается одна АР АГ СНК (значение переменной равно 1), то в этом случае вероятность поражения двух объектов задаётся равной нулю.

Состав и последовательность АГ СНК для базового эксперимента выбраны следующими: в наличии имеются 8 ИП, каждый из которых имеет 4 АР. Соответственно, общее количество АР принимается равным 32.

Рубежи взаимодействия АГ СНК с группировкой УСП в базовом варианте:

1) на первом рубеже, в момент обнаружения группировки УСП в количестве 6 групп

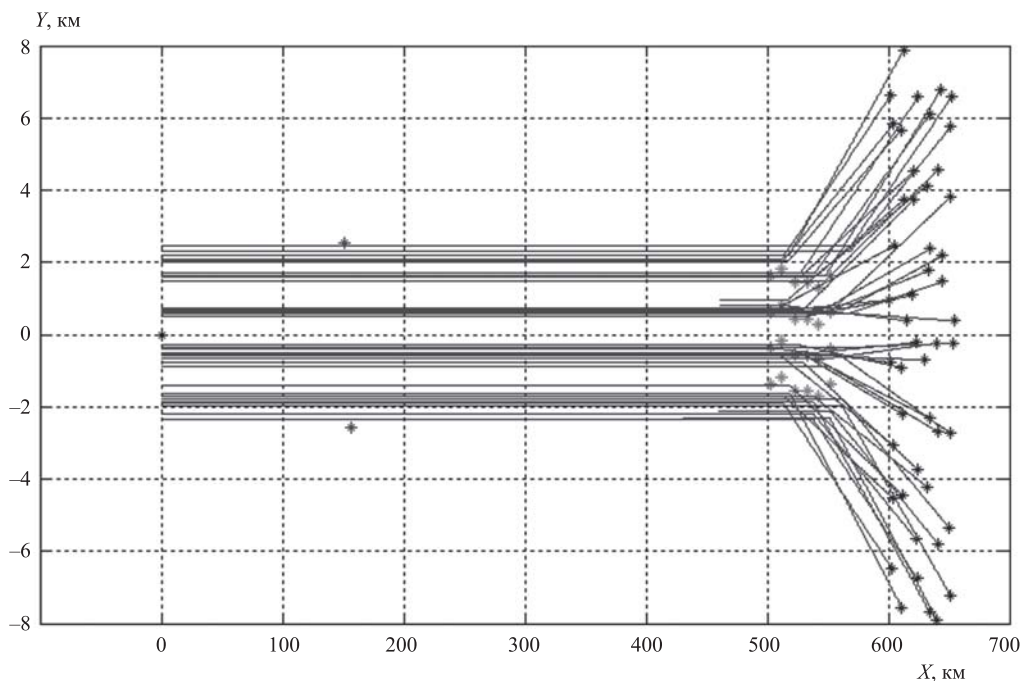


Рис. 1. Управление строем группировки УСП на этапах формирования пар и ЦР АГ СНК

УСП, по каждой группе УСП производится запуск двух АР, в этом случае возможно поражение максимум двух объектов групп УСП (таким образом, будет запущено 12 АР);

2) оставшиеся 20 АР АГ СНК запускает на втором рубеже противодействия, когда обнаружение позволяет различить в каждой группе УСП уже 2 цели, т. е. принимается видимость по 4 объектам группы УСП как одной цели; при наличии 6 групп УСП видимость для АГ СНК составит 12 целей (в этом случае по каждой цели, кроме последней группы УСП, также будет запущено по 2 АР).

**Противодействие барьеру СНК на группировку УСП с рассмотрением многорубежного воздействия на группы УСП.** На этапе формирования конфигурации систем генерируется подгруппа СНК — барьер. Далее рассчитывается среднее расстояние по дальности от центра СНК, и от него производятся отсчёты на рубежи обороны барьера. В рамках базового варианта действие барьера рассматривается на трёх рубежах обороны с расстояниями от центра барьера 200, 100 и 50 км соответственно. Также задаются вероятности поражения объектов группировки УСП: для базового варианта вектор  $\mathbf{p}_{snk\ barier} = [0,1; 0,3; 0,6]$ . Если в паре группы УСП имеются оба объекта, то вероятность сбить оба объекта равна 0,1 (первый элемент вектора) (если не предполагается пуск двух ЗУР ЗРК по одной цели, то данная вероятность принимается равной нулю), а вероятность сбить один объект — 0,3 (второй элемент вектора). Если в паре имеется один объект, то вероятность его поражения принимается 0,6 (третий элемент вектора).

Входные параметры функции:  $N_{gusp}$  — количество объектов в группе УСП;  $flag_{gusp}$  — вектор признака поражения объектов;  $\mathbf{p}_{zrk}$  — вектор вероятностей поражения ПКР группы УСП;  $flag_{rubezh}$  — рубеж обороны.

Выходные параметры: сгенерированные случайные вероятности поражения ПКР группы УСП; вектор признака поражённых ПКР группы УСП.

Параметр  $flag_{rubezh}$  задаёт рубежи обороны барьера СНК по дальности: 4 — сверхдальний, все объекты (8 единиц) в группе УСП видны как один; 3 — дальний, четвёрки объектов в группе УСП видны как один; 2 — средний, пара объектов группы УСП видна как один; 1 — ближний, каждый объект группы УСП виден в отдельности.

Если необходимо рассматривать на среднем рубеже видимость каждого ПКР группы

УСП со стороны барьера СНК, то в циклограмме программы параметр  $flag_{rubezh}$  нужно выставить в значение «1».

Если ЗУР ЗРК назначена на количество объектов, которые наблюдаются со стороны СПВО как один объект, больше 1, и вероятность поражения для данной ЗУР больше требуемого значения (необходимость поражения), то объект для поражения со значением в векторе  $flag_{gusp} = 0$  выбирается случайным образом по равномерному закону распределения.

**Сканирование области нахождения СНК после прохождения барьера СНК с определением реального центра СНК и обнаружением типа каждого объекта СНК.** Данная функция реализована в форме коррекции точки полётного задания (ТПЗ) на основе процедуры обнаружения объектов СНК с выделением главной цели СНК на основе разработанной стохастической процедуры обнаружения объектов СНК, включая ложные цели [7].

**Противодействие ЗРК СПВО ядра СНК на двух рубежах обороны.** Вероятностная схема, рассмотренная для барьера СНК, применима и для ядра СНК, при задании другой последовательности рубежей обороны ЗРК: в частности, для базового варианта применяется двухрубежная тактика ( $\mathbf{s}_{snk\ core} = [2, 2]$ ) на дальностях 100 и 50 км от ядра СНК (параметр  $\mathbf{d}_{snk\ core}$ ) с вероятностями поражения  $\mathbf{p}_{snk\ core} = [0,1; 0,3; 0,6]$ .

**Целераспределение (назначение) ПКР группы УСП по объектам СНК.** Данная функция формирует матрицу ЦР для оставшихся объектов группы УСП согласно матрице эффективностей воздействия, которая может применяться и на этапе 6 после процедуры обнаружения объектов СНК [5, 7, 8].

**Базовый вариант расчёта эффективности группировки УСП при сетевом управлении строём.** Используются следующие начальные данные алгоритма:  $N_{gusp} = 8$ ;  $N_{gusp\ group} = 6$ ;  $\mathbf{s}_{snk\ avia} = [4, 3]$ ,  $\mathbf{s}_{snk\ barier} = [4, 3, 2]$ ,  $\mathbf{s}_{snk\ core} = [2, 2]$  — последовательность тактического применения АГ СНК, барьера СНК и ядра СНК соответственно;  $N_{snk\ avia} = 8$  — количество ИП; каждый ИП имеет по 4 АР;  $N_{snk\ barier} = 2$ ,  $N_{snk\ core} = 3$  — количество НК барьера и ядра; количество объектов ЗРК НК (по одному на каждом НК) 74 ЗУР;  $[x_{0\_gusp}; y_{0\_gusp}]$  — начальная точка для генерации ПКР группы УСП, км; базовая скорость ПКР группы УСП  $v_{0\_gusp} = 0,8$  км/с; расстояние для образования пары УСП  $\Delta_1$ , км; необходимое расстоя-

ние для сведения группы УСП в импульсный объём  $\Delta_2$ , км;  $[x_{0\_barier}; y_{0\_barier}] = [150; 0]$  — расположение объектов барьера СНК, км; дальность до границы применения АГ СНК  $x_{snk\_avia}$ , км; рубежи  $\mathbf{d}_{snk\_avia} = x_{snk\_avia} + [60, 30, 0]$  км;  $\mathbf{p}_{snk\_avia} = [0,1, 0,4, 0,7]$ ; дальность до границы применения ЗРК барьера СНК:  $x_{snk\_barier}$ , км; рубежи:  $\mathbf{d}_{snk\_barier} = x_{snk\_barier} + [200, 100, 50, 25]$  км;  $\mathbf{p}_{snk\_barier} = [0,1, 0,3, 0,6]$ ; дальность для рубежей применения ЗРК ядра СНК  $x_{snk\_core}$ , км; рубежи  $\mathbf{d}_{snk\_core} = x_{snk\_core} + [100, 50, 20]$  км;  $\mathbf{p}_{snk\_core} = [0,1, 0,3, 0,6]$ .

Отдельно следует обратить внимание на параметры  $\mathbf{s}_{snk}$ : значения в данных векторах аналогичны переменной  $flag_{rubezh}$ , указанной ранее. При этом комбинирование значений является основой группового применения группировки УСП при противодействии СНК. Таким образом, в базовом варианте:  $\mathbf{s}_{snk\_avia} = [4, 3]$  — последовательность применения АГ СНК: «4» — первый рубеж, когда все 8 объектов группы УСП видны как один объект для АГ; «3» — второй рубеж, когда 4 объекта группы УСП видны как один объект для АГ;  $\mathbf{s}_{snk\_barier} = [4, 3, 2]$  — последовательность применения барьера СНК: первый рубеж — все 8 объектов группы УСП видны как один объект; второй рубеж — 4 объекта группы УСП видны как один объект; третий рубеж — пара объектов группы УСП видна как один объект;  $\mathbf{s}_{snk\_core} = [2, 2]$  — последовательность применения ядра СНК: первый и второй рубежи — пара объектов группы УСП видна как один объект.

Далее указанные управляющие параметры, наряду с вероятностями поражения и числен-

ностями объектов конфликтующих систем, будут главными варьируемыми параметрами, характеризующими построение и эффективность сетецентрического строя и управление им.

Результат расчёта приведён графически на рис. 2.

Выходные данные алгоритма представляют собой следующую статистику (как пример одного из вариантов взаимодействия): начальное количество объектов группировки УСП — 48; количество оставшихся объектов группировки УСП — 13; количество выпущенных ракет СНК: АГ — 32, барьер — 68, ядро — 54.

ЦР для СНК в форме матрицы  $Z_{snk}$  объектов группировки УСП (6 групп УСП по 8 УСП) имеет следующий вид:

$$Z_{snk} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где «0» — оставшиеся непоражёнными УСП после полного цикла взаимодействия с АГ СНК и СПВО СНК.

Статистика по экспериментам (табл. 1) даёт среднее количество оставшихся объектов группировки УСП в 9 УСП при подлёте к ядру СНК, что в принципе практически удовлетворяет требованию количества УСП, направляемых на главную цель ядра СНК, в количестве 70 % от общего числа УСП

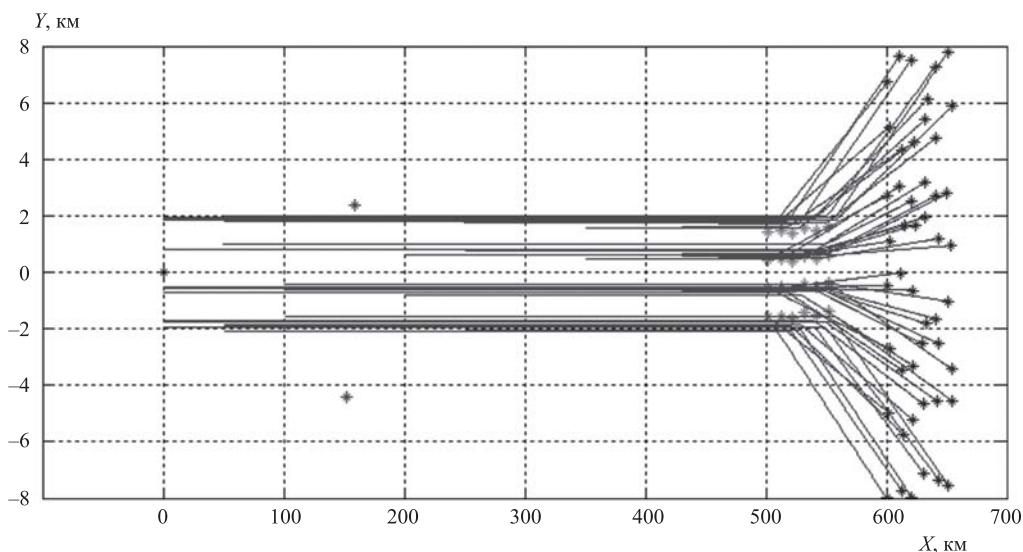


Рис. 2. Многорубежное взаимодействие группировки УСП с СПВО СНК (базовый вариант)

Таблица 1  
Примеры результатов расчёта для стохастического базового варианта

Исходное количество объектов группировки УСП	Матрица ЦР для СНК	Оставшееся количество объектов группировки УСП	Сбито объектов группировки УСП	Количество противоракет СНК
48	1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1	8	11, 15, 14	32, 66, 48
48	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1	8	10, 22, 8	32, 68, 34
48	0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1	9	10, 19, 10	32, 70, 38

Таблица 2  
Результаты расчёта для эксперимента 1

Исходное количество объектов группировки УСП	Матрица ЦР для СНК	Оставшееся количество объектов группировки УСП	Сбито объектов группировки УСП	Количество противоракет СНК
64	1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0	23	3, 15, 23	32, 106, 88
64	1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0	24	7, 16, 17	32, 102, 82
64	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1	21	9, 20, 14	32, 96, 68

и равного примерно 8...10 УСП. В идеальном варианте для эффективного поражения СНК в целом необходимо иметь УСП порядка 15—16 объектов. В двух последних графах таблицы указаны значения для каждого этапа обороны СНК (АГ, барьер, ядро).

**Эксперимент 1.** Исследована эффективность группировки УСП при варьировании численности объектов группировки УСП. Исходное количество объектов группировки УСП — 64: 8 групп УСП по 8 объектов. Результаты расчёта для стохастических экспериментов приведены в табл. 2, где показано, что при увеличении количества ПКР повышается эффективность группировки УСП при воздействии на СНК, так как после воздействия СНК (даже при его усилении) на группировку УСП остаётся большее количество ПКР, что связано с применением комбинированной группировки УСП в виде динамического строя «колонна».

**Эксперимент 2.** Исследована эффективность группировки УСП при варьировании вероятности воздействия со стороны СПВО СНК. Исходное количество объектов группировки УСП — 48: 6 групп УСП по 8 объектов. Результаты расчёта приведены в табл. 3. Показаны вероятности для СНК, которые необходимо обеспечить со стороны группировки УСП средствами постановки помех и СРТЗ, чтобы добиться желаемого результата при полёте к ядру СНК.

**Эксперимент 3.** Исследована эффективность группировки УСП при наличии СРТЗ со стороны группировки УСП. Исходное количество объектов группировки УСП — 48: 6 групп УСП по 8 объектов. Принимается, что при эффективности СРТЗ 100 % вероятность поражения со стороны СПВО уменьшается в 2 раза. Результаты расчёта приведены в табл. 4.

Таким образом, при наличии СРТЗ со стороны группировки УСП, работающей на 50 %, для эф-

Таблица 3

**Результаты расчёта эксперимента 2**

Исходное количество объектов группировки УСП	Вероятности воздействия для АГ, барьера и ядра соответственно	Оставшееся количество объектов группировки УСП	Количество противоракет СНК
48 (базовый)	p_snk_avia = [0,1, 0,4, 0,7]; p_snk_barier = [0,1, 0,3, 0,6]; p_snk_core = [0,1, 0,3, 0,6];	12	32, 66, 52
48	p_snk_avia = [0,1, 0,5, 0,8]; p_snk_barier = [0,1, 0,4, 0,7]; p_snk_core = [0,1, 0,4, 0,7];	6	32, 66, 40
48	p_snk_avia = [0,1, 0,5, 0,8]; p_snk_barier = [0,1, 0,4, 0,8]; p_snk_core = [0,1, 0,4, 0,8];	7	32, 70, 34
48	p_snk_avia = [0,2, 0,5, 0,8]; p_snk_barier = [0,2, 0,5, 0,8]; p_snk_core = [0,2, 0,5, 0,8];	3	32, 62, 28
48	p_snk_avia = [0,1, 0,35, 0,7]; p_snk_barier = [0,1, 0,25, 0,55]; p_snk_core = [0,1, 0,25, 0,55];	12	32, 76, 36
48	p_snk_avia = [0,1, 0,3, 0,6]; p_snk_barier = [0,1, 0,2, 0,5]; p_snk_core = [0,1, 0,2, 0,5];	16	32, 70, 50
48	p_snk_avia = [0,05, 0,2, 0,5]; p_snk_barier = [0,05, 0,2, 0,4]; p_snk_core = [0,05, 0,2, 0,4];	21	32, 72, 54

Таблица 4

**Результаты расчёта эксперимента 3**

Исходное количество объектов группировки УСП	Эффективность СРТЗ со стороны группировки УСП, %	Оставшееся количество объектов группировки УСП	Количество противоракет СНК
48 (базовый)	0	12	32, 70, 52
48	25	14	32, 72, 52
48	50	18	32, 72, 52
48	75	22	32, 78, 70
48	100	25	32, 78, 78
40 (5 групп УСП)	50	16	30, 64, 58
40 (5 групп УСП)	100	20	30, 62, 50

эффективного выполнения боевой задачи достаточно даже 5 групп УСП (40 УСП). При базовом же варианте после воздействия СПВО СНК у группировки УСП остаётся в среднем примерно 20 объектов.

**Эксперимент 4.** Исследована эффективность группировки УСП при наличии у СПВО СНК на один рубеж обороны больше (4 для барьера и 3 для ядра):

$$s_{snk\_avia} = [4, 3];$$

$$s_{snk\_barier} = [4, 3, 2, 2];$$

$$s_{snk\_core} = [2, 2, 1].$$

Результаты даны для варианта наличия СРТЗ группировки УСП, работающей на 50 % своего потенциала. Исходное количество объектов группировки УСП — 48: 6 групп УСП по 8 объектов. Результаты расчёта для нескольких статистических экспериментов приведены в табл. 5.

**Эксперимент 5.** Исследована эффективность сетецентрического управления строем группировки УСП по сравнению с построением «фронт». В этом случае варьированию подлежат значения в векторах для рубежей обороны СНК. Результаты расчёта приведены в табл. 6.

Таблица 5

**Результаты расчёта эксперимента 4**

Исходное количество объектов группировки УСП	Матрица ЦР для СНК	Оставшееся количество объектов группировки УСП	Количество противоракет СНК
48	1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0	10	32, 114, 98
48	1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	9	32, 108, 96
64	1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	13	32, 148, 128
64	—	15	32, 148, 146
64	—	12	32, 138, 104



Результаты расчёта эксперимента 5

Исходное количество объектов группировки УСП	Рубежи воздействия для АГ, барьера и ядра соответственно	Оставшееся количество объектов группировки УСП	Количество противоракет СНК
48 (базовый, с наличием управления строем), СРТЗ отсутствует	s_snk_avia = [4, 3]; s_snk_barier = [4, 3, 2]; s_snk_core = [2, 2];	13	32, 66, 50
48 (базовый, с наличием управления строем), СРТЗ на 50 %	s_snk_avia = [4, 3]; s_snk_barier = [4, 3, 2]; s_snk_core = [2, 2]	20	32, 80, 62
48 (разбиение ведётся только по парам УСП), СРТЗ отсутствует	s_snk_avia = [2, 2]; s_snk_barier = [2, 2, 2]; s_snk_core = [2, 2]	8	32, 100, 28
	s_snk_avia = [2, 2]; s_snk_barier = [2, 2, 2]; s_snk_core = [2, 2]	6	32, 108, 38
48 (разбиение ведётся только по парам УСП), СРТЗ на 50 %	s_snk_avia = [2, 2]; s_snk_barier = [2, 2, 2]; s_snk_core = [2, 2]	12	32, 124, 54
	s_snk_avia = [2, 2]; s_snk_barier = [2, 2, 2]; s_snk_core = [2, 2]	15	32, 120, 56
48 (разбиение на пары УСП не проводится), управление строем отсутствует, СРТЗ отсутствует	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	0	32, 126, 6
	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	0	32, 112, 2
48 (разбиение на пары УСП не проводится), управление строем отсутствует, СРТЗ на 50 %	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	1	32, 140, 10
	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	2	32, 148, 22
96 (разбиение на пары УСП не проводится), управление строем отсутствует, СРТЗ отсутствует	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	5	32, 148, 116
	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	6	32, 148, 102
96 (разбиение на пары УСП не проводится), управление строем отсутствует, СРТЗ на 50 %	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	14	32, 148, 148
	s_snk_avia = [1, 1]; s_snk_barier = [1, 1, 1]; s_snk_core = [1, 1]	12	32, 148, 154

Таблица 6

Графический пример для 96 УСП приведён на рис. 3 (осталось 7 УСП) совместно с матрицей ЦР для СНК:

$$Z_{snk} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Из табл. 6 следует, что при частичном управлении строем (на уровне формирования пар объектов) эффективность воздействия группировки УСП на СНК при отсутствии СРТЗ весьма низкая, при остаточной численности в 5 или 6 УСП. При наличии СРТЗ, работающей на 50 % своей эффективности, удаётся приблизиться к нижнему пределу общей эффективности группировки УСП, тогда как при наличии сетецентрического управления строем у группировки УСП остаётся порядка 20 объектов, что позволяет не только выполнить тактическую задачу по поражению главной цели СНК, но и обеспечить поражение сопровождающих НК.

При отсутствии управления строем от группировки УСП в составе 48 объектов не остаётся ни одного объекта группировки УСП, и лишь удвоенное количество УСП более-менее позволяет приблизиться к результатам группировки УСП со стандартным количеством объектов, и то с меньшей эффективностью даже при наличии СРТЗ.

Таким образом, разработанные алгоритмы сетецентрического управления строем УСП позво-

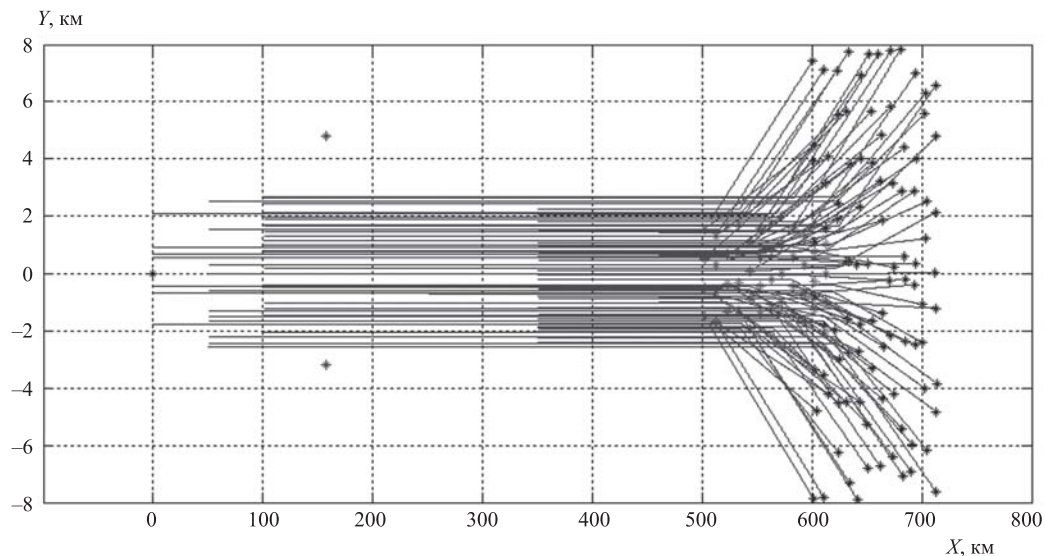


Рис. 3. Многорубежное взаимодействие группировки УСП с СПВО СНГ (эксперимент 5, 96 УСП)

ляют повысить эффективность группировки УСП более чем в два раза при его отсутствии и на 50 % относительно обычного разбиения на пары УСП в группах УСП.

**Заключение.** Сформированная модель сетецентрического управления строем УСП при конфликтном многорубежном взаимодействии с СНГ, реализованная в форме стохастического моделирования поражения объектов в группах УСП на различных рубежах конфликтного взаимодействия с СНГ по дальности (АГ, барьер, ядро), показала свою эффективность по сравнению с независимыми действиями объектов групп УСП, особенно при применении системы радиотехнической защиты (СРТЗ) групп УСП.

#### Библиографические ссылки

1. Ефремов В.А., Сычёв С.И., Хамаев Н.В., Фомичёв А.А., Ботнев В.Н. Групповое построение управляемых средств поражения при залповом применении // Информационно-аналитический журнал «Радиоэлектронные технологии». 2018. № 3.

2. Обносов Б.В. Основы взаимодействия управляемых авиационных средств поражения с системами бортового оборудования авиационных комплексов и внешних средств разведки и целеуказания. Роль сетецентрических систем ведения боевых действий // Альманах Россия: «Союз Технологии» — «Радиоэлектронная технология России». 2013.

3. Воронов Е.М., Латыпова П.А., Репкин А.Л., Сычёв С.И., Хамаев Н.В. Формирование оптимального управления ресурсами групп объектов в задаче конфликтного противодействия авиационно-ракетной группировки и системы ПВО / Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-

2016). IX Мультиконференция по проблемам управления. 2016. С. 453—463.

4. Васильев Н.А., Сычёв С.И., Куся А.М., Хамаев Н.В. Оптимизация обликовых характеристик управляемых средств поражения по критерию максимизации допустимого времени устаревания целеуказания / Ежегодная научная конференция «Актуальные проблемы вооруженной борьбы в воздушно-космической сфере», 8—10 апреля 2015.

5. Обносов Б.В., Воронов Е.М. и др. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. Современные подходы и методы: в 2 т. Т. 2 / под ред. Е.М. Воронова, Е.А. Микрина, Б.В. Обносова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 520 с.

6. Воронов Е.М., Ефремов В.А., Репкин А.Л., Сычёв С.И. Функциональные свойства конфликтно-оптимального прогноза в системе оптимизационно-имитационного моделирования взаимодействия группировок управляемых средств поражения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2013. № 3. С. 3—27.

7. Воронов Е.М., Куся А.М., Репкин А.Л., Сычёв С.И., Хамаев Н.В., Фоминов А.А. Комплексный алгоритм обнаружения, идентификации соединения надводных кораблей и целераспределения группы управляемых средств поражения с сетецентрическим управлением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2020. № 4.

8. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 314 с.

#### Ссылка для цитирования

Воронов Е.М., Репкин А.Л., Хромов Ф.М., Сычёв С.И. Модель конфликтного взаимодействия группировок с сетецентрическим управлением строем управляемых объектов // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 82—91.

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

evgeniv36@mail.ru, skyfox.2016@mail.ru, alexmichdm@gmail.com

## АЛГОРИТМЫ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОТЕЗАМИ РУК

*Предложены алгоритмы и структурные схемы управления автоматизированными протезами рук. Протез руки рассмотрен как манипуляционная робототехническая система, оснащённая устройством целеуказания положения предмета среди других, датчиками положения и микроконтроллером. При этом переносные движения кисти протеза выполняются в автоматическом режиме, а ориентирующие движения кисти — в следящем режиме с помощью движения стопы ноги, от задающего устройства, расположенного в обуви.*

**Ключевые слова:** протез руки; полуавтоматическое управление; алгоритм.

*Algorithms and block diagrams for control of automated hand prostheses are proposed. The hand prosthesis is considered as a manipulative robotic system equipped with a target designation device for the position of an object, among others, position sensors and a microcontroller. In this case, the transference movements of the hand-prosthesis are carried out in automatic mode, while the orienting movements of the hand in the tracking mode — with the help of the movement of the foot, from the setting device located in the shoe.*

**Keywords:** hand prosthesis; semi-automatic control; algorithm.

**Введение.** Созданием протезов рук люди занимаются уже много лет, однако задача создания протеза руки, приближающегося по своим функциональным возможностям к руке человека, далека от решения. Одним из основных препятствий для решения этой задачи является дефицит управляющих сигналов, необходимых для управления протезом. Причём этот дефицит возрастает с увеличением потерянной части руки. В настоящее время наибольшие успехи достигнуты при создании протезов кисти руки. В этом случае используются управляющие сигналы от биопотенциалов оставшихся мышц предплечья и плеча [1]. Однако при полной потере руки такие возможности отсутствуют. Во многих странах мира ведутся интенсивные работы по использованию для управления протезами рук сигналов, получаемых от остатков нервов плеча, или непосредственного снятия информации с головного мозга. Однако большинство этих методов предполагает проведение хирургических операций. Альтернативным подходом для управления протезами рук является метод использования сигналов от движения удалённых от протеза частей тела человека. В частности, для управления пальцами протеза и ориентации кисти в работе [2] предложено использовать сигналы от движения пальцев ног и стопы. В настоящей статье предлагается для управления полным протезом руки (при потере всей руки) метод полуавтоматического управления. Предполагается, что при управлении

протезом руки часть операций выполняется в автоматическом режиме (переносное движение кисти), а часть операций (ориентация кисти и движения пальцев протеза) — от движений пальцев ноги и стопы.

**Целеуказание положения предмета.** Для осуществления переносного движения кисти протеза в автоматическом режиме необходимо знать положение захватываемого предмета среди других, располагаемых, например, на столе. Для этого предполагается использовать систему целеуказания. Предлагаемая система целеуказания состоит из налобной повязки с контроллером, лазерного дальномера и системы гироскопов.

Определение положения предметов производится в системе координат  $OXYZ$ , связанной с телом человека, начало которой расположено в плече. С головой человека связана система координат  $0_1X_1Y_1Z_1$ .

Будем считать, что система  $0_1X_1Y_1Z_1$  смещена относительно системы  $OXYZ$  на величины  $a, b, c$  по осям  $X, Y, Z$  соответственно. В системе  $0_1X_1Y_1Z_1$  расстояние  $r$  до предмета определяется дальномером, а углы  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющие поворот головы человека, — гироскопом. С учётом изложенного координаты предмета в системе  $OXYZ$  будут определяться выражениями

$$\begin{aligned}x &= a + r \cos \beta \sin \alpha; \\y &= b + r \cos \beta \sin \alpha; \\z &= r \sin \beta + c.\end{aligned}\tag{1}$$

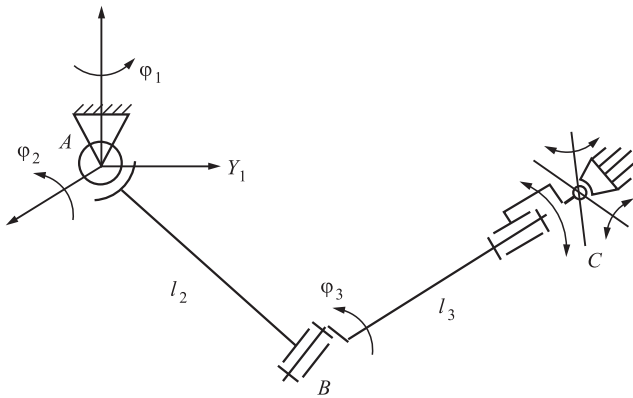


Рис. 1. Кинематическая схема механизма протеза руки

**Переносное движение кисти протеза руки** к предмету можно реализовать в автоматическом режиме, например, по команде кивка головы. Кинематическую схему механизма переносного движения протеза примем в виде схемы механизма с тремя степенями свободы (рис. 1).

В качестве управляющих функций примем углы относительного поворота звеньев механизма протеза  $\varphi_1, \varphi_2, \alpha$ . Для построения алгоритмов управления движением кисти протеза из начального положения в конечное необходимо знать значения углов  $\varphi_1, \varphi_2, \alpha$  в этих заданных положениях кисти. Значения углов в начальном и в текущем положениях задаются датчиками относительного положения, которыми оснащается протез.

В конечном положении кисти управляющие углы могут быть определены через координаты  $x, y, z$ , которые, в свою очередь, определяются системой целеуказания. Запишем координаты кисти (точки C) в следующем виде:

$$x = \cos \varphi_1 (l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3), \quad (2)$$

$$y = \sin \varphi_1 (l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3), \quad (3)$$

$$z = l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3, \quad (4)$$

где  $\varphi_3 = \varphi_2 + \alpha$ ;  $l_2, l_3$  — длины звеньев.

Определим угол  $\varphi_1$  из выражений (2) и (3):

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{y}{x}\right). \quad (5)$$

Далее определим угол  $\alpha$ , возводя в квадрат и складывая выражения (2) и (4):

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\frac{x^2}{\cos^2 \varphi_1} + z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}\right). \quad (6)$$

Угол  $\varphi_2$  будем искать из выражения (4), учитывая, что  $\varphi_3 = \varphi_2 + \alpha$ . Получим

$$a \sin \varphi_2 + b \cos \varphi_2 + c = 0, \quad (7)$$

где  $a = l_2 + l_3 \cos \alpha$ ;  $b = l_3 \sin \alpha$ ;  $c = -z$ .

Уравнение (7) сводится к квадратичному путём выражения  $\sin \varphi_2$  и  $\cos \varphi_2$  через  $\text{tg}(\varphi_2/2)$ . Таким образом, получим

$$a_1^2 \text{tg}^2 \frac{\varphi_2}{2} + b_1 \text{tg} \frac{\varphi_2}{2} + c_1 = 0, \quad (8)$$

откуда

$$\varphi_2 = 2 \arctg\left(\frac{\sqrt{-a_1 \pm (c_1 - b_1)(c_1 + b_1)}}{c_1 - b_1}\right), \quad (9)$$

где  $a_1 = c - b$ ;  $b_1 = 2a$ ;  $c_1 = c + b$ .

Полученные выражения для углов  $\varphi_1, \varphi_2, \alpha$  позволяют построить алгоритм автоматического управления переносным движением протеза руки к предмету для его захвата от одной команды — кивка головы. Структура программного устройства и алгоритм управления переносным движением показаны на рис. 2.

**Осуществление переносного движения кисти протеза в заданную точку.** Имея начальные и конечные значения углов относительного поворота звеньев протеза, можно построить процесс его перехода из начального положения в конечное. Для этого используем

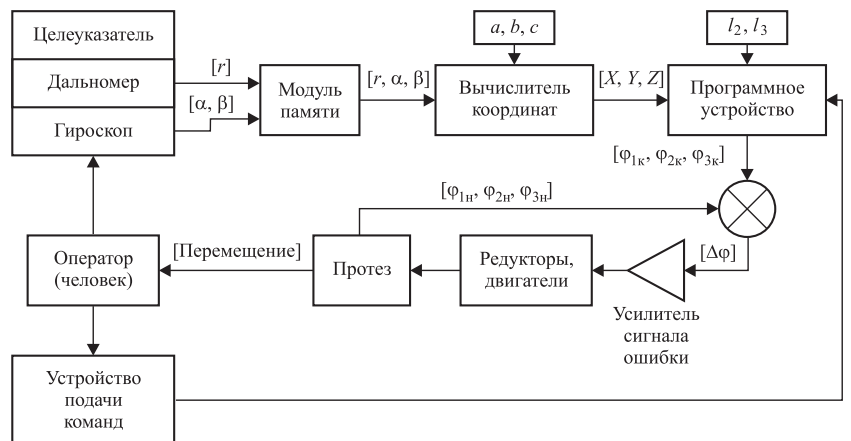


Рис. 2. Функциональная схема системы целеуказания протеза руки:

$\varphi_{1n}, \dots, \varphi_{3n}; \varphi_{1k}, \dots, \varphi_{3k}$  — начальные и конечные значения  $\varphi_1, \dots, \varphi_3$  соответственно

синусоидальный закон изменения по времени  $t$  углового ускорения  $\ddot{\varphi}$ . В этом случае имеем

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{\dot{\varphi}_{\max}\pi}{2\Delta\varphi} \sin\left(\frac{\dot{\varphi}_{\max}\pi t}{\Delta\varphi}\right), \quad (10)$$

где  $\Delta\varphi$  — разность между начальным и конечным углами;  $\dot{\varphi}_{\max}$  — максимальная угловая скорость.

Закон изменения угловой скорости находится интегрированием выражения (10):

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{\dot{\varphi}_{\max}}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\dot{\varphi}_{\max}\pi t}{\Delta\varphi}\right) \right]. \quad (11)$$

Закон изменения относительных углов звеньев механизма находится интегрированием выражения (11):

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \left[ \dot{\varphi}_{\max} t - \frac{\Delta\varphi}{\pi} \sin\left(\frac{\dot{\varphi}_{\max}\pi t}{\Delta\varphi}\right) \right]. \quad (12)$$

Максимальную угловую скорость принимают независимой от перемещения и равной для всех звеньев исходя из известных скоростей поворота в локте и плече руки человека, которые варьируются от 1 до 2 рад/с.

Максимальное угловое ускорение зависит от максимальной скорости и перемещения и определяется из выражения (10):

$$\ddot{\varphi}_{\max} = \frac{\dot{\varphi}_{\max}\pi}{2\Delta\varphi}. \quad (13)$$

Время перехода из начального положения в конечное  $T$  можно получить из выражения (12):

$$T = \frac{2\Delta\varphi}{\dot{\varphi}_{\max}}. \quad (14)$$

Построим зависимости углового перемещения, скорости и ускорения от времени для  $\dot{\varphi}_{\max} = 1$  рад/с,  $\Delta\varphi = 1$  рад.

Согласно выражению (14) время перехода

$$T = \frac{2\Delta\varphi}{\dot{\varphi}_{\max}} = \frac{2 \cdot 1}{1} = 2 \text{ с}. \quad (15)$$

Графики перехода на временном промежутке  $t$  от 0 до 2 с приведены на рис. 3...5.

Таким образом, получены все необходимые выражения для перехода протеза к предмету после целеуказания. Далее рассмотрим кинематику запястья для его ориентации и захвата предмета пальцами.

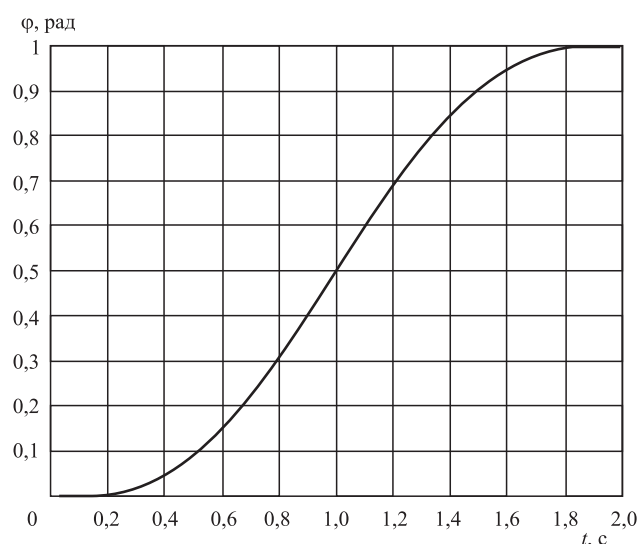


Рис. 3. Угловое перемещение  $\varphi(t)$

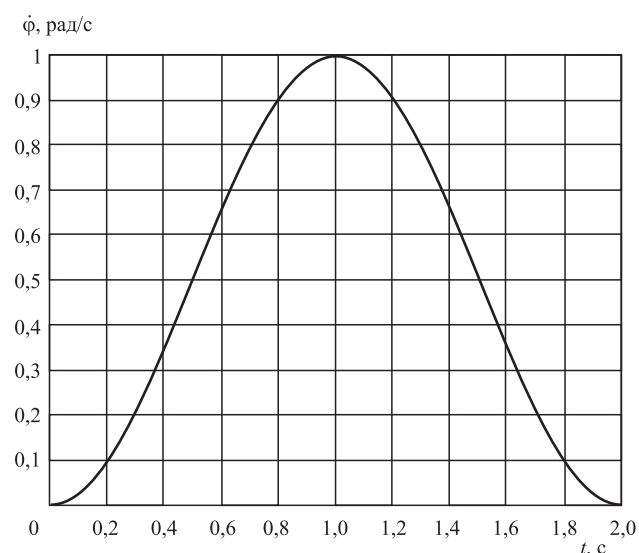


Рис. 4. Угловая скорость  $\dot{\varphi}(t)$

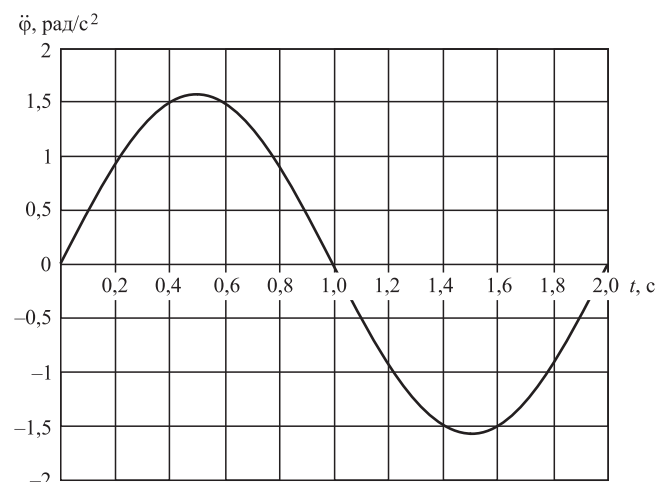


Рис. 5. Угловое ускорение  $\ddot{\varphi}(t)$

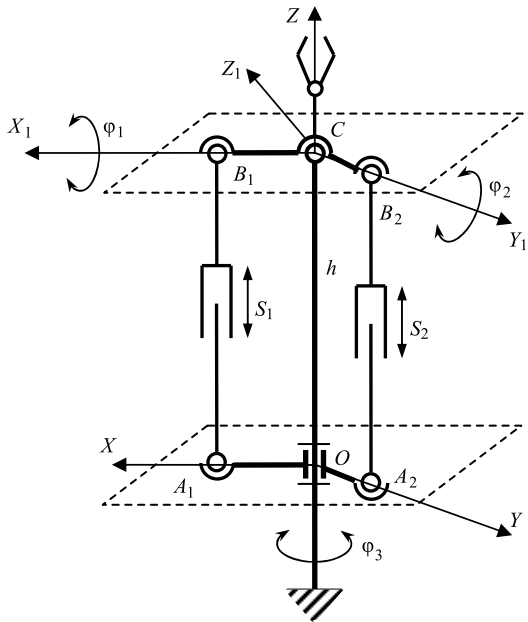


Рис. 6. Кинематическая схема механизма ориентации кисти протеза руки

**Ориентирующее движение кисти протеза руки.** Ориентирование кисти протеза руки реализуется механизмом, имеющим один вращательный и два поступательных привода (рис. 6). Задача управления сферическим механизмом параллельной структуры рассматривалась в работе [3].

Связь между углами поворота кисти  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и перемещениями в поступательных приводах  $S_1$  и  $S_2$  имеет вид

$$S_1^2 = b_1 + h + a_1 - 2b_1a_1 \cos \varphi_2 - b_1h \cos \varphi_1 \sin \varphi_2, \quad (16)$$

$$S_2^2 = b_2^2 + a_2^2 - 2b_2a_2 \cos \varphi_1 - 2b_2h \sin \varphi_1, \quad (17)$$

где  $h, b_i, a_i$  ( $i = 1, 2$ ) — постоянные размеры механизма ориентации;  $S_i$  ( $i = 1, 2$ ) — перемещения в линейных приводах.

При заданных углах  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  перемещения в линейных приводах определяются из выражений (16) и (17). Поворот вокруг оси  $Z$  на угол  $\varphi_3$  реализуется независимо. Алгоритм управления ориентирующим движением кисти показан на рис. 7, где  $S_x, S_y$  — сигналы от датчиков положения кисти;  $S_1, S_2$  — преобразованные значения параметров текущего положения кисти.

Сложность реализации ориентирующих движений протеза руки связана с отсутствием точных конечных значений параметров положения кисти протеза при захвате предмета. Это положение определяется на основе зрительной обратной связи человека, поэтому оно реализуется с помощью угловых перемещений стопы ноги и под визуальным контролем человека. Управляющие сигналы формируются с помощью тактильной стельки, вложенной в обувь, и угловых перемещений стопы [2]. Для реализации необходимых угловых перемещений используется принцип обратной связи. Текущее положение выходного звена механизма привода измеряется датчиком линейных перемещений, сигнал с которого переводится в цифровую форму и поступает в вычислительный блок, где происходит сравнение текущего положения с необходимым и выработка управляющих сигналов для приводов. Привод управляется при помощи двух двоичных сигналов: сигнала включения и сигнала выбора направления перемещения. Направление перемещения определяется знаком разности измеренного и заданного положений. При их равенстве привод отключается и выдаёт сигнал разрешения включения второго привода, который работает аналогично. Текущее значение углов хранится в запоминающих суммирующих регистрах, команды на поворот по осям  $X$  и  $Y$  вызывают увеличение или уменьшение значений углов в соответствующих запоминающих регистрах на  $10^\circ$  каждую секунду, пока команда активна. Для этого на синхронизирующие входы регистров подаются тактовые импульсы со специального генератора.

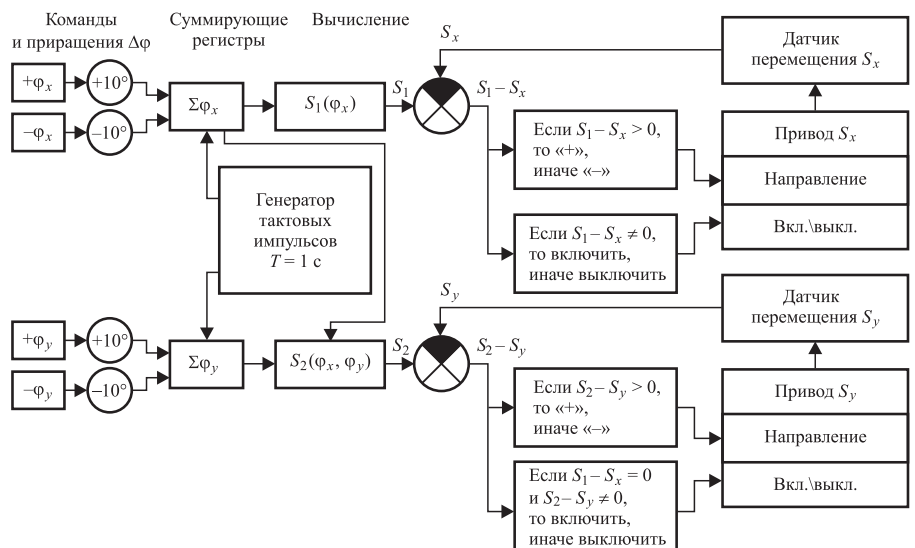


Рис. 7. Алгоритм управления ориентирующим движением протеза кисти руки



**Вывод.** Предложенные алгоритмы позволяют повысить функциональность полных протезов рук и облегчить процесс управления ими благодаря выполнению отдельных операций в автоматическом режиме.

*\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00775.*

#### **Библиографические ссылки**

1. **Кобринский А.Е.** и др. Биоэлектрическая система управления // Доклады АН СССР. 1957. Т. 117. № 1. С. 78—80.

2. **Воробьев Е.И., Михеев А.В., Моргуненко К.О.** Макет протеза кисти с управлением от движения стопы и пальцев ног // Медицинская техника. 2017. № 2. С. 48—51.

3. **Глазунов В.А., Хейло С.В.** Решение задачи управления сферическим механизмом параллельной структуры // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 2. С. 27—33.

#### **Ссылка для цитирования**

**Воробьев Е.И., Дорощев В.О., Михеев А.В.** Алгоритмы полуавтоматического управления протезами рук // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 92—96.

### **Требования к оформлению библиографических ссылок**

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

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

Сдано в набор 03.12.2020.

Подписано в печать 22.01.2021.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

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

Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

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