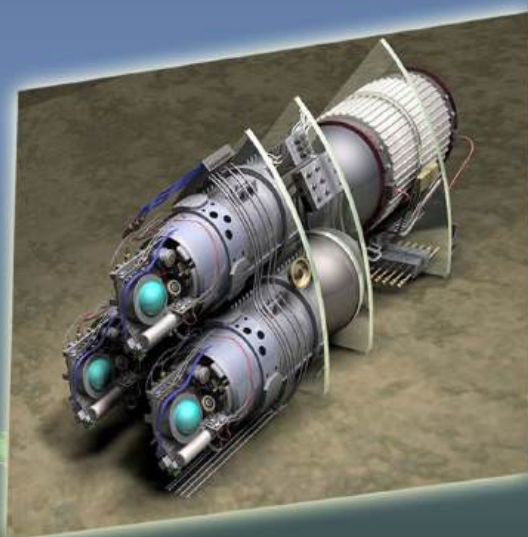
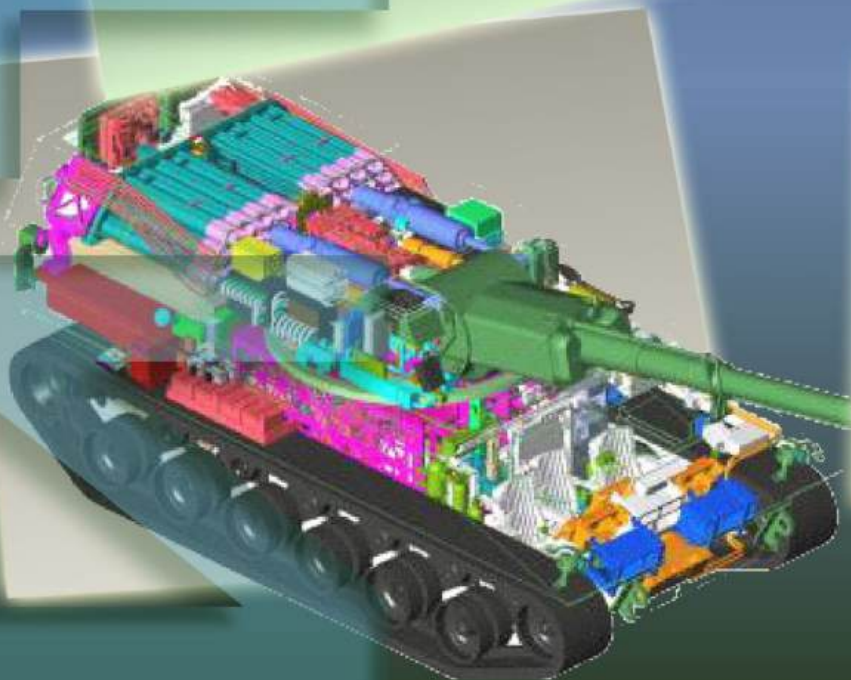
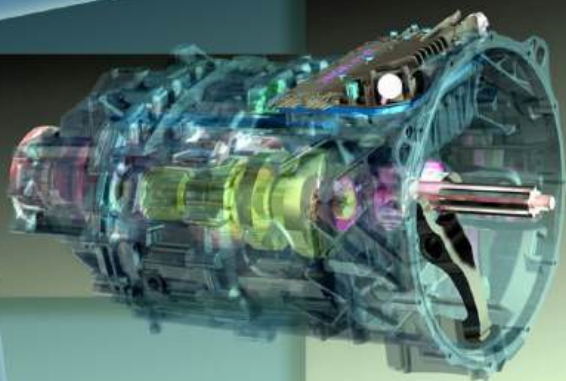
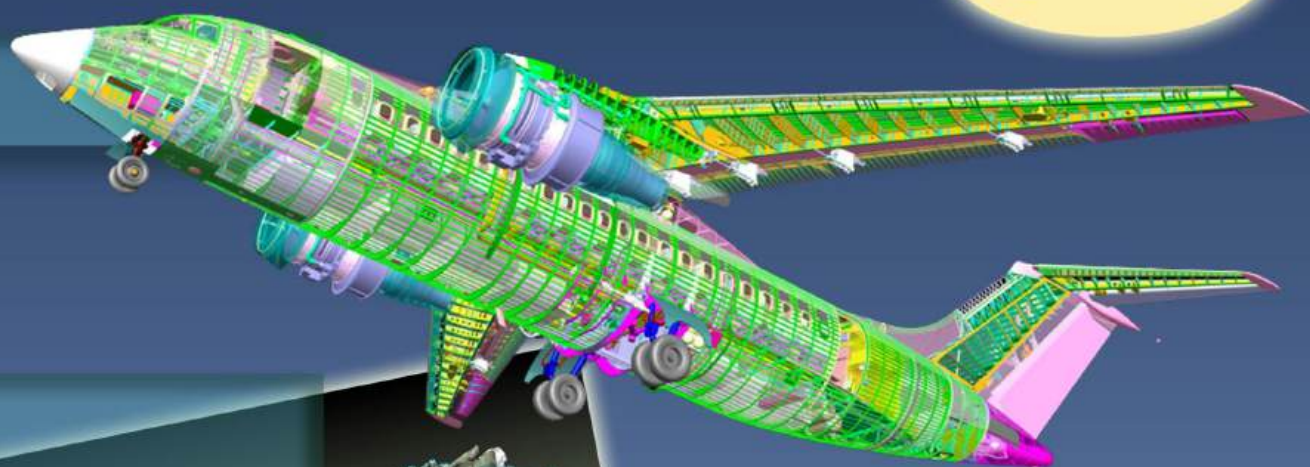


# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 2' 2020





## Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

*ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:*



Межотраслевой научно-технический журнал

**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **79379**

**Издается с 1984 года**



Межотраслевой научно-технический журнал

**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **80089**

**Издается с 1981 года**



Научно-технический журнал

**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **79378**

**Издается с 1976 года**



Межотраслевой научно-практический журнал

**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **80090**

**Издается с 1993 года**



Научно-практический журнал

**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)

Подписной индекс **79187**

**Издается с 1974 года**

*Все издания ФГУП "Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:*

✓ включены решением ВАК Министерства образования и науки России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);  
факс: 8 (495) 491-44-80.  
E-mail: [secretariat@ntkompas.ru](mailto:secretariat@ntkompas.ru)



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА  
«КОМПАС»

## № 2 (178) 2020

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

### Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ЦИТИ РАН

### Ответственный секретарь

Г. П. Глотова, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

### Редакционная коллегия:

В. В. Бордюже, д-р техн. наук, проф., Координационный совет по информационным технологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов, канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономики»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук, ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук, проф., АО «НИИАА»; С. В. Назаров, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»; М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ; С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»; А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычислительный центр им. А. А. Дородницына; П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Солюмин, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р. воен. наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф., НИЦ СALS-технологий «Прикладная логистика»; А. В. Цырклов, д-р техн. наук, проф., ГКНПЦ им. М. В. Хруничева; В. А. Шахнов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; Е. И. Шульгин, д-р техн. наук, НИЦ при президиуме АИИ им. А. М. Прохорова

☎ редакции (495) 491-43-17  
E-mail: izdanie@ntckompas.ru  
http://ntckompas.ru

Информационные технологии  
в проектировании и производстве:  
Науч.-техн. журн./ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2020.  
№ 2 (178). С. 1—56.

Редактор О. А. Константинова  
Компьютерная верстка: Н. В. Ильина,  
К. В. Трыкина

Подписано в печать 28.05.2020.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 6,7.  
Заказ 1949. Тираж 250 экз.  
Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».  
Отпечатано в ООО «Рапидограф».  
117342, Москва, ул. Бултерова, д. 17Б.  
Индекс 79378. 10 статей.

Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### Инновационные технологии решения задач проектирования, моделирования и производства

- Горобцов А. С., Чигиринская Н. В., Андреева М. И., Смирнов Е. А., Бочкин А. М., Поляков В. Н. Математическая модель для нахождения программного движения робота-андроида методом обратной задачи ..... 3
- Бутко А. О., Кузнецов П. М. Организация целеустремленной среды управления единичным производством ..... 7
- Винарская Г. А., Волкова Г. Д. Многоуровневое моделирование энергетических систем ..... 12
- Кондусова В. Б., Сердюк А. И., Кондусов В. Д., Сергеев А. И. Повышение эффективности функционирования САПР на основе разработки методологии информационной поддержки жизненного цикла наукоемких изделий ..... 16
- Федоров С. В. Устройство формирования переключающих функций системы управления матричным преобразователем частоты на основе широтно-импульсной модуляции ..... 21
- Курносенко А. Е., Никольский Т. В., Ломаченко А. С. Подготовка модели оборудования к выполнению имитационного моделирования в САПР ..... 24
- Сумароков С. В., Жабоев Т. К., Новосельский Ф. О., Гусев М. В., Королев С. А. Определение и апробация требований к расчетным комплексам для решения оптимизации задач проектного направления "Прорыв" ..... 31

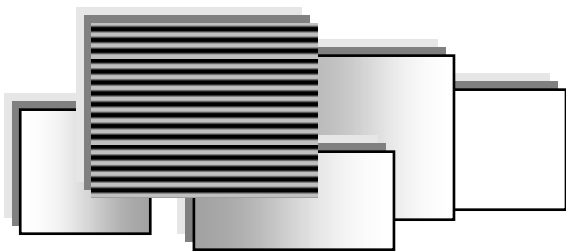
### Информационные технологии решения задач производства

- Кондратенко В. С., Rogov A. Ю., Кобыш А. Н., Семчуков М. Н., Кондратенко Е. В., Слепцов М. А., Шкоркина Е. Н. Повышение эффективности мониторинга инженерной инфраструктуры ЦОД объектов связи с помощью сорбционного кабельного сенсора ..... 36
- Анисимов В. И., Васильев С. А., Евдокимов И. А., Тарасова О. Б. Обзор методов автоматизации тестирования и документирования серверного интерфейса, основанного на архитектуре RESTful ..... 45
- Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Краюшкин В. А. Дополненная реальность для умного производства ..... 49

# **INFORMATION TECHNOLOGY OF CAD/CAM/CAE**

## **THE SCIENTIFIC JOURNAL**

Information on recent advances in CAD/CAM/CAE, industry & business & complex information technology, including methods and tools of computer graphing, geometrical and mathematical modeling, database control methods on estimation and provision of control and reliability.



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 514.853

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА-АНДРОИДА МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

А. С. Горобцов, д-р техн. наук; Н. В. Чигиринская, д-р пед. наук;  
М. И. Андреева; Е. А. Смирнов, канд. техн. наук;  
А. М. Бочкин, канд. физ.-мат. наук; В. Н. Поляков, канд. техн. наук  
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

*Представлена математическая модель для нахождения программного движения приводов робота-андроида методом обратной задачи. Используются методы динамики связанных систем тел, ориентированные на численное решение. Уравнения обратной задачи записаны в форме дифференциально-алгебраических уравнений. Представлены интерполяционные функции, однозначно задающие траекторию движения корпуса робота и траектории его стоп. Рассмотрено пространственное движение робота, для описания которого выбрана расчетная схема, включающая все звенья робота и соединяющие их кинематически пары.*

**Ключевые слова:** робототехника, шагающие роботы, управление, математическое моделирование.

Антропоморфные роботы-андроиды относятся к интенсивно развивающемуся классу роботов. Роботы-андроиды обладают высокой способностью по преодолению препятствий, хорошо адаптированы для функционирования в антропоморфной среде в отличие, например, от роботов на колесной платформе. Для решения задачи синтеза управляемого движения таких роботов достаточно эффективных и универсальных методов не разработано. Данная задача остается актуальной. В работе рассматривается метод решения обратной задачи для формирования программного движения антропоморфного робота AP600 при прямолинейном движении с постоянной скоростью по ровной поверхности.

**Цель исследования** — определение программного движения приводов антропоморфного робота при ходьбе.

Под программным движением подразумевают закономерности согласованного движения приводов робота, представленные в виде функций времени угловых перемещений приводов. Функции времени, описывающие программные движения приводов, зависят от параметров движения шагающих движителей, например длины и высоты шага, и от параметров перемещения корпуса робота.

**Методы исследования** — решение обратной задачи динамики с использованием программного комплекса моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД (<http://frund.vstu.ru>) [1, 2]. Точный учет кинематической схемы робота в расчетной схеме является отличительной особенностью данного подхода от общепринятых методов редукции, приводящих к сильно редуцированным уравнениям с 1–2 степенями свободы.

#### Математическая модель

Для генерации программного движения используется метод обратной задачи [3–10], который сводится к определению движения всех звеньев произвольной механической системы по заданным движениям отдельных точек. Для механической системы произвольной структуры использование этого метода ведет к необходимости построения детальной динамической модели механической системы, которая может быть построена только с использованием специализированных программных пакетов (в англоязычной транскрипции — MBS-программ). Существует большое количество таких программ (как отечественных, так и зарубежных). В данной работе

использовано оригинальное программное обеспечение — ФРУНД (формирование и решение уравнений нелинейной динамики) [11]. Такой выбор связан с необходимостью обеспечить возможность модификации программы для реализации пространственных алгоритмов управления.

В системе моделирования ФРУНД используется представление уравнений динамики связанной системы тел в форме уравнений Лагранжа 1-го рода. Уравнения движения управляемой робототехнической системы записываются в виде

$$\begin{cases} M\ddot{\mathbf{x}} - D^T \mathbf{p} = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t) + \mathbf{u}(t); \\ D\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{h}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  — вектор обобщенных координат всей системы размерностью  $n$ ;

$M$  — матрица инерции;

$\mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t)$  — вектор внешних сил;

$\mathbf{u}(t)$  — вектор управляющих сил, действующих на тела;

$D$  — матрица переменных коэффициентов уравнений связей от кинематических связей размерностью  $k'n$ ;

$\mathbf{h}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x})$  — вектор правых частей уравнений связей;

$\mathbf{p}$  — вектор множителей Лагранжа.

Управление системой сводится к перемещению ее точек по траекториям  $w(t)$ , найденным, например, методами оптимального управления.

Действие управляющих сил  $\mathbf{u}(t)$  в уравнениях движения (1) можно заменить уравнениями связей. Тогда (1) будет иметь вид

$$\begin{cases} M\ddot{\mathbf{x}} - D^T \mathbf{p} - D_w^T \mathbf{p}_w = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t); \\ D\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{h}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}); \\ D_w \ddot{\mathbf{x}} = \ddot{\mathbf{w}}(t), \end{cases} \quad (2)$$

где  $D_w$  — матрица переменных коэффициентов уравнений связей для точек, движение которых задано;

$\ddot{\mathbf{w}}(t)$  — вектор ускорений указанных точек;

$\mathbf{p}_w$  — вектор множителей Лагранжа, соответствующих связям с заданными программными траекториями.

Система (2) эквивалентна (1), но в ней нет неизвестных управляющих воздействий. Следовательно, интегрируя (2), можно получить кинематические параметры программного движения: перемещения, скорости, ускорения тел системы.

При интегрировании (2) полагаем, что число степеней свободы системы  $n$  равно суммарному количеству уравнений связей. В этом случае решение (2) единственно.

Для генерации программных движений с помощью уравнений (1) построена динамическая

модель андроида AR600, в которую включены все звенья и шарниры, их соединяющие (рис. 1).

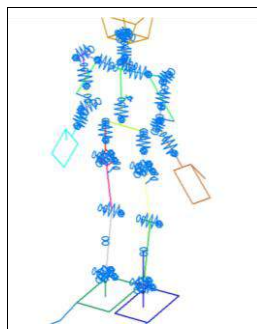


Рис. 1. Расчетная схема робота, кинематические пары и приводы

Для отображения расчетной схемы робота используется упрощенная проволочная геометрия, отражающая положение характерных точек шарниров и центров масс тел. Считается, что оси локальной системы координат каждого тела совпадают с главными центральными осями инерции и матрица инерции тел диагональна. Положение робота, показанное на рис. 1, соответствует начальным условиям. Из этого положения начинается движение робота.

Для определения программного движения робота задают кинематические параметры движения двух групп точек робота. К первой группе относятся точки, задающие движение точек звеньев корпуса. Эти точки определяют направление и скорость перемещения. Для описания программного движения корпуса используют 4 точки (рис. 2). Для точки 1 (первая слева схема рис. 2) задается связь только по направлению  $z$  в неподвижной системе координат, связь считается податливой с коэффициентом жесткости 4 кН/м. Для точки 2 (вторая слева схема рис. 2) задается связь по направлению  $x$  (жесткая) и по направлению  $y$  (податливая, с коэффициентом жесткости 0,9 кН/м). Для точки 3 (третья слева схема рис. 2) задаются связи по направлениям  $x$  и  $y$  (жесткие) и по направлению  $z$  (податливая, с коэффициентом жесткости 10 кН/м). Точка 3 принадлежит звену таза, но лежит по вертикали на уровне стоп. Для точки 4 (четвертая слева схема рис. 2) задается связь по направлению  $x$  (жесткая).

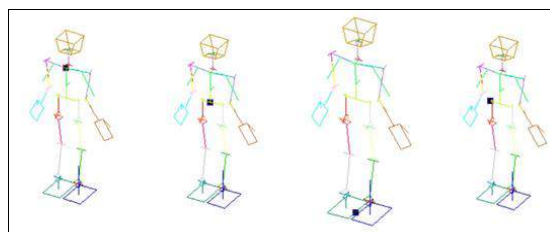


Рис. 2. Точки задания кинематических параметров корпуса

Для заданных связей указанных точек задают кинематические характеристики как функции времени: перемещения, скорости и ускорения по общим параметрам движения (скорости, времени разгона и торможения, времени движения с постоянной скоростью).

Ко второй группе точек, определяющих программное движение робота, относят точки, задающие движение точек стоп. Эти точки определяют перемещение стоп в шаговом движении. Для описания программного движения каждой стопы используют 3 точки (рис. 3). Для точки 1 (первая слева схема рис. 3) задают связи по направлениям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  неподвижной системы координат. Для точек 2 и 3 (вторая и третья слева схемы рис. 3) задают связи по направлению  $z$ . Такое задание кинематических параметров стопы позволяет получить фазу подъема пятки с опорой на носок. Кинематические параметры стопы (перемещения скорости и ускорения) вычисляют по специальному алгоритму, учитывающему пространственный характер движения стопы и параметры движения корпуса.

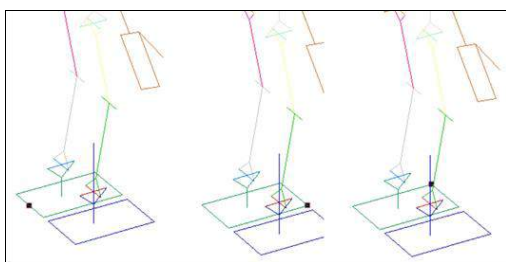


Рис. 3. Точки задания кинематических параметров стопы

На рис. 4 показаны графики задаваемых программных траекторий точки корпуса по трем направлениям.

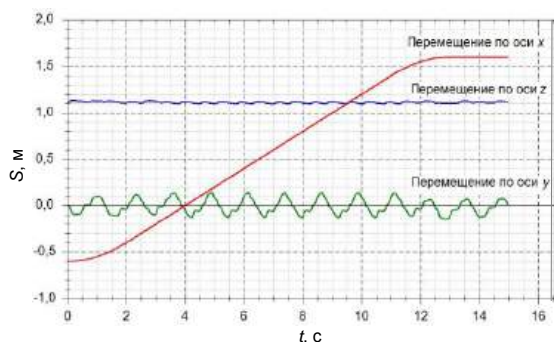


Рис. 4. Программные перемещения точки корпуса

На рис. 5 представлены графики задаваемых программных траекторий точки стопы.

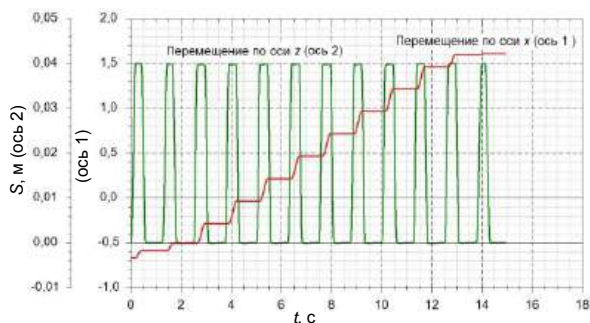


Рис. 5. Программные перемещения точки стопы

### Результаты решения математической модели

Таким образом, динамическая модель робота позволяет генерировать различные типы программных движений, которые зависят от задаваемых кинематических параметров движения корпуса и параметров шагающего движителя (длины шага, высоты подъема стопы, длины и периода шага).

Цель генерации программного движения — это определение законов изменения углов поворота приводов звеньев. Зная программные углы поворота приводов, можно реализовать программное движение на самом роботе с помощью, например, ПИД-регуляторов.

На рис. 6 показаны программные и экспериментальные углы приводов для одного из вариантов расчета и эксперимента.

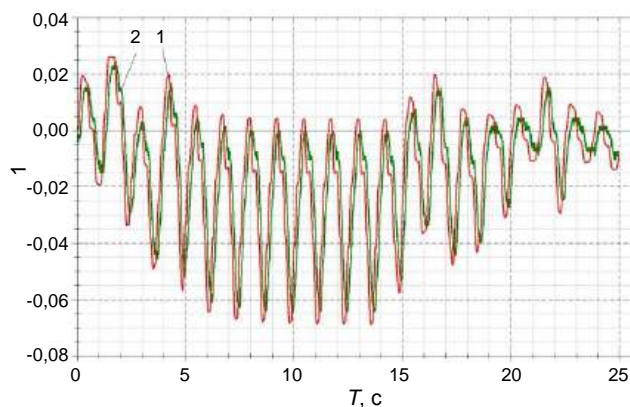


Рис. 6. Углы привода поворота стопы относительно поперечной оси:

1 — программное движение (расчет);  
2 — управляемое движение (эксперимент)

### Заключение

Представленная математическая модель антропоморфного робота позволяет рассчитывать кинематические параметры программного движения приводов для прямолинейного движения корпуса антропоморфного робота с различными скоростями. Модель также позволяет варьировать в широком диапазоне характеристики шага робота (длину, высоту, период). Экспериментальная проверка полученных законов показала достаточно точную воспроизводимость теоретических законов управления.

Использование инвариантного программного обеспечения для решения поставленной задачи позволяет применять такой подход для двуногих шагающих роботов различной конструкции. Созданные методы управления локомоцией двуногих шагающих роботов могут быть использованы также для роботов с различными типами движителей.

## Литература

1. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. — М.: Мир, 1976. — 544 с.
2. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
3. Kim J. Y., Yang U. J. Mechanical design of powered prosthetic leg and walking pattern generation based on motion capture data // *Advanced Robotics*. 2015. V. 29. № 16. P. 1061—1079.
4. Sutyasadi P., Parnichkun M. Gait Tracking Control of Quadruped Robot Using Differential Evolution Based Structure Specified Mixed Sensitivity  $H^\infty$  Robust Control // *J. Control Science and Engineering*. 2016. 18 p.
5. Егунов В. А., Качалов А. Л., Петросян М. К., Тарасов П. С., Янкина Е. В. Development of the insectoid walking robot with inertial navigation system: Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018). February 1—4, 2018, B-CON Plaza, Beppu, Oita, Japan / Editor-in-Chief Masanori Sugisaka; International Steering Committee of International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB), ICAROB society (ALife Robotics Corporations Ltd.), IEEE Fukuoka Section (Japan). — Japan, 2018. P. 54 (Mobile Robotics; OS7-2).
6. Festo's New Bionic Robots Include Rolling Spider, Flying Fox [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/festo-bionic-learning-network-rolling-spider-flying-fox>
7. Горобцов А. С. Синтез параметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. № 6. С. 43—50.
8. Горобцов А. С., Андреев А. Е., Тарасов П. С., Скориков Ан. В., Карцов С. К. Синтез устойчивых квазистатических режимов шагания антропоморфного робота // *Изв. ВолгГТУ. Сер. "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах"*. 2016. № 6 (185). С. 75—76.
9. Kima J. Y., Kimb J. H. Error Analysis and Effective Adjustment of the Walking-Ready Posture for a Biped Humanoid Robot // *Advanced Robotics*. 2010. V. 24. P. 2137—2169.
10. Carla M. A., Pinto J. A., Machado T. Fractional central pattern generators for bipedal locomotion // *Volgograd State Technical University*. 2010. V. 62. № 1—2. P. 27—37.
11. Горобцов А. С., Карцов С. К., Плетнев А. Е., Поляков Ю. А. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей. — М.: Машиностроение, 2011. — 462 с.

## MATHEMATICAL MODEL FOR FINDING SOFTWARE MOTION OF ROBOT ANDROID BY REVERSE TASK METHOD

A. S. Gorobtsov, N. V. Chigirinskaya, M. I. Andreeva, E. A. Smirnov,  
A. M. Bochkin, V. N. Polyakov  
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

*A mathematical model is presented for finding the programmed movement of android robot drives by the inverse problem method. The methods of dynamics of coupled systems of bodies, oriented to a numerical solution, are used. The equations of the inverse problem are written in the form of differential-algebraic equations. The paper presents interpolation functions that uniquely specify the trajectory of the robot body and the trajectories of its feet. The spatial movement of the robot is considered, for the description of which a design scheme is selected that includes all the links of the robot and couples kinematically connecting them.*

**Keywords:** robotics, walking robots, control, computer simulation.

Горобцов Александр Сергеевич, профессор, заведующий кафедрой.  
E-mail: vmp@vstu.ru

Чигиринская Наталья Вячеславовна, профессор.  
E-mail: vmp@vstu.ru

Андреева Марина Израильевна, ст. преподаватель.  
E-mail: vmp@vstu.ru

Смирнов Евгений Анатольевич, доцент.  
E-mail: vmp@vstu.ru

Бочкин Александр Михайлович, доцент.  
E-mail: vmp@vstu.ru

Поляков Виктор Николаевич, доцент.  
E-mail: vmp@vstu.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.



## ОРГАНИЗАЦИЯ ЦЕЛЕУСТРЕМЛЕННОЙ СРЕДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЕДИНИЧНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

А. О. Бутко, канд. техн. наук; П. М. Кузнецов, д-р техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Рассмотрены вопросы организации целенаправленного управления производственной системой в условиях единичного производства. Организация такого управления позволяет обеспечить повышение производительности за счет более полной загрузки технологического оборудования производственной системы. Разработанный подход на основе комплекса оптимизационных подходов при моделировании производственных процессов позволяет в машинном масштабе времени получать рациональные решения загрузки технологического оборудования.*

**Ключевые слова:** моделирование, производственная система, технологическое оборудование, управление, автоматизация, целеустремленная система.

Управление единичным производством представляет собой одну из самых сложных задач технологической подготовки производства. В единичном производстве изготавливается широкая номенклатура изделий. Для их изготовления в производственную систему запускается на выполнение большое количество различных технологических процессов. Запуск каждого технологического процесса сопровождается соответствующей подготовкой производства.

При организации подготовки производства вследствие большого числа технологических процессов, одновременно выполняемых в производственной системе предприятия, приходится учитывать их влияние друг на друга. Причины их взаимного влияния довольно много — это разная трудоемкость их выполнения, различные сроки их выполнения, разный приоритет, наличие соответствующего парка технологического оборудования и т. д.

В этих условиях производственная система представляет собой динамическую систему, функционирующую в режиме постоянного изменения условий функционирования. Это может быть поступление очередного задания на выполнение, окончание выполнения другого задания, прерывание выполнения задания (образование незавершенного производства) и т. д. Кроме того, имеют место события, происходящие в технологической системе производства (выход из строя отдельных единиц технологического оборудования, остановка его согласно техническому регламенту и т. д.).

Актуальной оказывается задача оптимизации процессов управления состоянием производственной системы предприятия в целях повышения производительности выполнения производственных заданий, снижения себестоимости выполнения, уменьшения объема незавершенного производства и т. д. Для решения поставленной задачи требуется организация такой среды управления единичным производством, которая будет обладать поведенческим характером. Такая среда является целеустремленной, т. к. при изменении условий функционирования

производственной системы она стремится управлять состоянием производственной системы так, чтобы система продолжала функционировать в изменившихся условиях максимально эффективно.

Особенность автоматизации процессов управления заключается в цифровизации процессов функционирования производственной системы, выражающейся в разработке математических моделей (ММ). Модели предусматривают систему математических соотношений, описывающих с требуемой точностью элементы производственной системы и процессы их взаимодействия в реальных условиях.

Математические модели элементов производственной системы представляют собой модели большой размерности, в которых должны учитываться ограничения и условия, во многих случаях не поддающиеся прямому аналитическому описанию вследствие их нелинейного характера. Такие модели часто оказываются невозможными представить в виде аналитических моделей. Поэтому при разработке моделей процессов функционирования производственной системы использовалось имитационное моделирование, которое наряду с другими методами представляет собой комплексную процедуру.

При использовании имитационного моделирования применялось прямое описание моделируемых объектов, характеризующееся структурным подобием объекта и его модели. При имитационном моделировании проводился имитационный эксперимент, реализуемый с помощью ЭВМ. При этом ММ отражала поведение моделируемого объекта при заданных воздействиях, меняющихся во времени, внешних воздействиях. Имитационное моделирование (ИМ) осуществлялось путем воспроизведения событий, происходящих одновременно или последовательно в модельном времени. При этом под событием понимался факт изменения любой фазовой переменной. Использование модельного времени позволяет за принципиально короткий промежуток времени получить требуемую информацию.

При построении ИМ были выделены наиболее существенные переменные. Проведена оценка степени их влияния на изменения исследуемых параметров, результаты воздействия различных организационных, управленческих и технико-экономических изменений на показатели функционирования технологического процесса или его элементов, оценке различных решений при поиске оптимальной структуры технологического процесса. В ИМ зависимость выходных параметров от внутренних и внешних воздействий задается неявно в виде алгоритма моделирования, который отражает процессы в системе при наличии внешних воздействий на нее и на выбор рационального управленческого решения. Таким образом, ИМ является алгоритмической поведенческой моделью.

В качестве составных частей имитационной модели использовались аналитические ММ, описывающие отдельные явления в общем процессе функционирования производственной системы. На основе аналитических ММ осуществлялись процедуры оптимизации, посредством которых проводился поиск лучших вариантов управления функционированием производственной системы. Достоинством аналитического моделирования является отсутствие требования значительных объемов вычислительных ресурсов. Часто без постановки специальных вычислительных экспериментов разработчик может оценить характер влияния аргументов на выходные параметры, определить их оптимальные или рациональные значения. В большинстве случаев аналитическое моделирование реализуется в отдельных, частных случаях, сравнительно несложных процессах, имеющих место при технологической подготовке производства.

Одним из методов, используемых при оптимизации аналитических моделей, является линейное программирование. Методы линейного программирования позволяют решать оптимизационные задачи распределения ресурсов и минимизации затрат. Задачи такого рода возникают при планировании загрузки технологического оборудования производственной системы, разработке методов управления и планирования последовательности запуска отдельных составляющих производственного задания.

Задача линейного программирования для исследования производственной системы формулируется следующим образом. Требуется определить экстремум целевой функции переменных  $X = (x_1, \dots, x_n)$ :

$$L(X) = L(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

при следующих ограничениях, наложенных на переменные:

$$\sum_{i=1}^n A_i x_i \leq B, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1, n, \quad j = 1, m,$$

где  $A_i = \begin{pmatrix} a_{1i} \\ \vdots \\ a_{mi} \end{pmatrix}$  —  $i$ -й вектор-столбец условий задачи моделирования;

$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$  — вектор-столбец ограничений задачи моделирования.

Векторы  $A_i$  в совокупности образуют матрицу  $A = \|a_{ji}\|$  условий задачи. Если хотя бы один из коэффициентов  $c_i$  в (1) равен нулю, то целевая функция не ограничена в пространстве  $X$ , поэтому задача о максимуме такой функции без ограничений смысла не имеет.

Другие варианты задач с линейной целевой функцией и линейными условиями могут быть записаны следующим образом.

#### 1. Неравенство

$$\sum_{i=1}^n P_{i,j} x_i \geq d_j,$$

можно привести к стандартной форме, изменив знак обеих его частей:

$$\sum_{i=1}^n (-P_{i,j} x_i) \geq (-d_j),$$

и обозначив  $a_{i,j} = -P_{i,j}$ ,  $b_j = -d_j$  получим:

$$\sum_{i=1}^n a_{i,j} x_i \geq b_j.$$

#### 2. Условие в форме равенства $\sum_{i=1}^n P_{i,j} x_i = d_j$

можно переписать в виде двух неравенств:

$$\sum_{i=1}^n P_{i,j} x_i \geq d_j;$$

$$\sum_{i=1}^n -P_{i,j} x_i \geq -d_j.$$

#### 3. Условие $y_i \geq d_i$ можно, введя замену

$$x_i = y_i - d_i,$$

переписать как

$$X_i \geq 0.$$

Если ограничение двустороннее:

$$d_i \leq y_i \leq L_i,$$

то оно переписывается после соответствующей замены как условие неотрицательности и как неравенство  $x_i \leq d_i - L_i$ , которое можно отнести к уже приведенным условиям.

4. Замена задачи на минимум задачей на максимум производится изменением знака  $L$ .

Сложность решения задач линейного программирования состоит в том, что прямой путь решения — построение системы возможных вариантов и выделение из них оптимального — практически неосуществим с увеличением числа переменных  $x_i$  (с увеличением  $i$ ). В этом случае возникает необходимость выполнения большого количества операций (даже для быстродействующих ЭВМ). Поэтому в каждом конкретном случае необходимо рассматривать возможность применения методов линейного программирования, исходя из размерности задачи.

На начальных этапах технологического проектирования использовался метод динамического программирования. Для каждого производственного задания определялся оптимальный маршрут его передачи по отдельным единицам технологического оборудования без учета влияния других производственных заданий.

На первой операции:

$$T_1 = f(T_1^i);$$

на второй операции:

$$T_2 = f(T_2^i) + T_1;$$

на  $j$ -й операции:

$$T_p = f(T_p^i) + T_{p-1},$$

где  $p$  — количество технологических операций;

$i$  — произвольные числа, причем  $1 \leq i \leq n$ .

Функция

$$R_c(T_1, T_2, \dots, T_p) = \sum_{q=1}^p g(T_q^i)$$

является целевой функцией и определяется длительностью производственного процесса по одной конкретной изготавливаемой детали.

Соответственно функция

$$G_c = g(T_1^i, T_2^i, \dots, T_p^i)$$

является функцией стратегии. Стратегия, максимизирующая функцию  $R$ , является оптимальной. Тогда

$$R_c(T_1, T_2, \dots, T_j) = \sum_{p=1}^j g(T_p).$$

Из принципа оптимальности для любого начального решения  $p = 1$ :

$$g(T_1^i) + [g(T_2^i) + \dots + g(T_p^i)] = g(T_1^i) + F_{j-1}[f(T_1^i)].$$

Отсюда получаем основное рекуррентное соотношение:

$$R_c(T^i) = \min [g(T_1^i) + F_{j-1}f(T_1^i)].$$

Полученное рекуррентное соотношение позволяет из нескольких возможных вариантов выполнения технологического процесса, заданных с помощью структурной модели, выбрать оптимальный согласно целевой функции. Реализация используемых математических методов должна осуществляться средствами автоматизированного комплекса. Автоматизированный комплекс строится в рамках интегрированной программно-аппаратной среды интегральной проектно-производственной системы или как автономное образование соответствующих подразделений на основе интеграции программного обеспечения, технологического обеспечения и средств обеспечения качества технологических процессов и изделий.

Технологическое проектирование предполагает выполнение следующих условий:

- минимальная себестоимость выполняемых технологических процессов;
- рациональное распределение во времени моментов запуска отдельных производственных заданий на выполнение;
- соблюдение заданных сроков выполнения производственных заданий.

Большой объем технологических возможностей производственной системы, превышающий объем требуемых по условиям выполнения производственного задания, позволяет осуществлять формирование различных приемлемых вариантов производственных заданий. Каждый из этих вариантов реализации по-разному использует ресурсы производственной системы. С увеличением объема ресурсов производственной системы сроки выполнения всего объема производственных заданий сокращаются. Оптимальным объемом используемых ресурсов следует считать такой, при котором сроки выполнения производственного задания совпадают с заданными.

В реальных условиях рациональным оказывается использование в производственной системе объема ресурсов, при котором срок выполнения производственного задания оказывается более ранним относительно заданного. В этом случае при возникновении непредвиденных изменений параметров производственной системы и (или) вследствие ограниченной точности используемых ММ исключаются срывы заданных сроков выполнения производственного задания.

Зона рационального распределения ресурсов производственной системы определяется конкретными производственными условиями и вероятностью возникновения случайных событий, влияющих на протекание технологических процессов. В целях снижения влияния случайных факторов на процесс выполнения производственного задания в некоторых случаях оказывается целесообразным формирование группы элементов производственных заданий на основе основного задания (элементы производственных заданий с "короткими" сроками выполнения) и части вспомогательного (элементы производ-

ственных заданий с "длинными" сроками выполнения), требующего выполнения той же технологической операции. Тогда влияние случайных факторов оказывает воздействие на ход выполнения вспомогательных производственных заданий, а основные производственные задания выполняются в расчетные сроки.

Проектирование технологических процессов в этих условиях должно предусматривать влияние других параллельно выполняемых заданий. Проектируемая структура технологического процесса предусматривает частично упорядоченную последовательность технологических установок, обеспечивающих весь процесс изготовления изделия, т. е. порядок обработки поверхностей с указанием соответствующих технологических баз. Процесс структурного синтеза определяется степенью сложности изготавливаемого изделия. Целью такого процесса является получение оптимального технологического маршрута изготовления детали, при котором достигается максимальная производительность (при обеспечении прочих заданных условий, например себестоимость, точность и т. д.).

Частичная упорядоченность предусматривает возможность объединения некоторых установок в одной технологической операции исходя из общности применяемого оборудования, оснастки и схем базирования. В общем случае это синтез структуры технологического процесса, определение состава его элементов, технологических связей между ними (топологии) и средств технической реализации (состав технологического оснащения). Порядок обработки поверхностей устанавливается в результате анализа результатов выполнения различных действий в текущей проектной ситуации, соответствующей конкретной стадии изготовления детали, и определения возможных будущих ситуаций.

На основании полученного порядка обработки поверхностей строится схема технологического процесса и осуществляется анализ соблюдения величин допусков на выполняемые размеры, расчет припусков на обработку (с проверкой соответствия их величин выбранным методам обработки) и операционных размеров. Выбирается технологическое оборудование. При удовлетворительных результатах анализа полученное проектное решение принимается. В противном случае после корректировки исходной гипотезы, например путем введения дополнительной обработки некоторых поверхностей, синтезируется новый вариант структуры. В заключение окончательно формируются технологические операции при объединении соответствующих установок.

Таким образом, процесс выработки варианта проектного решения состоит из последовательных действий по определению взаимоисключающих альтернатив, их оценки и собственно выбора. Задача решается одновременно на двух уровнях: выдвижения гипотезы решения задачи и подтверждения этой гипотезы. Синтез лучше-

го варианта структуры или первого работоспособного варианта осуществляется методом перебора. При этом перебор является не комбинаторным, т. е. не проверяются все возможные альтернативные варианты, а направленным. Это достигается как за счет использования общих знаний проблемной среды, так и за счет использования "внутренней" модели проблемной ситуации. На основании информации, которая содержится в размерноточностных отношениях, конструктивно-геометрических свойствах детали на различных стадиях ее обработки и эвристических методах, осуществляется анализ полученных результатов. На основе проведенного анализа осуществляется исключение заранее неприемлемых вариантов и сужение пространства поиска. При этом решение находится за меньшее число шагов, чем при полном переборе.

Процесс структурного синтеза является многовариантным, что необходимо для оперативной адаптации проектируемого технологического процесса при реализации его в текущей конфигурации свободной части производственной системы. В результате процесса проектирования в качестве результата может иметь место несколько рабочих вариантов одного и того же технологического процесса. Количество таких вариантов зависит от сложности изготавливаемой детали. При проектировании создается очередной вариант одного и того же технологического процесса. Далее происходит проверка на работоспособность этого варианта с помощью целевой функции. В случае несоответствия спроектированного варианта осуществляется его анализ и принимается решение по изменению этого варианта до работоспособного состояния.

В простых случаях, когда изготавливаемая деталь по своей конструкции является достаточно простой, как правило, структура технологического процесса или его элементов (операции, переходы) уже задана. В этом случае используются таблицы применимости. Таким образом, входами модели производственной системы являются параметры производственных заказов. Выходом системы является информация о конфигурации распределения технологических процессов и сроки запуска производственных заказов на выполнение.

### Заключение

В результате проведенной исследовательской работы выяснено, что значительное время при загрузке производственной системы в единичном производстве занимает процесс подготовки производства. Существенным резервом повышения производительности является создание целеустремленной среды для организации управления процессами подготовки производства.

Целеустремленная среда базируется на оптимизационных подходах, носящих поведенческий характер. Оптимизационные процессы реализуются в виде комбинации различных



методов, объединенных ИМ реальной производственной системы предприятия.

В результате эксплуатации системы на предприятии установлено повышение производительности выпуска продукции в 1,3—1,5 раза.

#### Литература

1. Цырков А. В., Кузнецов П. М., Цырков Г. А., Ермохин Е. А., Москвин В. К. Проектно-операционное управление в машиностроительном производстве // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 4. С. 511—522.
2. Кузнецов П. М., Хорошко Л. Л. Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудова-

ования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 10. С. 195—205.

3. Бутко А. О., Кузнецов П. М. Построение информационных моделей в интегрированных системах // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу. 2019. № 3. С. 20—25.

4. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В. и др. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза // Вестник мордовского университета. 2018. Т. 28. № 1. С. 77—84.

5. Kalyakulin S. Y., Kuz'min V. V., Mitin E. V., Sul'din S. P. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems // Russian Engineering Research. 2018. Т. 38. № 12. С. 1049—1052.

6. Ягопольский А. Г., Домнышев А. А., Воронцов Е. А. Проблемы инновационного развития машиностроения России. Инновации и инвестиции. 2019. № 2. С. 7—9.

## ORGANIZATION OF A PURPOSEFUL ENVIRONMENT FOR MANAGING INDIVIDUAL PRODUCTION

A. O. Butko, P. M. Kuznetsov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*The article discusses the organization of targeted management of the production system in a single production environment, the organization of such management allows to increase productivity due to a more complete load of technological equipment of the production system. The developed approach based on a set of optimization approaches in the modeling of production processes allows, on a machine scale, to obtain rational solutions for loading technological equipment.*

**Keywords:** modeling, production system, technological equipment, management, automation, purposeful system.

---

Бутко Антон Олегович, доцент.

E-mail: mati-tias@yandex.ru

Кузнецов Павел Михайлович, профессор.

E-mail: profpol@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2020 г.

УДК 004.4.22:658.512

## МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г. А. Винарская; Г. Д. Волкова, д-р техн. наук  
Государственный технический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

*Представлены результаты исследования и моделирования деятельности управляющей компании в энергетической отрасли. Разработанная многоуровневая модель энергетической системы и ее формальное описание отражают многообразие связей объекта управления и органа управления в энергетике.*

**Ключевые слова:** модель деятельности организации, управляющая компания, энергетическая система, формальное описание объекта управления.

В работе [1] предложена модель, описывающая функционирование Единой энергетической системы Российской Федерации, особенностью которой является иерархическое многоуровневое строение, соответствующее территориально-административному делению. Разработанная модель ввиду наличия разнородных связей, трудно поддающихся систематизации, является сложной для восприятия и не в полной мере отражает особенности функционирования энергосистемы. В связи с этим проведено более детальное исследование каждого уровня модели и разработано более подробное формальное описание модели функционирования энергетической системы.

#### Формальное описание многоуровневой модели энергетической системы страны

Энергетическая система может быть представлена на четырех уровнях организационной сложности. На каждом таком уровне выделяют орган управления (отдельная организация или подразделение) и объект управления (сеть энергетических систем данного уровня) [1].

Государственная федеральная энергетическая система (ГосЭС) на верхнем (0-м) уровне организационной сложности может быть формально представлена как сложная система [2, 3]:

$$E^0 = \langle E_U^0, \overline{E_F^0}, R^0 \rangle, \quad (1)$$

где  $E^0$  — модель государственной энергетической системы (ГосЭС);

$E_U^0$  — орган управления (системный оператор — СО);

$\overline{E_F^0}$  — структура энергетической системы (объект управления);

$R^0$  — множество связей (различных типов) между органом управления (СО) и объектом управления.

Структура энергетической системы 0-го уровня может быть формально описана:

$$\overline{E_F^0} = \left( \widetilde{E_F^0}, R_F^0 \right), \quad (2)$$

где  $\widetilde{E_F^0} = \{E_F^{0-k}\}$  — множество окружных энергетических систем (ОЭС), входящих в состав ГосЭС;

$R_F^0 \subset \widetilde{E_F^0} \times \widetilde{E_F^0}$  — множество связей (различных типов) между ОЭС.

Рассмотрим ОЭС как сложную систему следующего (1-го) уровня организационной сложности:

$$E^{1k} = E_F^{0-k}, \quad (3)$$

$$E^{1k} = \langle E_U^{1k}, \overline{E_F^{1k}}, R^{1k} \rangle, \quad (4)$$

где  $E^{1k}$  — модель  $k$ -й ОЭС;

$E_U^{1k}$  — орган управления (окружное диспетчерское управление — ОДУ)  $k$ -й ОЭС;

$\overline{E_F^{1k}}$  — структура энергетической системы 1-го уровня;

$R^{1k}$  — множество связей (различных типов) между органом управления (ОДУ) и объектом управления.

Структура энергетической системы 1-го уровня имеет формальное описание:

$$\overline{E_F^{1k}} = \left( \widetilde{E_F^{1k}}, R_F^{1k} \right), \quad (5)$$

где  $\widetilde{E_F^{1k}} = \{E_F^{1k-l}\}$  — множество региональных энергетических систем (РЭС), входящих в состав  $k$ -й ОЭС;

$R_F^{1k} \subset \widetilde{E_F^{1k}} \times \widetilde{E_F^{1k}}$  — множество связей (различных типов) между РЭС.

Далее опишем РЭС как сложную систему следующего (2-го) уровня организационной сложности:

$$E^{2kl} = E_F^{1k-l}, \quad (6)$$

$$E^{2kl} = \langle E_U^{2kl}, \overline{E_F^{2kl}}, R^{2kl} \rangle, \quad (7)$$

где  $E^{2kl}$  — модель  $l$ -й РЭС в рамках  $k$ -й ОЭС;

$E_U^{2kl}$  — орган управления (региональное диспетчерское управление — РДУ)  $l$ -й РЭС в рамках  $k$ -й ОЭС;

$\overline{E_F^{2kl}}$  — структура энергетической системы 2-го уровня;

$R^{2kl}$  — множество связей (различных типов) между органом управления (РДУ) и объектом управления.

Структура энергетической системы 2-го уровня может быть формально описана:

$$\overline{E_F^{2kl}} = \left( \overline{E_F^{2kl}}, R_F^{2kl} \right), \quad (8)$$

где  $\overline{E_F^{2kl}} = \{E_F^{2kl-m}\}$  — множество субъектов энергетики (СЭ);

$R_F^{2kl} \subset \overline{E_F^{2kl}} \times \overline{E_F^{2kl}}$  — множество связей (различных типов) между ними.

На следующем (3-м) уровне организационной сложности опишем субъект энергетики как сложную систему:

$$E^{3klm} = E_F^{2kl-m}, \quad (9)$$

$$E^{3klm} = \langle E_U^{3klm}, \overline{E_F^{3klm}}, R^{3klm} \rangle, \quad (10)$$

где  $E^{3klm}$  — модель  $m$ -го СЭ  $l$ -й РЭС в рамках  $k$ -й ОЭС;

$E_U^{3klm}$  — орган управления (подразделение субъекта энергетики)  $m$ -го СЭ  $l$ -й РЭС в рамках  $k$ -й ОЭС;

$\overline{E_F^{3klm}}$  — структура энергетической системы 3-го уровня;

$R^{3klm}$  — множество связей (различных типов) между органом управления и объектом управления.

Структура энергетической системы 3-го уровня может быть формально описана:

$$\overline{E_F^{3klm}} = \left( \overline{E_F^{3klm}}, R_F^{3klm} \right), \quad (11)$$

где  $\overline{E_F^{3klm}} = \{E_F^{3klm-s}\}$  — множество объектов энергетики;

$R_F^{3klm} \subset \overline{E_F^{3klm}} \times \overline{E_F^{3klm}}$  — множество связей (различных типов) между ними.

Таким образом, получено формальное описание многоуровневой модели энергетической системы, отражающее взаимодействие всех ее составных частей.

#### Классификация связей в многоуровневой модели энергетической системы

В формальном описании модели энергетической системы выделяют два класса связей на каждом уровне организационной сложности: между объектом управления и органом управления; между частями объекта управления различных типов.

Проведенный анализ связей позволил сформировать классификацию их по типам и для каждого уровня организационной сложности построить матрицы связей между сегментами энергетической системы.

Из формулы (1) для 0-го уровня сложности разработана укрупненная матрица связей  $R^0$ , представленная в табл. 1.

Таблица 1

Укрупненная матрица 0-го уровня для  $R^0$ 

$R^0$	$E_U^0$	$\overline{E_F^0}$
$E_U^0$	$R_{UU}^0$	$R_{UF}^0$
$\overline{E_F^0}$	$R_{FU}^0$	$R_{FF}^0$

В матрице диагональные элементы определяют связи внутри, соответственно, органа управления (СО) и объекта управления (ГосЭС) как целостной системы. Связь в строке ( $R_{UF}^0$ ) обозначает управленческое воздействие от СО к ГосЭС. Связи в столбце ( $R_{FU}^0$ ) — информация о состоянии ГосЭС для СО.

С учетом раскрытия ГосЭС как совокупности окружающих энергетических систем детальная матрица связей  $R^0$  приобретает вид табл. 2.

Таблица 2

Детальная матрица 0-го уровня для  $R^0$ 

$R^0$	$E_U^0$	$E_F^{0-1}$	...	$E_F^{0-k}$
$E_U^0$	$R_{UU}^0$	$R_{UF}^{0-1}$	...	$R_{UF}^{0-k}$
$E_F^{0-1}$	$R_{FU}^{0-1}$	$R_{FF}^{0-1}$	—	—
...	...	—	...	—
$E_F^{0-k}$	$R_{FU}^{0-k}$	—	—	$R_{FF}^{0-k}$

Диагональные элементы по-прежнему определяют внутренние связи соответствующих сегментов энергетической системы. Первая строка определяет управленческие воздействия  $R_{UF}^{0-k}$  от СО ко всем окружающим энергетическим системам. Первый столбец определяет информацию  $R_{FU}^{0-k}$ , поступающую к СО от каждой окружающей энергетической системы.

Объект управления и совокупность энергетических систем соответствующего уровня взаимодействуют между собой с помощью различных связей. В ходе исследования выделены три основных типа связей: пространственные, производственные, информационно-технологические. Пространственные связи возникают в случае наличия географической границы между зонами ответственности энергетических систем одного уровня. Производственные связи определяют наличие транспортных коридоров на границе зон ответственности систем одного уровня. Информационно-технологические связи возникают при наличии линий передачи информации, а также технологического оборудования для обеспечения такой передачи.

Связи между частями объекта управления различных типов  $t$  для 0-го уровня также могут быть представлены совокупностью матриц (табл. 3).

Таблица 3

Матрица связей  $t$ -го типа 0-го уровня  
для объекта управления  $R_F^0(t)$

$R_F^0(t)$	$E_F^{0-1}$	...	$E_F^{0-k}$
$E_F^{0-1}$	$R_{FF}^{0-1:1}(t)$	...	$R_{FF}^{0-1:k}(t)$
...	...	...	...
$E_F^{0-k}$	$R_{FF}^{0-k:1}(t)$	...	$R_{FF}^{0-k:k}(t)$

При этом тип связи  $t$  может принимать значения пространственные, производственные, информационно-технологические и т. д.

Элемент матрицы  $R_{FF}^{0-i:j}(t)$  определяет  $t$ -ю связь между  $i$ -м и  $j$ -м сегментами энергетической системы (ОЭС) в рамках энергетического комплекса страны.

Обобщив все уровни организационной сложности, получим следующий набор матриц, отражающих взаимодействие как органов и объектов управления, так и сегментов энергетических систем.

Для  $i$ -го уровня сложности укрупненная матрица связей  $R^{ix}$  представлена в табл. 4 (индекс  $i$  соответствует уровню организационной сложности, индекс  $x$  отражает "родословную" выделенного сегмента энергетической системы в многоуровневой структуре).

Таблица 4

Укрупненная матрица  $i$ -го уровня для  $R^{ix}$

$R^{ix}$	$E_U^{ix}$	$\overline{E_F^{ix}}$
$E_U^{ix}$	$R_{UU}^{ix}$	$R_{UF}^{ix}$
$\overline{E_F^{ix}}$	$R_{FU}^{ix}$	$R_{FF}^{ix}$

В матрице диагональные элементы определяют связи внутри, соответственно, органа управления и объекта управления как целостной системы. Связь в строке  $R_{FU}^{ix}$  обозначает управленческое воздействие от органа управления к объекту управления. Связи в столбце  $R_{FU}^{ix}$  — это информация о состоянии объекта управления для органа управления. Многообразие укрупненных матриц  $i$ -го уровня определяется разнообразием (количеством) индекса  $x$ .

С учетом раскрытия объекта управления как совокупности энергетических систем на  $i$ -м уровне организационной сложности детальная матрица связей  $R^{ix}$  приобретает вид табл. 5.

Таблица 5

Детальная матрица  $i$ -го уровня для  $R^{ix}$

$R^{ix}$	$E_U^{ix}$	$E_F^{ix-1}$	...	$E_F^{ix-k}$
$E_U^{ix}$	$R_{UU}^{ix}$	$R_{UF}^{ix-1}$	...	$R_{UF}^{ix-k}$
$E_F^{ix-1}$	$R_{FU}^{ix-1}$	$R_{FF}^{ix-1}$	—	—
...	...	—	...	—
$E_F^{ix-k}$	$R_{FU}^{ix-k}$	—	—	$R_{FF}^{ix-k}$

Диагональные элементы по-прежнему определяют внутренние связи соответствующих сегментов энергетической системы. Первая строка определяет управленческие воздействия  $R_{UF}^{ix-k}$  от органа управления ко всем энергетическим системам на данном уровне организационной сложности. Первый столбец определяет информацию  $R_{FU}^{ix-k}$ , поступающую к органу управления от каждой энергетической системы данного уровня.

Многообразие детальных матриц  $i$ -го уровня также определяется разнообразием (количеством) индекса  $x$ .

Связи между частями объекта управления различных типов  $t$  для  $i$ -го уровня также могут быть представлены совокупностью матриц вида, представленного в табл. 6.

Таблица 6

Матрица связей  $t$ -го типа  $i$ -го уровня  
для объекта управления  $R_F^{ix}(t)$

$R_F^{ix}(t)$	$E_F^{ix-1}$	...	$E_F^{ix-k}$
$E_F^{ix-1}$	$R_{FF}^{ix-1:1}(t)$	...	$R_{FF}^{ix-1:k}(t)$
...	...	...	...
$E_F^{ix-k}$	$R_{FF}^{ix-k:1}(t)$	...	$R_{FF}^{ix-k:k}(t)$

При этом элемент матрицы  $R_{FF}^{ix-l:j}(t)$  определяет  $t$ -ю связь между  $l$ -м и  $j$ -м сегментами в рамках выделенной ( $x$ ) энергетической системы  $i$ -го уровня сложности.

Таким образом, разработанное формальное описание многоуровневой модели энергетического комплекса страны позволяет выявлять, фиксировать и обобщать все многообразие связей и взаимодействий как с точки зрения управления энергетическим комплексом, так и с точки зрения взаимодействия его сегментов на всех уровнях организационной сложности.

#### Модель взаимодействия сегментов энергетической системы на региональном уровне

Разработанное формальное описание многоуровневой модели энергетической системы и матричное представление многообразия взаимосвязей сегментов энергетического комплекса позволили уточнить табл. 1 в работе [1], которая определяла и классифицировала множество связей регионального диспетчерского управления.

Сформированная обновленная матрица взаимодействия сегментов единой энергосистемы РФ (табл. 7) представляет не только непосредственное указание на наличие связей, но и тип этих связей (исходя из разработанной классификации связей).



Таблица 7

Описание связей сегментов энергетической системы

Ур. 0	ГосЭС	СО	{ОЭС <sub>i</sub> }						
Ур. 1			ОЭС <sub>i</sub>	ОДУ <sub>i</sub>	{РЭС <sub>ij</sub> }				
Ур. 2					РЭС <sub>ij</sub>	РДУ <sub>ij</sub>	{СЭ <sub>k</sub> <sup>ij</sup> }		
Ур. 3							СЭ <sub>k</sub> <sup>ij</sup>	УП <sub>k</sub> <sup>ij</sup>	{ОЭ <sub>k</sub> <sup>ijk</sup> }
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	X	1.2	1.3	—	—	—	—		
2	2.1	X	—	2.4	—	—	—		
3	3.1	—	X	3.4	3.5	—	—		
4	—	4.2	4.3	X	—	4.6	—		
5	—	—	5.3	—	X	5.6	5.7		
6	—	—	—	6.4	6.5	X	6.7	6.8	6.9
7	—	—	—	—	7.5	7.6	X	7.8	7.9
8						8.6	8.7	X	8.9
9						9.6	9.7	9.8	X

По диагонали в табл. 7 описаны внутренние связи и связи управляющих органов и объектов управления. Видно, что помимо связей органов управления и объектов существуют связи между органами управления различных уровней и связи между объектами управления различных уровней.

Полужирным шрифтом выделены ячейки связей РДУ. Связи РДУ обширны. Это обусловлено тем, что в своем функционировании РДУ консолидирует информационно-технологические связи от своих объектов управления для передачи сжатой информации выше по иерархии, а управленческое воздействие (от ОДУ) распределяет информацию по всем объектам равномерно. Такими действиями РДУ регулирует входящие и исходящие информационные потоки, контролирует их однородность, а в случае возникновения непредвиденных ситуаций перераспределяет потоки информации для восстановления баланса потоков.

### Заключение

Благодаря проведенным исследованиям разработано формальное описание функционирования

энергетической системы на каждом уровне организационной сложности, описаны и классифицированы связи органов управления и объектов управления на каждом уровне системы, выявлены особенности функционирования каждого элемента, сформирована обновленная матрица взаимодействия всех сегментов модели энергетической системы с описанием их связей. Также выявлена особая роль органа управления 2-го уровня, который имеет больше связей по сравнению с остальными сегментами энергетики, это обусловлено тем, что РДУ осуществляет контроль и управление балансом потоков информации как от органов управления к объектам управления, так и наоборот.

### Литература

1. Винарская Г. А., Волкова Г. Д., Тюрбева Т. Б. Разработка модели деятельности управляющей компании в энергетическом комплексе // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 4 (176). С. 15—19.
2. Волкова Г. Д. Методология автоматизации интеллектуального труда. — М.: Янус-К, 2013. — 102 с.
3. Волкова Г. Д. Концептуальное моделирование проектных задач: учеб. пособие. — М.: ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", 2015. — 117 с.

## TIERED MODELING OF ENERGY SYSTEMS

G. A. Vinarskaya, G. D. Volkova  
MSTU of "STANKIN", Moscow, Russia

*The work presents the results of research and modeling of the management company's activities in the energy industry. The developed multi-level model of the energy system and its formal description reflects the diversity of links between the object of control and the control in the energy sector.*

**Keywords:** model of activity of the organization, management company, power system, formal description of an object of management.

Винарская Галина Александровна, аспирант.  
E-mail: itvs@list.ru

Волкова Галина Дмитриевна, заведующая кафедрой.  
E-mail: cog-par@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2020 г.

УДК 681.5:004

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ САПР НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ

В. Б. Кондусова, канд. эконом. наук; А. И. Сердюк, д-р техн. наук;

Д. В. Кондусов; А. И. Сергеев, д-р техн. наук

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

*Представлен генезис автоматизации процесса эксплуатации в непосредственной взаимосвязи с этапами проектирования и производства, рассмотрены вопросы информационной поддержки изделий на протяжении жизненного цикла и аппарат CALS-технологий. Представлена авторская методология информационной поддержки жизненного цикла наукоемких изделий.*

**Ключевые слова:** САПР, информационная поддержка, PLM, жизненный цикл, контракт жизненного цикла, коэффициент готовности, изготовитель, потребитель, воздушное судно.

В условиях технического перевооружения и импортозамещения одним из направлений стратегического развития отраслей отечественного машиностроения является интеграция систем автоматизированного проектирования (САПР) в общую архитектуру автоматизированной среды информационной поддержки жизненного цикла (ЖЦ) наукоемких изделий.

Примерами наукоемких изделий могут служить изделия судно-, ракето-, авиастроения и других отраслей машиностроения военного и гражданского назначения.

Информационная поддержка ЖЦ наукоемких изделий, включающая этапы проектирования, производства, эксплуатации, рассматриваемая как информационное взаимодействие изготовителя и потребителя, является средством повышения эффективности функционирования САПР и позволяет выявить резервы экономии затрат.

Перспективным направлением интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной среды информационной поддержки ЖЦ наукоемких изделий, которое активно применяется в мировой практике и позволяет обеспечить высокий уровень готовности сложной техники, является интегрированная логистическая поддержка (ИЛП) ЖЦ наукоемких изделий. Одним из инструментов ИЛП служит система контрактации, которая представлена в РФ ФЗ № 44 "О контрактной системе в сфере закупок работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" и ФЗ № 275 "О государственном оборонном заказе", а в США — "Правилами закупок для федеральных нужд" (FAR). Данные контракты регулируют взаимодействие изготовителя и потребителя на этапах проектирования и производства до момента передачи изделия потребителю, не охватывая этап эксплуатации.

Вследствие этого разработка методологии автоматизации процессов реализации жизненного цикла проектирование—производство—эксплуатация, обеспечивающей интеграцию САПР в общую архитектуру автоматизированной среды, служащей средством информационного взаимо-

действия изготовителя и потребителя наукоемких изделий, рассматривается как актуальная научная проблема, решение которой имеет важное значение для экономики России.

О теории и практике информационного сопровождения изделия в производстве и эксплуатации изложено в [1, 2].

Рассмотрены и проанализированы масштабы государственного рынка и контрактного механизма военно-промышленного комплекса США, основополагающие правовые и организационные принципы федеральной контрактной системы в [3]. Труды посвящены также анализу в области организации, управления оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России, созданию систем вооружения и ресурсного обеспечения нужд обороны и безопасности государства.

Вопросы проектирования и комплексной автоматизации непосредственно производственных систем, в том числе гибких производственных систем, рассмотрены в [4]; математическому моделированию и проектированию гибких производственных систем на этапе раннего проектирования и этапах проектирования и производства посвящена работа [5].

В работах в [6, 7] рассмотрены вопросы стратегии, концепции и принципов CALS, особенности применения и специфика использования CALS-технологий в ЖЦ наукоемкой продукции.

Работы [8, 9] посвящены созданию наукоемкой продукции с помощью кооперации и информационных технологий, технологий управления данными об изделии в течение его ЖЦ, а также рассмотрено автоматизированное проектирование и конструирование, управление конструкторскими и технологическими данными при разработке полного электронного описания изделий, моделирование сложных систем и комплексов, математическое моделирование и оптимизация проектных решений.

Работы авторов М. А. Погосяна, Г. В. Львова, А. А. Медведева посвящены электронному представлению наукоемких изделий. Рассматриваются вопросы представления электронной модели, электронного и компьютерного моделирования.

Конструкторско-технологическая подготовка и организация производства наукоемкой техники в условиях использования CALS-технологий рассмотрены в работах В. А. Братухина, М. А. Погосяна, А. А. Вепрева, А. В. Сергунова, А. А. Ключерева, А. И. Пекарш, А. А. Кулешова, Л. А. Опарина, Lian Dawei, Zhao Xuefeng, Beata Grzy, Agata Siemaszko. Работы охватывают автоматизацию технологической подготовки производства, планирование ресурсов предприятия, информационное обеспечение конструкторско-технологических решений, современные технологии агрегатно-сборочного производства, управление качеством на всех этапах ЖЦ [10].

Логистическое обеспечение, эксплуатация и техническое обслуживание наукоемкой техники, информационная система интегрированной логистической поддержки машиностроительной продукции, интерактивные электронные технические руководства, информационное и нормативное обеспечение послепродажного обслуживания наукоемкой продукции описаны в трудах [11, 12].

Вместе с тем научно-методологические обоснования исследований ученых в литературе не содержат описания процесса интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной среды как средства информационного взаимодействия изготовителей и потребителей наукоемких изделий на протяжении ЖЦ во взаимосвязи этапов проектирования, производства, эксплуатации.

Средства автоматизации процессов взаимодействия с изготовителем и потребителем наукоемких изделий на протяжении ЖЦ на предприятиях машиностроительного комплекса страны практически отсутствуют.

Информационных и технических проблем для интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной среды и создания инструментов по взаимодействию с изготовителем и потребителем изделий нет. Однако методология их создания на этапах жизненного цикла не может считаться отработанной, так как этап эксплуатации остается неохваченным.

Скоординированная реализация всех видов деятельности изготовителя и потребителя изделий на протяжении ЖЦ обеспечивается ИЛП в едином информационном пространстве, основной целью которой является минимизация стоимости ЖЦ изделия при обязательном обеспечении требований заданного уровня технических показателей.

В конечном итоге должна быть сформирована модель ЖЦ изделия, включающая этапы проектирования, производства и эксплуатации, а также базу нормативных и оперативных данных, используемую для обеспечения информационного взаимодействия изготовителя и потре-

бителя как средства повышения эффективности функционирования САПР.

Эффективность функционирования САПР обеспечивается сбором, структурированием, хранением, передачей и использованием данных о конструкции, технологии изготовления и эксплуатации изделия, о требуемых ресурсах для осуществления производственных процессов. В PLM эти задачи решает PDM-система, строящаяся на основе стандартизированной объектной модели данных.

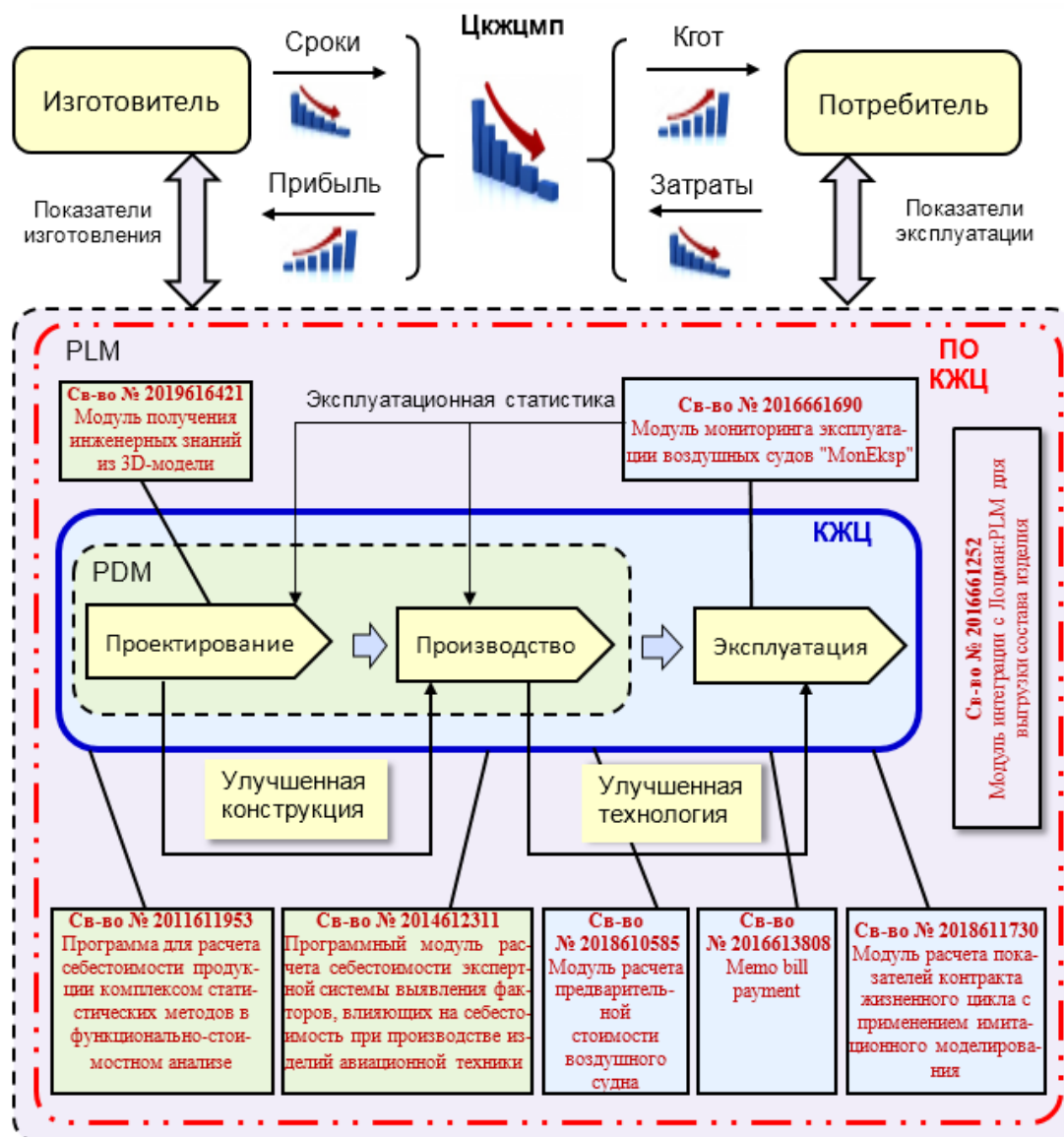
Взаимодействие изготовителя и потребителя заключается в обмене информацией, ее совместной обработке, управлении поставками материальных и информационных ресурсов.

Средством регулирования процессов реализации жизненного цикла проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий выступает контракт жизненного цикла (КЖЦ) как механизм, обеспечивающий и разграничивающий степень ответственности изготовителя за те затраты, которые он несет при выполнении заказа, за достижение тактико-технических или иных показателей конечного изделия, а также за соблюдение договорных сроков поставки.

Установлено, что уровень развития поддержки жизненного цикла наукоемких изделий при взаимодействии изготовителя и потребителя предполагает использование в качестве предмета отношений не само изделие как объект, а достижение им определенного уровня технико-тактических показателей, коэффициента готовности, временных характеристик (время поставки изделия, время поставки материально-технического обеспечения (МТО) и т. д.), что существенно отражается на этапах проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий.

Совокупность разработанных методов и средств как методология автоматизации процессов реализации жизненного цикла проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий в рамках организационно-технической системы PLM, отличающаяся гарантируемым обеспечением требуемого уровня коэффициента готовности наукоемких изделий посредством интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной среды информационной поддержки жизненного цикла изделий представлена на рисунке.

Многовариантность и постоянная модернизация проектных, технологических и эксплуатационных решений делает задачу разработки модели оценки эффективности жизненного цикла наукоемких изделий как инструмента взаимодействия между изготовителем и потребителем на этапах проектирования, производства и эксплуатации ЖЦ многокритериальной.



*Методология автоматизации процессов реализации жизненного цикла проектирования, производства и эксплуатации*

Разработана концепция единого инструментария, учитывающего эффективность технических и стоимостных характеристик на этапах проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий. Реализация данного инструментария позволяет обеспечить достижение требуемого уровня коэффициента готовности на этапе эксплуатации и снижение стоимости ЖЦ наукоемких изделий посредством улучшения конструкторских и технологических параметров на этапах проектирования и производства, соответственно.

Разработанная методология учитывает зависимость дополнительной прибыли от затрат на проектирование и производство, обосновывающую стимулирование затрат при симметричных и асимметричных пропорциях долевого участия в условиях риск-разделенного партнерства [13], включает математическую модель оценки эффективности жизненного цикла наукоемких из-

делий в виде КЖЦ, этапов проектирования, производства и эксплуатации. На этапах проектирования и производства данная модель позволяет учитывать планируемые затраты, (в том числе допустимые и согласованные), планируемые сроки поставки изделия, планируемые значения технических показателей к моменту поставки, на этапе эксплуатации — коэффициент готовности изделия и затраты, обеспечивающие его необходимый уровень, срок поставки МТО и время технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Предложенная модель учитывает такие параметры, как затраты времени и денежных средств на простой изделия в ожидании поставки МТО, нахождение наукоемких изделий на ТОиР, выявление неисправностей (неплановое ТОиР), нахождение в процессе выполнения работы.

Применение разработанной модели обеспечивает риск-разделение ответственности изгото-



теля и потребителя на этапах проектирования, производства и эксплуатации ЖЦ наукоемких изделий.

Методология основана на разработанном алгоритме взаимодействия изготовителя и потребителя наукоемких изделий в рамках КЖЦ с риск-разделенным партнерством, представленным видами, параметрами и определением стоимости КЖЦ, разделением риска в зависимости от вида модели КЖЦ, вариантами дополнительной прибыли/штрафа изготовителя и экономии/перерасхода потребителя, позволяющем эффективно взаимодействовать участникам процесса проектирования, производства и эксплуатации [14].

Разработанный алгоритм позволил выявить необходимый и достаточный набор эксплуатационных параметров, выбор значений которых на этапах проектирования и производства предопределяет эффективность автоматизированного взаимодействия изготовителя и потребителя.

Эффективность функционирования САПР оценена посредством имитационного моделирования. Разработанная методология автоматизации процессов реализации ЖЦ проектирования, производства и эксплуатации наукоемких изделий позволяет обеспечить эффективность взаимодействия изготовителя и потребителя наукоемких изделий, демонстрируя снижение стоимости ЖЦ на 8,81 % и повышение уровня коэффициента готовности на 5,5 % на этапе эксплуатации [15].

Авторская методология включает разработанную систему моделей и алгоритмов мониторинга ЖЦ наукоемких изделий. Модели представлены математическим описанием функции входных параметров, отражающим совокупность проектных, производственных и эксплуатационных решений. Алгоритмы процесса мониторинга ЖЦ наукоемких изделий позволяют выявить механизм партнерства изготовителя и потребителя наукоемких изделий, включая разработанную организационно-техническую систему мониторинга ЖЦ [16].

Разработанные математические и алгоритмические модели реализованы в восьми программах средств, зарегистрированных в Роспатенте. Программы могут объединяться в интегрированный комплекс, с помощью которого подтверждена корректность предложенной методологии исследования.

Сформированная концепция КЖЦ наукоемких изделий обеспечивает выявление резервов снижения себестоимости для потребителя и увеличения прибыли изготовителя, связанных с рациональным использованием материалов, сроков поставок МТО, с усовершенствованием конструкции наукоемких изделий или производственного процесса.

Комплексность полученных результатов следует рассматривать как новую методологию ав-

томатизации процессов реализации ЖЦ проектирования, производства и эксплуатации.

### Литература

1. Судов Е. В., Левин А. И., Петров А. Н., Петров А. В., Бороздин Д. Н. Анализ логистической поддержки: теория и практика. — М.: ООО "Изд-во ИнформБюро", 2014. — 260 с.
2. Кривошеев И. А., Орлов Д. В., Субхангулов А. А. Послеспродажное обслуживание ГТД с использованием инструментария интегрированной логистической поддержки // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. № 1 (16). С. 83—87.
3. Федорович В. А., Муравник В. Б., Бочкарев О. И. США: военная экономика (организация и управление) / под общ. ред. Золоторева П. С. и Роговского Е. А. — М.: Междунар. отношения, 2013. — 616 с.
4. Соколенцев Ю. М., Медведев В. А., Вороненко В. П., Брюханов В. Н. и др. Технологические основы гибких производственных систем / под ред. Соколенцева Ю. М. Изд. 2-е испр. — М.: Высш. шк., 2000. — 255 с.
5. Сердюк А. И., Сергеев А. И. Метод циклограмм в построении компьютерных моделей ГПС // Автоматизация. Современные технологии. 2005. № 11. С. 17.
6. Демченко О. Ф., Долженков Н. Н., Злыгарев В. А., Су-ров В. И. Особенности жизненного цикла авиационной техники: Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / гл. ред. Братухин А. Г. — М.: ОАО "НИЦ АСК", 2008. С. 75—81.
7. Mas F., Arista R., Oliva M., Hiebert B., Gilkerson I., Rios J. A review of PLM impact on US and EU Aerospace Industry // Procedia Engineering. 2015. № 132. P. 1053—1060.
8. Позосян М. А., Львова Г. В. Полное электронное описание изделия SSJ 100: Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / гл. ред. Братухин А. Г. — М.: ОАО "НИЦ АСК", 2008. С. 223—235.
9. Arie Wibowo, Benny Tjahjono, Tetsuo Tomiyama. Designing Contracts for Aero-Engine MRO Service Providers: Models and Simulation // Procedia CIRP. 2017. № 59. P. 246—251.
10. Lian Dawei, Zhao Xuefeng Research on the Application of Life Cycle Cost Management in the Civil Aircraft Assembly Line Project // Physics Procedia. 2012. № 25. P. 443—451.
11. Венев А. А., Григорьев С. И., Кулаков В. Г., Заматицков А. М. Интегрированная логистическая поддержка. Применение дисциплин ИЛП в Корпорации "Иркут": Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / гл. ред. Братухин А. Г. — М.: ОАО "НИЦ АСК", 2008. С. 536—537.
12. Ettore Settanni, Linda B. Newnes, Nils E. Thenent, Glenn Parry, Yee Mey Goh. A through-life costing methodology for use in product-service-systems // Int. J. Production Economics. 2014. № 153. P. 161—177.
13. Kuznetsova V. B., Serdyuk A. I., Kondusov D. V., Sergeev A. I. Contract model with risk sharing in integrated logistical product support // Russian Engineering Research. 2018. V. 38. № 8. P. 614—616, DOI: 10.3103/S1068798X18080099
14. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В., Сергеев А. И., Сердюк А. И. Контракты жизненного цикла наукоемких изделий как средство информационного взаимодействия изготовителя и потребителя // Автоматизация в промышленности. 2019. № 10. С. 56—59.
15. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Разработка имитационной модели жизненного цикла сложных изделий машиностроения с длительным сроком эксплуатации на основе применения контракта жизненного цикла // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2. С. 30—34.
16. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В., Сердюк А. И., Сергеев А. И. Система моделей и алгоритмов мониторинга автоматизированного взаимодействия изготовителя с потребителем изделий высокотехнологичных отраслей промышленности на основе переиспользования инженерных знаний // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 3 (143). С. 54—58.

---

## IMPROVING THE FUNCTIONING OF CAD BASED ON THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE INFORMATION SUPPORT OF THE LIFE CYCLE OF HIGH TECHNOLOGY PRODUCTS

V. B. Kondusova, A. I. Serduk, D. V. Kondusov, A. I. Sergeev  
Orenburg State University, Orenburg, Russia

*The article presents the genesis of automation of the operation process in direct connection with the stages of design and production, addresses issues of information support for products throughout the life cycle and the apparatus of CALS-technologies. The author's methodology of information support for the life cycle of high technology products is presented.*

**Keywords:** CAD, information support, PLM, life cycle, life cycle contract, availability factor, manufacturer, consumer, aircraft.

---

**Кондусова Валентина Борисовна**, доцент.

E-mail: valyosha@list.ru

**Сердюк Анатолий Иванович**, профессор.

E-mail: sap@mail.osu.ru

**Кондусов Дмитрий Викторович**, аспирант.

E-mail: kdimka@list.ru

**Сергеев Александр Иванович**, профессор.

E-mail: alexandr\_sergeew@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.*

УДК 621.314

## УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

С. В. Федоров, канд. техн. наук

Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Кумертау, Россия

*Дано описание устройства формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя частоты для системы управления электроприводом, построенного по принципу широтно-импульсной модуляции. Произведен анализ качества управляющего сигнала для системы частотного управления электроприводом. Указаны основные недостатки использования широтно-импульсной модуляции в системах управления матричными преобразователями частоты.*

**Ключевые слова:** широтно-импульсная модуляция, система управления электроприводом, коэффициент гармоник.

При проектировании систем управления преобразователя частоты для частотного управления электроприводом наиболее значимым критерием является качество выходного сигнала для системы частотного управления электроприводом. В целях улучшения гармонического состава выходного сигнала для системы частотного управления электроприводом (управляющего сигнала) в преобразователях вносят изменения в силовую часть либо в ее систему управления, либо изменяют обе части преобразователя.

Одним из алгоритмов является применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Цель данной работы — анализ влияния структуры устройства формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя для системы частотного управления электроприводом, построенного по принципу ШИМ, на качество управляющего сигнала электропривода.

### Описание устройства формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя для системы частотного управления электроприводом, построенного по принципу ШИМ

Широтно-импульсная модуляция применяется в автономных инверторах напряжения (АИН), а также в непосредственных преобразователях частоты с искусственной коммутацией (НПЧ с ИК) [1, 2].

Данный способ может быть применен и к матричному преобразователю частоты (МПЧ).

Графики, на которых приведен способ формирования выходного напряжения на основе однополярной ШИМ, изображены на рис. 1.

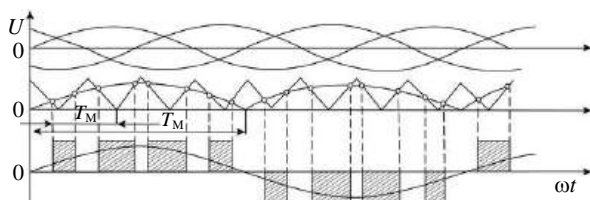


Рис. 1. Принцип однополярной ШИМ

Данные графики соответствуют ШИМ с несущей частотой  $f_H$ , кратной  $k = f_H/f_M = 8$ . Выпрямленное напряжение при ШИМ коммутируется периодически с частотой  $f_H = 1/T_H$ . При однополярной ШИМ нагрузка преобразователя частоты отключается периодически (рис. 1), при двухполярной ШИМ включается с обратной полярностью [3].

Для исключения гармоник по аналогии с автономными инверторами напряжения регулирование 3-фазного напряжения и частоты на выходе МПЧ может осуществляться скалярным способом на высокой несущей частоте методами ШИМ [4].

Переключения осуществляют в моменты равенства опорного и трехфазного модулирующего сигналов.

Примером использования ШИМ на основе сравнения сигналов управления с опорным сигналом для матричных преобразователей частоты является способ скалярного управления трехфазно-трехфазным матричным преобразователем частоты [5].

Структура устройства формирования переключающих функций управляющего блока преобразователя для системы частотного управления электроприводом, построенного по принципу ШИМ, приведена на рис. 2.

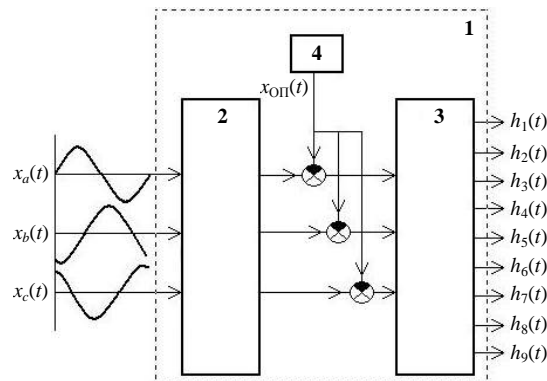


Рис. 2. Обобщенная схема управляющей части матричного преобразователя частоты:

1 — устройство формирования переключающих функций; 2 — блок подачи 3-фазного задающего сигнала; 3 — блок распределителя; 4 — блок опорного сигнала

Управляющая часть 1 содержит блок 2, входы которого служат для подачи 3-фазного задающего сигнала  $x_a(t)$ ,  $x_b(t)$ ,  $x_c(t)$  гармонической формы. Имеется также блок модулятора-распределителя 3, на входах которого происходит обычное для скалярных систем управления сравнение модулирующих и поступающего из блока 4 опорного ( $x_{оп}$ ) сигналов, результатом которого является получение на выходах блока 1 девяти последовательностей управляющих импульсов для ключей в составе матрицы.

На рис. 3 приведены диаграммы 3-фазной синусоидальной ШИМ.

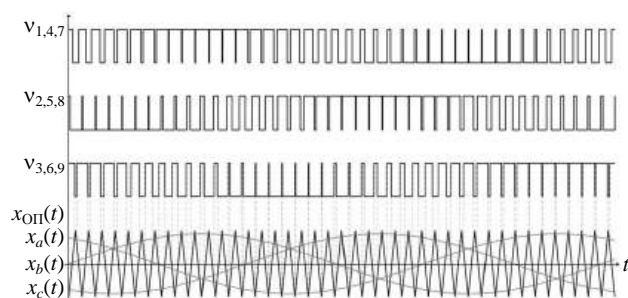


Рис. 3. Диаграммы 3-фазной синусоидальной ШИМ

Принцип работы системы управления: при синусоидально управляемой ШИМ для управления каждым выходом используют синусоидальное напряжение ( $x_a$ ,  $x_b$ ,  $x_c$ ); длительность периода синусоидального напряжения соответствует требуемой основной частоте выходного напряжения; на три синусоидальных напряжения накладывается опорное напряжение  $x_{оп}$ .

Если при пересечении опорного напряжения  $x_{оп}$  и синусоидального напряжения  $x_a$  синусоидальное напряжение по модулю становится больше пилообразного  $|x_a| - x_{оп} > 0$ , то открываются силовые ключи, подключающие соответствующие фазы входного напряжения (в зависимости от того, какая зона находится в данный период времени) на нагрузку. Если же при пересечении опорного напряжения  $x_{оп}$  и синусоидального напряжения  $x_a$  синусоидальное напряжение становится меньше пилообразного  $|x_a| - x_{оп} < 0$ , то тот ключ, который был замкнут до этого времени, размыкается и напряжение, приложенное к нагрузке, оказывается равным нулю. В результате выходное напряжение МПЧ имеет вид, представленный на рис. 4 [6].

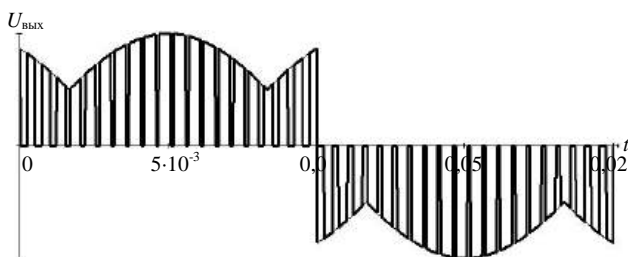


Рис. 4. Выходное напряжение МПЧ с частотой 50 Гц при частоте опорного сигнала  $x_{оп}$ , равной 2 кГц

При частоте опорного сигнала  $x_{оп}$ , равной 2 кГц, выходное напряжение МПЧ (рис. 4) имеет частоту 50 Гц.

#### Анализ качества управляющего сигнала для системы частотного управления электроприводом

Анализ гармонического состава выходного напряжения МПЧ, полученного в результате ШИМ, был произведен в программе Mathcad 14.0 [7–10].

Зависимость коэффициента гармоник  $K_G$  от частоты  $f$  выходного напряжения приведена на рис. 5.

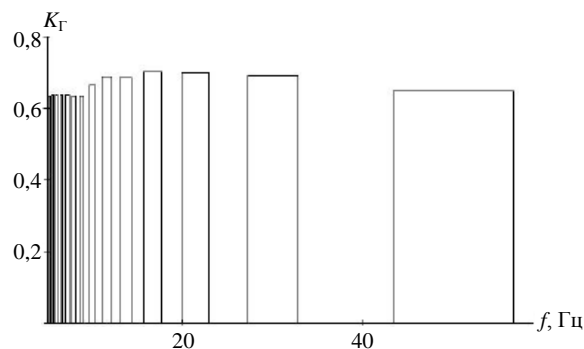


Рис. 5. Зависимость коэффициента гармоник  $K_G$  от частоты  $f$  выходного напряжения МПЧ

#### Заключение

Проанализировав гармонический состав выходного напряжения, полученного при помощи ШИМ, можно сделать выводы [10].

- Устройство формирования переключающих функций системы управления МПЧ на основе ШИМ приводит не к уменьшению искажения синусоидальности напряжения, а к смещению гармоник в области, кратные несущей частоте. При этом коэффициент гармоник принимает значения в пределах  $64,9 \% \geq K_G \geq 63,5 \%$  для диапазона частот  $50 \text{ Гц} \geq \nu > 5 \text{ Гц}$ .

- ШИМ вносит дополнительные искажения выходного напряжения и, как следствие, увеличение коэффициента гармоник. Так,  $K_G$  принимает значения в пределах  $51,1 \% \geq K_G \geq 39,1 \%$  для диапазона частот  $50 \text{ Гц} \geq \nu > 5 \text{ Гц}$  без ШИМ.

В соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 суммарный коэффициент гармоник рассчитывается для гармонических составляющих до 40-й гармоники включительно. В свою очередь, увеличение частоты коммутации приводит к тому, что гармонические составляющие смещаются в более высокочастотную область, т. е. порядок этих гармоник начинает превышать значение 40. Коэффициент гармоник, рассчитанный для первых 40 гармонических составляющих, при этом существенно уменьшается. Однако полный коэффициент гармоник не соответствует требованиям к качеству выходного напряжения.

Таким образом, основными недостатками использования ШИМ в системах управления МПЧ, используемой при управлении электроприборами, являются наличие шумов на частоте коммутаций и их повторяемость. Высокочастотные гармоники производят радиопомехи и индуцируют возмущения в электроприборах, а поскольку это крайне нежелательно, ШИМ и является предметом регулирования. При этом повышение частоты несущего сигнала приводит не к исключению гармонических составляющих из спектра выходного напряжения, а к их перемещению в область более высоких частот. Поскольку ГОСТ 32144-2013 регламентирует значение суммарного коэффициента гармонических составляющих, при расчете которого учитывались только гармоники с порядком меньше 40, повышение частоты коммутации создает видимость улучшения гармонического состава. При этом значение полного коэффициента гармоник является недопустимым для питания большинства потребителей. Наличие высших гармоник в спектре питающего напряжения приводит к ускоренному износу изоляции, нарушениям питания потребителей, что приводит к соответствующему экономическому ущербу.

#### Литература

1. Зинovieв Г. С., Попов В. И. Устройство для управления вентильным преобразователем частоты. А. с. № 283385. Опубл. 14.10.1970.
2. Зинovieв Г. С., Уланов Е. И. Способ управления инвертором напряжения // Преобразовательная техника. — Новосибирск, 1975. С. 24—28.
3. Карташов Р. П., Кулиш А. К., Чехет Э. М. Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией. — М.: Техника, 1979. — 152 с.
4. Сидоров С. Н. Матричный преобразователь частоты — объект скалярного управления // Силовая электроника. 2009. № 3. — 31 с.
5. Сидоров С. Н., Поляков А. Е. Способ скалярного управления ( $3 \times 3$ )-фазным матричным преобразователем частоты. А. с. RU 2414800 С1. Опубл. 20.03.2011. Бюл. № 8.
6. Федоров С. В., Бондарев А. В. Анализ влияния структуры системы управления матричными преобразователями частоты на основе широтно-импульсной модуляции на качество выходного напряжения. Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований: сб. мат. XII Межд. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Чернова С. С. — Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2014. С. 138—145.
7. Федоров С. В., Бондарев А. В. Анализ гармонического состава выходного напряжения матричного преобразователя частоты формируемого системой управления на основе широтно-импульсной модуляции. Технические науки — от теории к практике: сб. ст. по мат. XXXVII Междунар. науч.-практ. конф. № 8 (33). — Новосибирск: Изд. "СибАК", 2014. С. 45—52.
8. Bondarev A. V., Fedorov S. V., Muravyova E. A., Kadyrov R. R., Shulaeva E. A. The Questions of Circuitry Design when Forming the Switching Functions of the Control System of the Matrix Frequency Converter // Indian J. Science & Technology. 2016. Vol. 8. Special Issue 10.
9. Bondarev A., Fedorov S., Muraveva E., Kadyrov R., Charikov P., Shulaeva E. The impact of algorithms of forming switching functions of the control system in matrix frequency converter on output voltage THD // J. Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Vol. 41. Iss. 2. P. 82—86.
10. Bondarev A. V., Fedorov S. V., Muravyova E. A. Control systems with pulse width modulation in matrix converters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. C. 052008.

## DEVICE FOR FORMATION OF SWITCHING FUNCTIONS OF MATRIX FREQUENCY CONVERTER CONTROL SYSTEM BASED ON PULSE WIDTH MODULATION

S. V. Fedorov

Department of Power Industry of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University", Kumertau, Russia

*This article describes the device of formation of switching functions of the control unit of the frequency Converter for the electric drive control system, built on the principle of pulse width modulation. The analysis of the control signal quality for the electric drive frequency control system is made. The main disadvantages of the use of pulse width modulation in control systems of matrix frequency converters are given.*

**Keywords:** pulse width modulation, electric drive control system, harmonic distortion.

Федоров Сергей Витальевич, доцент.  
E-mail: proinfosystem@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 января 2020 г.



УДК 658.52

## ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В САПР

А. Е. Курносенко; Т. В. Никольский; А. С. Ломаченко

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

*Проведен анализ применения имитационного моделирования в САПР подготовки производства электронных средств. На примере создания 3D-модели технологического оборудования для ручной сборки электронных модулей на печатных платах в системе автоматизированного производства (САПР) Solid Edge проиллюстрирована методика подготовки цифровых исходных данных для имитационного моделирования. Подробно проанализирована процедура импорта в систему Plant Simulation, входящую в программный комплекс Tecnomatix от компании Siemens Digital Industries. Предложен обобщенный алгоритм синтеза кинематики подвижных объектов сборки при реализации имитационных моделей. Даны рекомендации по применению инструментария от Siemens Digital Industries при решении задач по имитационному моделированию производственных систем.*

**Ключевые слова:** цифровая модель, сборка электроники, ручная операция сборки, подготовка производства, производство электроники, имитационное моделирование, Solid Edge, Plant Simulation.

Сборка электроники — одна из сфер производственной деятельности, предусматривающих широкую автоматизацию производственных процессов и применение развитых средств для их цифрового моделирования. В рамках концепции Industry 4.0 предусмотрена тесная интеграция модели изготавливаемого изделия и модели его производства, что позволяет ускорить и упростить формирование технологических процессов, компоновку производственных участков, назначение оборудования, оснащения, рабочего персонала на операции, расширить возможности анализа, внесения изменений и отработки различных сценариев функционирования производства [1–5]. Следует отметить, что применительно к операциям сборки электронной аппаратуры цифровое моделирование производственных процессов традиционно рассматривают для полностью автоматизированных технологических линий и участков сборки [6–13]. Операциям ручной сборки и монтажа уделяют меньше внимания. Однако вопросы эффективности выполнения таких операций с точки зрения производительности, эргономики, обеспечения комплектующими, оптимального назначения количества рабочего персонала имеют важное значение для создания адекватной модели сборочного производства, в котором присутствует доля ручных операций.

В работе [14] рассмотрены основные подходы к имитационному моделированию ручных операций сборки. Предлагаемая работа является ее развитием и посвящена вопросам создания и последующего импорта моделей элементов и узлов технологического оборудования в целях дальнейшего проведения имитационного моделирования.

### Выбор технологического оборудования

В качестве характерной модели технологического оборудования для оснащения рабочего

места монтажника выбран модульный ручной установщик компонентов поверхностного монтажа ТЕРМОПРО SMP-330 [15], разработанный НТФ "Техно-Альянс Электроникс". На рис. 1 представлен взятый за основу вариант конфигурации установщика SMP-330 (пневматический дозатор не показан) с оснащением рабочего места монтажника различными типами питателей.

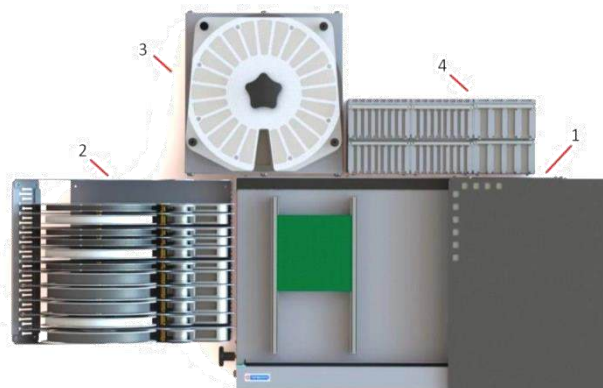


Рис. 1. Универсальная конфигурация установщика SMP-330:

1 — монтажный стол; 2 — ячейка с 16 ленточными питателями для лент различной ширины; 3 — карусельный питатель на 24 номинала из россыпи; 4 — подставка с тремя кассетными двухъярусными питателями для обрезков лент различной ширины [16]

Установщик SMP-330 обеспечивает проведение ручных операций по нанесению паяльной пасты или адгезива методом дозирования и установки компонентов поверхностного монтажа с подачей их из ленточных питателей, обрезков лент и россыпи с помощью вакуумного пинцета.

### Создание цифровой модели технологического оборудования

Создание цифровых моделей элементов установщика SMP-330 осуществляли в студенческой

версии САПР Solid Edge от компании Siemens Digital Industries. Модели выполняли с конструктивными упрощениями, не влияющими на процесс имитационного моделирования.

Поскольку установщик SMP-330 может быть гибко сконфигурирован под различные реализации операций поверхностного монтажа компонентов [17], цифровую модель также создавали гибкой с возможностью замены различных компонентов.

Изначально была создана модель монтажного стола, представленная на рис. 2. Рабочий стол установщика SMP-330 оснащен скользящим упором для руки. Он может быть зафиксирован с помощью тормоза в любом положении. В крайнем левом положении скользящий упор полностью закрывает зону монтажа. Таким образом, рука оператора может удобно перемещаться над платой, не задевая нанесенную паяльную пасту и компоненты на плате [16].

Далее была создана модель ячейки с 16 ленточными питателями для лент различной ширины (рис. 3). Ленточные питатели для кату-

шек диаметром 7 дюймов устанавливают в универсальную ячейку, в которой может быть размещено до 16 питателей с лентой шириной 8 мм. Предусмотрены питатели для лент шириной 12 и 16 мм. Катушки диаметром 14 дюймов устанавливают на стандартный питатель с помощью специального адаптера [16].

Питатели удерживают в ячейке с помощью пазов и магнитной ленты. Потянув за кольцо, оператор может извлечь нужный питатель из ячейки в произвольном порядке.

Также создана модель карусельного питателя на 24 номинала из россыпи (рис. 4). Данный питатель предназначен для хранения мелких компонентов в россыпи. На основании питателя смонтирован шарикоподшипник, на котором вращается карусель. Вращение карусели в любом направлении обеспечивается рукояткой. Карусель накрыта антистатическим стеклом, которое установлено на подпружиненных стойках и закреплено гайками. В стекле предусмотрена прорезь, через которую оператор имеет доступ к одной из ячеек с компонентами.

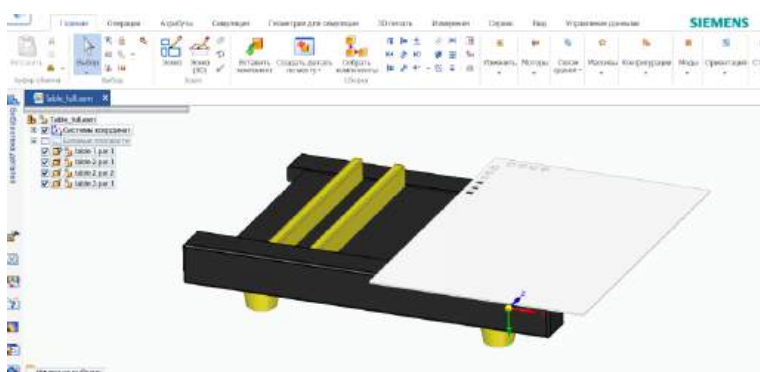


Рис. 2. Модель монтажного стола

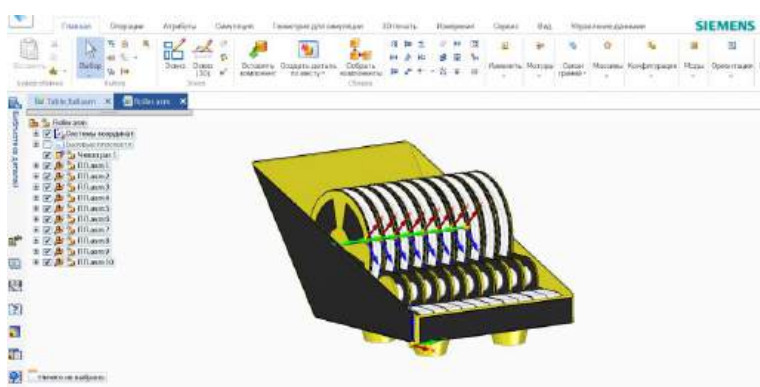


Рис. 3. Модель ячейки с 16 ленточными питателями для лент различной ширины

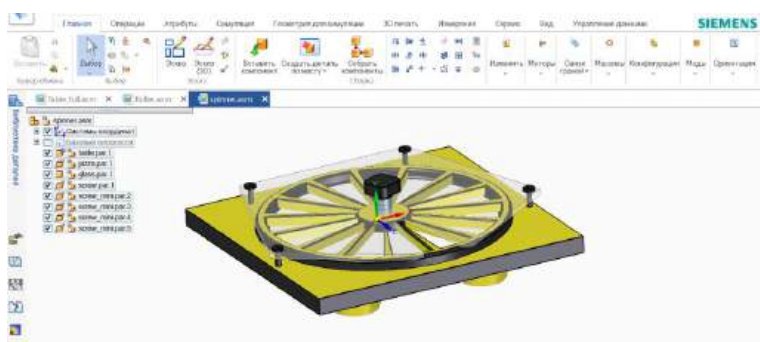


Рис. 4. Модель карусельного питателя на 24 ячейки

Далее была создана модель подставки с касетными двухъярусными питателями для обрезков лент различной ширины (рис. 5). Касетные двухъярусные питатели предназначены для хранения на рабочем месте обрезков лент. При двухъярусной конфигурации достигается концентрация различных компонентов на малой площади с удобным доступом к ним.

В завершение создана общая сборка, объединяющая модули, установщика SMP-330 (рис. 6). Конфигурация сборки может гибко изменяться путем добавления новых модулей и перестановки их на рабочем столе.

Модель сохранена в открытом формате описания 3D-данных JT (расширение .jt), разработанном и поддерживаемым компанией Siemens Digital Industries в целях визуализации, организации совместной работы и обмена данными в САПР.

### Импорт цифровой модели технологического оборудования в модуль PLANT SIMULATION

Работу с цифровой моделью установщика SMP-330 в системе цифрового моделирования производства проводили в модуле Plant Simulation (студенческая версия), который входит в программный комплекс Tecnomatix (Siemens Digital Industries) [18]. Далее описан процесс импорта моделей оборудования в модуль Plant Simulation [19].

На первом шаге в приветственном окне Tecnomatix Plant Simulation необходимо выполнить команду Create New Model-3D. Откроется основное рабочее окно Tecnomatix Plant Simulation (рис. 7). Импорт файла модели в формате .jt выполняют с помощью команды Import Graphics (указана стрелкой).

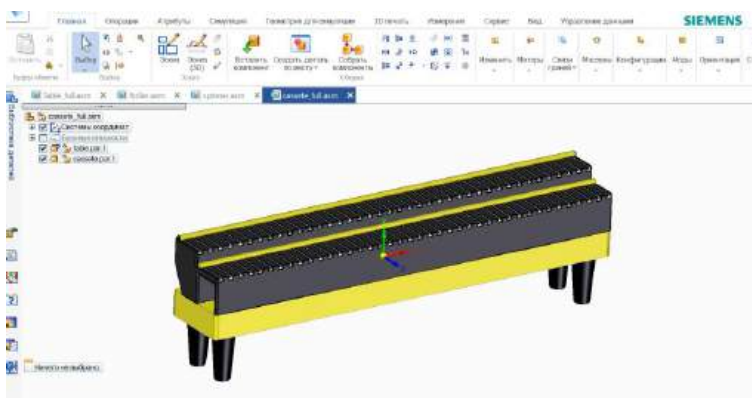


Рис. 5. Модель подставки с касетными двухъярусными питателями для обрезков лент

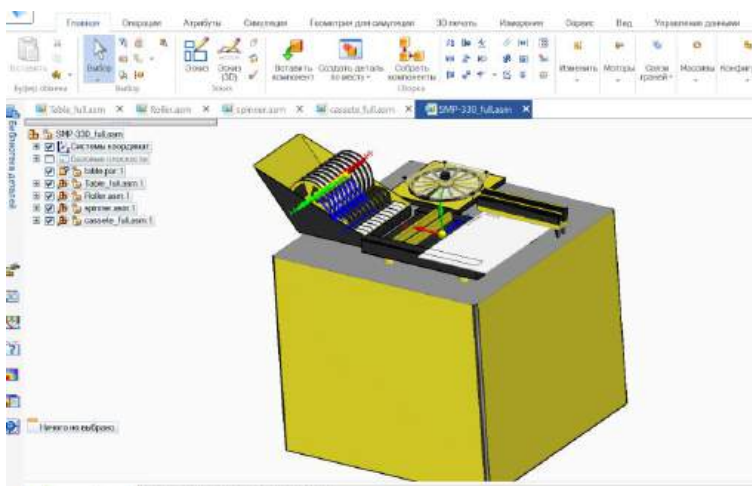


Рис. 6. Цифровая модель установщика SMP-330

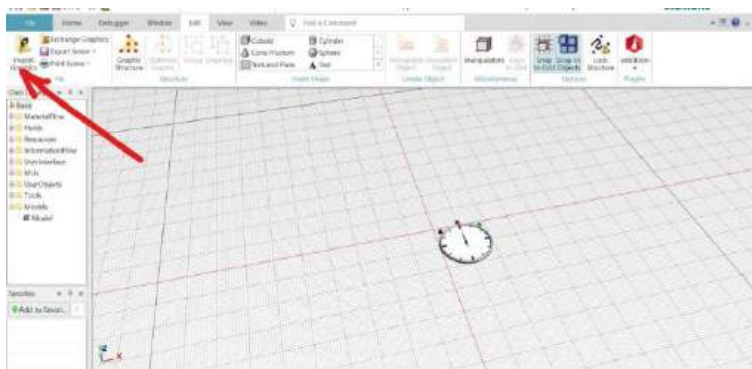


Рис. 7. Основное рабочее окно Tecnomatix Plant Simulation



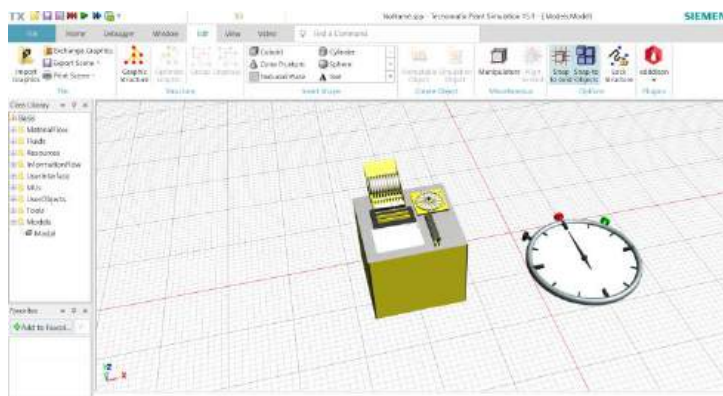
Размещенная модель показана на рис. 8. Ее ориентацией можно управлять с помощью комбинаций Ctrl + клавиши управления курсором, масштабом — с помощью колеса мыши, расположением — удерживанием нажатой правой кнопки мыши.

Непосредственно после размещения модель представляет собой простой графический элемент. Чтобы включить ее в экосистему Plant Simulation, выполнять анализ, анимацию кинематики и т. д., необходимо создать файл с расширением .s3d с помощью команды Make Animatable Object, задав новое имя и координаты объекта. Индикатором правильности преобразо-

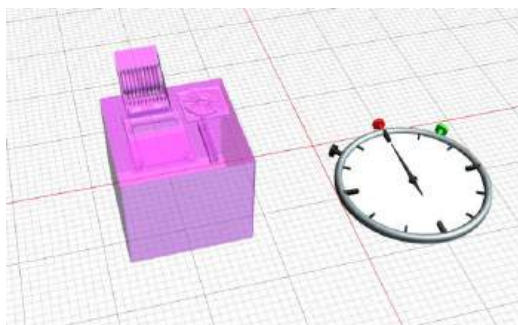
вания служит изменившийся цвет объекта (рис. 9).

Далее необходимо последовательно выполнить команды Export Scene и Export Object, сохранить файл с расширением .s3d и выйти в главное меню, чтобы изменения применились. Если этого не сделать, то текущая модель продолжит восприниматься как простой графический элемент. Затем следует заново выполнить команду Create New Model-3D.

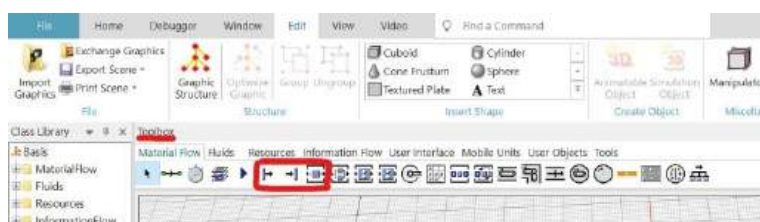
Для создания простейшего проекта необходимы как минимум объекты Source, Single Proc и Drain из панели инструментов Tool Box над рабочим пространством (рис. 10, таблица).



**Рис. 8. Установщик SMP-330, размещенный в системе Tecnomatix Plant Simulation**



**Рис. 9. Установщик SMP-330 в виде объекта, пригодного для анализа и анимации**



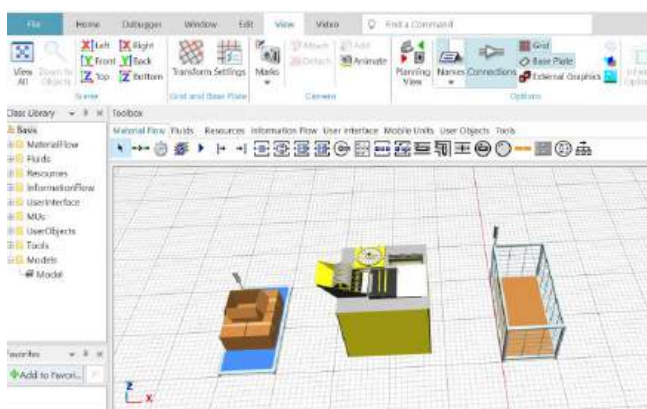
**Рис. 10. Инструментальная панель Tool Box модуля Tecnomatix Plant Simulation**

**Основные элементы панели Tool Box модуля Tecnomatix Plant Simulation**

Вид элемента панели	Назначение
	Элемент "источник" (Source) — это элемент, который создает MU и пытается передать его далее по ходу техпроцесса. Он используется в местах, где MU создается/генерируется (обычно в начале процесса). Время между последовательными созданиями MU может быть задано случайной величиной
	Элемент "одиночный автомат" (Single Proc) получает MU, обрабатывает его, сохраняет во время обработки и затем пытается передать его далее по ходу техпроцесса. В рассматриваемом случае это комплексный объект — установщик SMP-330
	Элемент "отвод" (Drain) уничтожает MU после их обработки. Он используется в местах, где MU должны покинуть систему (обычно в конце процесса)
	Объект "соединитель" (Connector) — объект, осуществляющий связи объектов материалопотока между собой в целях обмена подвижными объектами, чтобы MU могли перемещаться в пространстве модели. Стрелка в середине объекта указывает направление. Одно соединение может указывать только в направление

Это объекты материалопотока (Material Flow), представляющие собой объекты, производящие какие-либо действия над подвижными объектами (Mobile Object — MU). Подвижные объекты перемещаются по сборочному участку и могут испытывать преобразования в процессе производства [4]. В данном проекте такими объектами являются сборка на печатной плате и комплектующие: сама незаполненная печатная плата и электронные компоненты в россыпи и упаковке.

После размещения данных элементов необходимо поменять стандартный элемент Single Proc на созданный объект с помощью команды Exchange Graphics, выбрав .s3d-файл объекта и нажав кнопку "Открыть" (рис. 11).



**Рис. 11. Установщик SMP-330 в системе Tecnomatix Plant Simulation со стандартными источником и отводом**

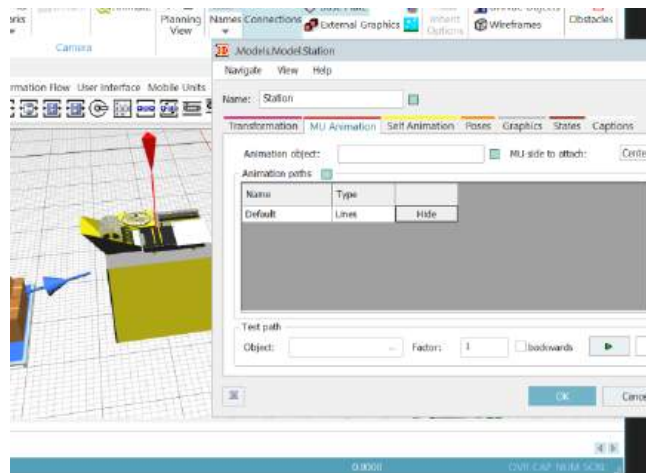
На месте стандартного элемента Single Proc теперь находится созданный объект модели установщика SMP-330.

### Обобщенный алгоритм синтеза кинематики цифровой модели технологического оборудования

Настройка кинематики позволяет реализовать движения исполнительных механизмов технологического оборудования в процессе его работы. Этот этап является обязательным для последующего проведения имитационного моделирования. В данной работе рассмотрен общий подход к настройке кинематики на примере передачи на рабочий стол объектов производства (сборок на печатных платах в состоянии незавершенного производства) и последующей передачи их далее по ходу техпроцесса после выполнения монтажных операций без использования промежуточных накопителей.

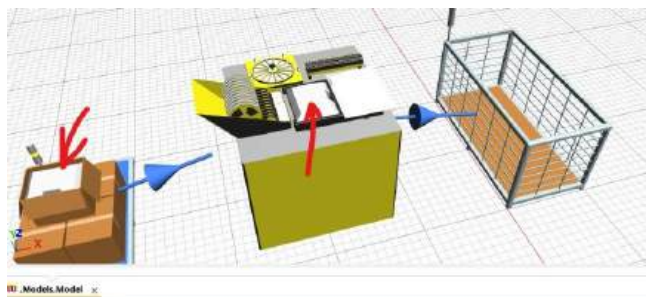
В первую очередь настройка кинематики для размещенной модели установщика SMP-330 предусматривает необходимость выбора соответствующего направления с помощью объекта Connector из инструментальной панели Tool Box.

Далее необходимо указать, где именно должны располагаться MU (сборки на печатных платах) на объекте-установщике SMP-330 с помощью команды Edit 3D Properties... и вкладки MUAnimations, сменив статус анимации Show (показать) на Hide (скрыть) [18]. Появится указатель, показывающий текущее расположение MU на объекте (рис. 12). После этого необходимо установить нужное положение MU с помощью курсорных клавиш.



**Рис. 12. Настройка кинематики установщика SMP-330**

После выполнения указанных действий становится доступным выполнение/приостановка симуляции объекта с помощью команды Start/Stop Simulation. На рис. 13 стрелками показано расположение MU в источнике и на объекте-установщике SMP-330.



**Рис. 13. Кинематика перемещения сборок на печатных платах**

### Заключение

В работе рассмотрена последовательность действий по созданию цифровых моделей элементов технологического оборудования для ручной сборки электронных модулей на печатных платах ТЕРМОПРО SMP-330, их импорту в среду имитационного моделирования, а также дан обобщенный алгоритм настройки кинематики этого оборудования с применением программных средств Solid Edge и Tecnomatix Plant

Simulation от компании Siemens Digital Industries. Дальнейшая работа над проектом будет посвящена реализации кинематики отдельных элементов установщика и дозатора, модели монтажника на основе антропоморфного манекена с помощью модуля Jack/Simulate Human из системы Tecnomatix с последующим проведением имитационного моделирования ручных операций сборки.

*Отдельные результаты исследований  
получены в рамках госзадания МОН РФ  
"Исследования методов и моделей синтеза  
энергоэффективных неорганических  
мемристорных структур".*

#### Литература

1. Шахнов В. А., Курносенко А. Е. Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции "Индустрия 4.0" // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии: мат. I Межд. науч.-практ. конф., г. Екатеринбург, 11 октября 2019 г. — Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2019. С. 521—531.
2. Арабов Д. И., Власов А. И., Гриднев В. Н., Григорьев П. В. Концепция цифрового инструментального производства (FAB LAB) для прототипирования изделий электронной техники // Межд. науч.-исслед. журнал. 2016. № 5-3 (47). С. 23—34.
3. Курносенко А. Е., Харитонов К. П. Применение PLM-системы Teamcenter для управления жизненным циклом электронных изделий // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 2 (170). С. 56—62.
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 (172). С. 42—48.
5. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливое производство" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2 (162). С. 23—27.
6. 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: сб. трудов Межд. форума "Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения", Москва, 28—29 ноября 2019 г. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. С. 298—302.
7. Иванов Ю. В., Курносенко А. Е. Основные задачи, решаемые программным комплексом "Контур" компьютер-

ного проектирования роботизированных средств ГАСК сборки электронной аппаратуры в условиях многономенклатурного производства // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 36—46.

8. Иванов Ю. В., Курносенко А. Е. Программный комплекс "Контур" для проектирования роботизированных комплексов сборки электронной аппаратуры в многономенклатурном производстве // Инженерный вестник. 2013. № 3. С. 4.

9. Иванов Ю. В., Курносенко А. Е. Оптимизация выбора транспортного оборудования для гибкого автоматизированного комплекса многономенклатурного производства ячеек ЭА // Проектирование и технология электронных средств. 2003. № 1. С. 16—20.

10. Иванов Ю. В., Курносенко А. Е. Специальное программное обеспечение автоматизированной разработки структур ГАСК многономенклатурного производства электронной аппаратуры. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 10 с.

11. Иванов Ю. В., Курносенко А. Е. Автоматизация проектирования и оптимизация транспортных операций гибкого автоматизированного сборочного комплекса многономенклатурного производства электронных ячеек для обеспечения требуемого уровня занятости технологического оборудования // Технологии приборостроения, 2002. № 2. С. 23—41.

12. Иванов Ю. В., Курносенко А. Е. Определение оптимального состава и количества единиц транспортного оборудования для гибкого автоматизированного сборочного комплекса многономенклатурного производства электронных ячеек: сб. "Конструкторско-технологическая информатика — 2000". Тр. конгресса в 2 томах, 2000. С. 212—215.

13. 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 (169). С. 26—32.

14. Курносенко А. Е., Никольский Т. В., Ломаченко А. С. Применение модуля Jack/SimulateHuman для имитационного моделирования операций сборки электроники // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2 (174). С. 21—25.

15. Курносенко А. Е. Установщик SMP-330: многофункциональное эргономичное решение для ручной установки SMD-компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 6. С. 48—49.

16. Модульный ручной установщик SMD компонентов ТЕРМОПРО SMP-330. Краткое описание и технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: [http://termopro.ru/files/1531/smp-330\\_opisanie.pdf](http://termopro.ru/files/1531/smp-330_opisanie.pdf)

17. Власов А. И., Гриднев В. Н., Милешин С. А., Козлова А. Ю. Маршрут технологической подготовки производства печатных плат в среде CAM350 // Технологии инженерных и информационных систем. 2017. № 1. С. 14—45.

18. Документация Siemens PLM Software по направлению Tecnomatix [Электронный ресурс]. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/> (дата обращения: 27.02.2020).

19. Martijn R. K. Mes Simulation Modelling using Practical Examples: A Plant Simulation Tutorial. Software version 13.0 (Netherlands: University of Twente), 2017.

## PREPARATION OF MODEL EQUIPMENT FOR SIMULATION IN CAD/CAM/CAE

A. E. Kurnosenko, T. V. Nikolsky, A. S. Lomachenko  
BMSTU, Moscow, Russia

*The paper is devoted to the analysis of the use of simulation in electronics reproduction systems. On the example of creating a 3D model of technological equipment for the manual assembly of electronic modules on printed circuit boards in SolidEdge CAD, a methodology for preparing digital input data for simulation is illustrated. The import procedure into the Plant Simulation system, which is part of the Tecnomatix software package from Siemens Digital Industries, is analyzed in detail. A*



---

*generalized synthesis algorithm for the kinematics of moving assembly objects in the implementation of simulation models is proposed. In conclusion, recommendations are given on the use of tools from Siemens Digital Industries in solving problems of manufacturing system simulation.*

*Keywords:* digital model, electronics assembly, manual assembly operation, preproduction, electronics manufacturing, simulation, Solid Edge, Plant Simulation.

---

**Куриносенко Алексей Евгеньевич**, доцент, заместитель заведующего кафедрой  
"Проектирование и технология производства электронной аппаратуры".

E-mail: akurn@bmstu.ru

**Никольский Тимофей Вадимович**, магистрант.

E-mail: tnikolskiy@gmail.com

**Ломаченко Александр Станиславович**, магистрант.

E-mail: hodlm8@protonmail.com

*Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.*

УДК 519.6, 519.8, 004.94

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АПРОБАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К РАСЧЕТНЫМ КОМПЛЕКСАМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПРОЕКТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ "ПРОРЫВ"

С. В. Сумароков; Т. К. Жабоев; Ф. О. Новосельский, канд. эконом. наук;  
М. В. Гусев; С. А. Королёв

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

*Приведены результаты разработки требований к архитектуре расчетного комплекса и пилотной апробации подхода по решению оптимизационных задач с применением специализированной программной платформы rSeven и программного комплекса STAR-CCM+.*

**Ключевые слова:** расчетный комплекс, многокритериальная оптимизация, программная архитектура.

Основным инструментом проектирования сложных технических объектов и систем ядерного комплекса являются системы автоматизированного проектирования и математического (численного) моделирования. В рамках проектного направления (ПН) "Прорыв" [1] разработано и верифицировано большое количество расчетных кодов [2], охватывающих широкий спектр моделируемых процессов и явлений, что позволяет предсказывать поведение реакторной установки (РУ) в различных режимах, в том числе аварийных, и имитировать работу комплекса в целом в условиях замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Применение САПР и расчетных кодов позволяет виртуально проверять различные варианты технического решения (конструкции, технологической компоновки оборудования, режимов работы и т. д.) посредством проведения расчетных многовариантных исследований.

Одним из подходов для реализации всего потенциала технического решения является применение математического аппарата и алгоритмов многокритериальной оптимизации, позволяющих минимизировать число итераций ресурсоемких вычислений при поиске оптимума для заданной целевой функции, автоматически отсеивая неприемлемые по граничным условиям или заведомо неперспективные ветки решений.

Средством для проведения оптимизационных расчетов может являться специализированная программная платформа, реализующая оптимизационные алгоритмы, и подключенные к программной платформе расчетные коды.

Программная платформа в таком случае интегрирует алгоритмы оптимизации и сервисы управления запуском и выполнением расчетных моделей, обеспечивая автоматический поиск оптимальных решений в соответствии с заданной исследователем постановкой.

Расчетные коды, в том числе разработанные для решения оптимизационных задач, а также применяемые в проектировании САПР, необхо-

димо подключить к специализированной платформе посредством коннекторов либо посредством настройки платформы для работы с входными файлами соответствующих расчетных программ.

Применение подхода на основе математических методов оптимизации соответствует лучшим мировым практикам в области проектирования и эксплуатации сложных технических объектов. Накопленный в рамках ПН "Прорыв" потенциал в виде расчетных кодов и комплексов моделирования объектов ядерной энергетики (ЯЭ) позволит в относительно короткие сроки реализовать и внедрить в практику предложенный подход для различных направлений проектных работ.

В соответствии с мировым опытом применение оптимизационных расчетов позволяет:

- провести оценку всех возможных рисков;
- выявить оптимизационный потенциал;
- улучшить технические характеристики изделий (в том числе за счет снижения консерватизма);
- обеспечить ресурсную и технологическую безопасность;
- сократить производственный цикл.

Расчетных комплексов, позволяющих решать достаточно широкий спектр стоящих перед ПН "Прорыв" оптимизационных задач на базе единой методологии, не существует.

### Архитектура и требования к расчетным комплексам для решения оптимизационных задач (РКО)

Основным предназначением разрабатываемых расчетных комплексов является решение оптимизационных задач в целях обеспечения требуемых потребительских характеристик энергокомплекса и его элементов и обеспечения их робастности (устойчивости к изменениям условий производства и эксплуатации) при проведении НИОКР.

Исходя из анализа и систематизации задач, стоящих перед проводимыми в проекте "Прорыв" НИОКР, предполагается разработка следующих РКО:

- расчетные комплексы для решения задач по оптимизации конструкции реакторной установки и тепловыделяющих сборок (ТВС), в том числе для решения:

- оптимизационных задач теплогидравлики;
- оптимизационных нейтронно-физических задач;
- оптимизационных задач по топливу;
- задач оптимизации конструкции оборудования на основе его прочностных характеристик;
- задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы;
- интегральных оптимизационных задач;

- расчетный комплекс для решения задач оптимизации режимов эксплуатации РУ;

- расчетный комплекс для оптимизации ядерного топливного цикла и системного развития ЯЭ.

Расчетные комплексы на основе математических методов оптимизации и функционала для проведения параметрических исследований должны позволять решать задачи следующего типа:

- построение расчетной стратегии и поиск оптимальных решений;
- исследование области пространства решений (на базе заданной или созданной выборки случайных значений);
- поиск решений, удовлетворяющих заданным ограничениям;
- проведение связанных расчетов;
- проведение анализа чувствительности;
- сравнительный анализ результатов вычислительных и натурных экспериментов.

Кроме того, расчетные комплексы должны предоставлять возможность проведения следующих типов оптимизационных расчетов:

- оптимизационные расчеты отдельным расчетным кодом;
- связанные оптимизационные расчеты несколькими расчетными кодами;
- оптимизационные расчеты методом суррогатного моделирования (применяется для повышения скорости расчетов; предполагает применение прецизионного расчетного кода для вычисления реперных точек, необходимых при построении аппроксимационных (суррогатных) моделей, оптимизацию на основе суррогатных моделей и последующее уточнение результатов с применением прецизионного расчетного кода).

Обобщенная схема решения оптимизационной задачи с применением методов суррогатного моделирования приведена на рис. 1.

В общем случае решение оптимизационной задачи с использованием методов параметрической оптимизации имеет несколько этапов.

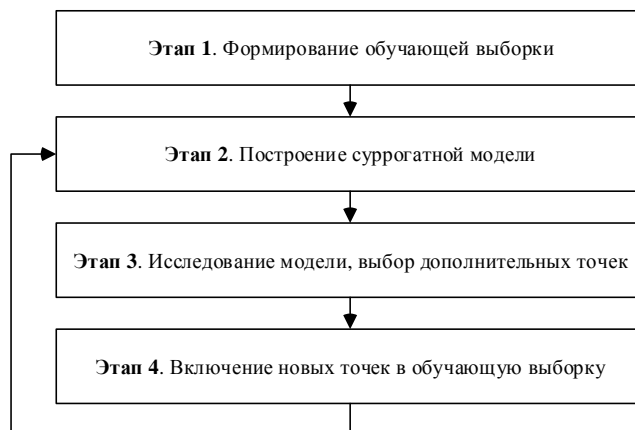


Рис. 1. Схема алгоритма оптимизации на основе использования суррогатных моделей

Этапы оптимизационной задачи.

- Постановка задачи (оптимизационной, исследования параметров или другой): определение входных изменяемых параметров, ограничений для выходных параметров задачи. Для оптимизационной задачи также определяют целевые критерии (минимумы или максимумы для выходных параметров).

- Составление схемы решения задачи: определяют состав и последовательность проведения расчетов, включая возможные циклы, различные зависимости между расчетами, решают какие применяют расчетные коды и САПР и как осуществляют обмен данными между ними, а также необходимость использования дополнительных средств пре-пост процессинга.

- Выполнение расчетов: происходит исполнение схемы как на локальных вычислительных ресурсах, так и с привлечением удаленных, в том числе кластеров и суперЭВМ.

- Анализ результатов: при помощи средств анализа данных и визуализации проводят оценку полученных результатов расчетов, в том числе определяют оптимальные или допустимые решения в зависимости от постановки задачи.

Архитектура расчетных комплексов должна быть построена на базе специализированной программной платформы, представляющей функционал по проведению параметрических исследований и оптимизации, а также выполняющей интеграционную роль для связывания расчетных кодов в единый расчетный комплекс.

Вместе с программной платформой в состав расчетного комплекса должны входить расчетные коды, предоставляющие возможности по моделированию соответствующих классу оптимизационных задач, объектов и процессов, а также интерфейсы между платформой и расчетными кодами.

Общая архитектура РКО представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общая архитектура расчетного комплекса

Программная платформа является основной для построения специализированных предметно-ориентированных расчетных комплексов оптимизации (РКО). Соответственно и требования к ней являются общими для всех разрабатываемых комплексов.

В соответствии с предложенной архитектурой РКО программная платформа должна обладать следующими функциональными возможностями:

- постановка задач оптимизации и проведения параметрических исследований;
- построение схемы расчета (конструктор расчетной схемы);
- реализация математических методов и алгоритмов оптимизации;
- управление вычислениями в соответствии с расчетной схемой, в том числе распределенными вычислениями;
- интеграция с внешними системами;
- анализ и вывод данных.

В свою очередь, расчетные коды, подключаемые к платформе, должны обладать соответствующими возможностями, предполагающими их использование по принципу "черного ящика". Это значит, что расчетные коды должны иметь возможность запуска и выполнения расчета в режиме "командной строки", без вызова дополнительных интерактивных окон (предполагающих какие-либо действия пользователя).

Расчетный комплекс для решения оптимизационных задач теплогидравлики должен обеспечивать проведение оптимизационных расчетов для оптимизации термодинамических и гидравлических проектных характеристик конструктивных элементов и оборудования всех контуров РУ, в которых циркулируют жидкометаллический и водяной теплоносители. В состав комплекса должны входить расчетные модели разного приближения:

- канальное приближение для расчета теплогидравлических параметров в активной зоне и контурах циркуляции;

- CFD-код для численного моделирования трехмерных течений жидкости и газа, теплопереноса и механики напряженного состояния на основе RANS-приближения;

- прецизионный масштабируемый CFD-код на основе LES- и DNS-приближений.

Расчетный комплекс для решения оптимизационных нейтронно-физических задач должен позволять проводить расчеты для решения задач по оптимизации строения активной зоны РУ, в том числе для следующего типа задач:

- оптимизация аксиального поля энерговыделения при помощи профилирования;
- оптимизация расположения компенсаторов реактивности;
- нахождение оптимального соотношения габаритов активной зоны.

Расчетный комплекс для решения оптимизационных задач по топливу должен обеспечивать решение оптимизационных задач на основе мультифизических расчетов топливным кодом. Комплекс должен позволять проводить оптимизационные расчеты в целях обеспечения повышения глубины выгорания топлива и позволять проводить оптимизационные расчеты в целях нахождения оптимальной загрузки и перегрузки топлива быстрых реакторов.

Расчетный комплекс для решения задач оптимизации конструкции оборудования на основе его прочностных характеристик должен обеспечивать решение оптимизационных задач на основе расчетов стойкости конструкций при наличии различных механических воздействий в рамках имеющихся ограничений. Расчетные модели в составе комплекса должны моделировать объекты с использованием математического аппарата механики твердого тела и метода конечных элементов, в том числе с учетом влияния температурной и механической нагрузок.

Расчетный комплекс для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы должен обеспечивать решение оптими-

зационных задач на основе расчетов на прочность трубопроводов АЭС при действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок в соответствии с нормами ПНАЭ Г-7-002-86.

Расчетный комплекс для решения интегральных оптимизационных задач должен обеспечивать решение интегральных оптимизационных задач на основе мультифизических (нейтронно-физических, теплогидравлических, термомеханических) расчетов активной зоны и ТВС для РУ БРЕСТ-ОД-300, БН-1200 и БР-1200. В частности, комплекс должен позволять проводить оптимизацию:

- запаса реактивности посредством балансировки доли минорных актинидов в изотопном составе плутония;
- конструкции и состава топлива для максимизации глубины выгорания без потери мощности реактора;
- конструкции ТВС в целях максимизации объемной доли топлива в активной зоне в рамках установленных ограничений для температуры компонентов, перепада давления, скорости потока теплоносителя и пределов конструктивной целостности.

Расчетный комплекс для решения задач оптимизации режимов эксплуатации РУ должен позволять проводить расчеты, направленные на поиск оптимальных режимов работы оборудования РУ в номинальном и в переходных состояниях.

Расчетный комплекс для оптимизации ядерного топливного цикла и системного развития ядерной энергетики (ЯЭ) должен позволять производить оптимизацию развития промышленного энергокомплекса с ЗЯТЦ с учетом динамики развития парка тепловых и быстрых реакторов и объектов ядерного топливного цикла (ЯТЦ), включая объекты по добыче урана, конверсии, фабрикации и переработке различных видов топлива и обращению с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО). Комплекс должен позволять производить оптимизацию продолжительности внешней части ЗЯТЦ при различной глубине очистки ОЯТ от актинидов с учетом длительности хранения РАО и требуемой емкости промежуточного хранилища для достижения условий радиационно-эквивалентного захоронения.

### Пилотная апробация

В апробации подхода по проведению оптимизационных расчетов с применением специализированной программной платформы совместно с АО "НИКИЭТ" был проведен "пилотный проект" на базе программных продуктов pSeven и STAR-CCM+. В качестве тестовой задачи была

выбрана оптимизация конструкции соплового ограничителя течи.

Сопловой ограничитель течи (СОТ), оптимизацию геометрии которого проводили в рамках пилотного проекта, представляет собой сопло Лаваля, установленное в патрубках второго контура РУ (см. рис. 3). Основное назначение СОТ — минимизировать потерю теплоносителя при разрыве трубопровода, создавая за счет геометрии сопла необходимую разницу давлений. Основные параметры, использованные в проведенном проекте и характеризующие эффективность СОТ (чем они меньше, тем лучше), — общая длина СОТ, массовый расход теплоносителя в критическом режиме.

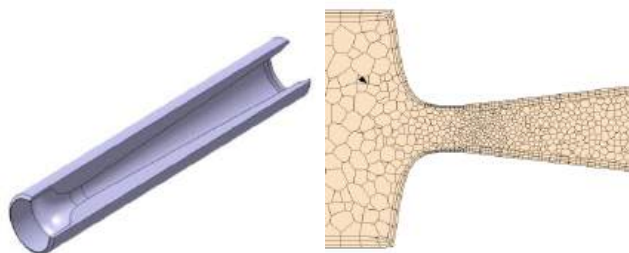


Рис. 3. Сопловой ограничитель течи и фрагмент сеточной модели

Средство pSeven [3] было выбрано в качестве тестовой платформы, поскольку является одной из наиболее успешных отечественных платформ для анализа данных и оптимизации, представляет широкие возможности настройки и визуализации данных, включает собственный алгоритм суррогатной оптимизации [4], эффективно применяемый для междисциплинарной оптимизации и автоматизации инженерных расчетов [5]. Помимо этого pSeven имеет опыт активного использования в инженерных проектах по всему миру, в частности в таких компаниях, как Airbus и Siemens.

Для оптимизации СОТ в программной платформе pSeven была составлена расчетная схема (см. рис. 4), позволяющая одновременно варьировать 5 параметров геометрии для улучшения характеристик СОТ по двум целевым критериям, и проведены оптимизационные расчеты.

По итогам выполнения и анализа результатов оптимизационных расчетов с применением программной платформы pSeven и кода STAR-CCM+ из 100 конфигураций СОТ определены 5 вариантов, оптимальных с точки зрения заданных критериев оптимизации и граничных условий. На выполнение оптимизационных расчетов и обработку их результатов с помощью программной платформы pSeven в общей сложности затрачено порядка 72 ч, из которых примерно 48 ч ушло непосредственно на расчеты.

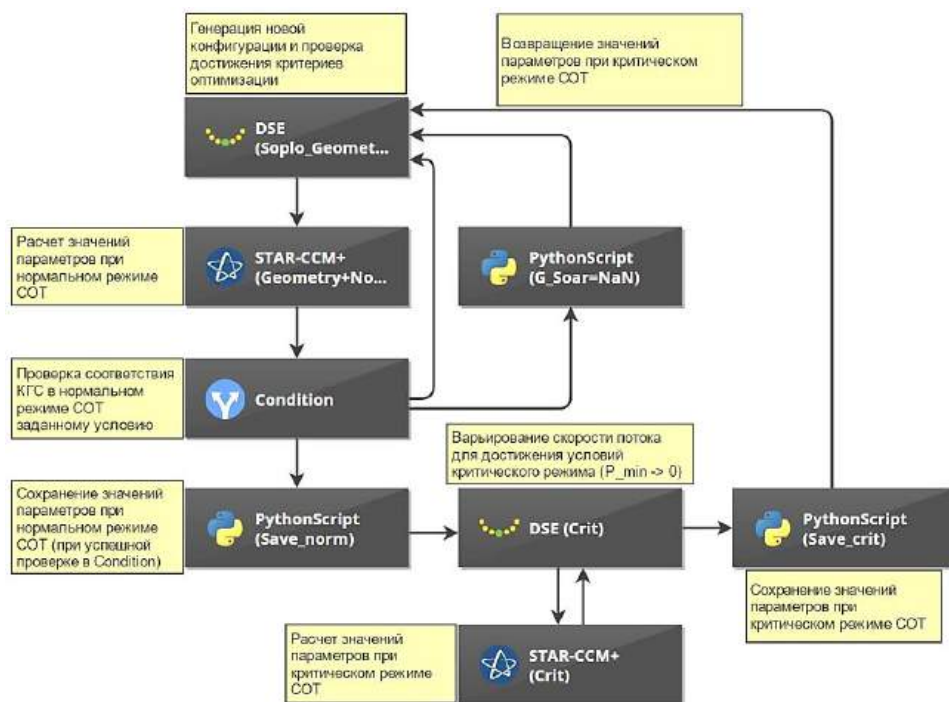


Рис. 4. Схема оптимизации геометрии COT в pSeven

### Заключение

Определены архитектура и функциональные требования к расчетным комплексам для решения различного класса оптимизационных задач, которые могут быть решены на этапах НИОКР.

Описанные в работе требования и архитектура будут положены в основу специализированных РКО, начало разработки которых планируется на ближайшее время.

### Литература

1. Адамов Е. О., Алексахин Р. М., Большов Л. А. и др. Проект "Прорыв" — технологический фундамент для круп-

номасштабной ядерной энергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 1. С. 5—12.

2. Большов Л. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Шмидт О. В. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 6. С. 303—312.

3. pSeven: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.datadvance.net/ru/product/pseven/> (дата обращения: 14.01.2019).

4. Назаренко А. М. Эффективный алгоритм многокритериальной суррогатной оптимизации [Электронный ресурс]. URL: [https://www.datadvance.net/assets/files/publications/Nazarenko\\_thesis.pdf](https://www.datadvance.net/assets/files/publications/Nazarenko_thesis.pdf) (дата обращения: 11.07.2019).

5. Бурнаев Е., Губарев Ф., Морозов С., Прохоров А., Хоминич Д. Многодисциплинарная оптимизация, анализ данных и автоматизация инженерных расчетов с помощью программного комплекса pSeven // CAD/CAM/CAE Observer. 2014. № 4 (88). С. 56—61.

## DEFINITION AND APPROBATION OF REQUIREMENTS FOR CALCULATION COMPLEXES FOR SOLVING THE OPTIMIZATION PROBLEMS OF THE PROJECT "PRORYV"

S. V. Sumarokov, T. K. Zhaboev, Ph. O. Novoselsky, M. V. Gusev, S. A. Korolev  
Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia

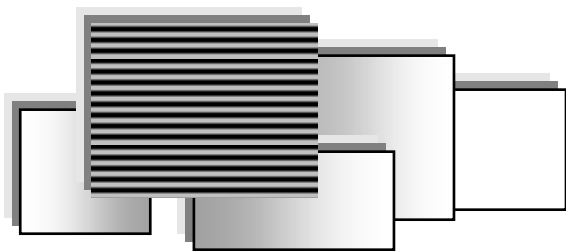
*The article presents the results of the development of requirements for the architecture of the calculational complex and pilot testing of the approach to solving optimization problems using the specialized pSeven software platform and the STAR-CCM+ software package.*

**Keywords:** calculation complex, multi-criteria optimization, software architecture.

Сумароков Сергей Вячеславович, заведующий отделом.  
E-mail: [sumarokov@ibrae.ac.ru](mailto:sumarokov@ibrae.ac.ru)  
Жабоев Тембулат Караканович, заведующий лабораторией.  
E-mail: [tembulat@ibrae.ac.ru](mailto:tembulat@ibrae.ac.ru)  
Новосельский Филипп Олегович, заместитель заведующего отделом.  
E-mail: [pn@ibrae.ac.ru](mailto:pn@ibrae.ac.ru)  
Гусев Михаил Владимирович, главный специалист.  
E-mail: [gusev@ibrae.ac.ru](mailto:gusev@ibrae.ac.ru)  
Королев Сергей Андреевич, инженер.  
E-mail: [sakor@ibrae.ac.ru](mailto:sakor@ibrae.ac.ru)

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2020 г.





## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВА

---

УДК 699.88

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦОД ОБЪЕКТОВ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ СОРБЦИОННОГО КАБЕЛЬНОГО СЕНСОРА

В. С. Кондратенко, д-р техн. наук; А. Ю. Рогов; А. Н. Кобыш, канд. техн. наук;  
М. Н. Семчуков, канд. техн. наук

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Е. В. Кондратенко, канд. техн. наук  
ООО «ТЕРМОИНТЕРФЕЙСЫ», Москва, Россия

М. А. Слепцов, канд. техн. наук  
ООО «Т8», Москва, Россия

Е. Н. Шкоркина  
ООО «Системы практической безопасности», Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрены тенденции развития центров обработки данных (ЦОД) объектов связи и применения эффективных систем охлаждения на жидкостном теплоносителе. Показаны подходы контроля протечек в ЦОД на основе существующих точечных и кабельных гидросенсоров, их недостатки и ограничения, связанные с принципом срабатывания при заливе. Приведено альтернативное решение — сорбционные кабельные сенсоры, обладающие высокой чувствительностью, на основе которых возможно построение систем контроля протечек и влажности среды в любой точке 3D-пространства в условиях локальных и протяженных объектов. Опыт практического внедрения сорбционных кабельных сенсоров в систему мониторинга и управления программного стека "РСК БазИС" суперкомпьютера им. Н. Н. Говоруна позволяет рассчитывать на повышение эффективности мониторинга инженерной инфраструктуры ЦОД в части контроля протечек, что позволит сократить время обнаружения аварийных событий и предпринять своевременные меры для минимизации ущерба.*

**Ключевые слова:** центр обработки данных, ЦОД объекта связи, теплоноситель, протечка, вода, жидкостное охлаждение, гидросенсор, сорбционный кабельный сенсор, система мониторинга инженерной инфраструктуры.

У телекоммуникационных и IT-компаний с каждым годом растет потребность в новых мощностях ЦОД. Цифровая составляющая телекоммуникационного бизнеса развивается в геометрической прогрессии, поэтому услуги дата-центров в мире и в России очень востребованы. Одно из перспективных направлений развития рынка информационных услуг — коммерческие центры обработки данных. Росту спроса на услуги ЦОД в России со стороны представителей крупного и среднего бизнеса поспособствовал также закон "О персональных данных", обязывающий иностранные компании хранить данные о своих российских клиентах на территории нашей страны [1].

Согласно данным iKS-Consulting, на период до 2021 г. этот рост составит порядка 20 % в год и телеком активно пошел в ЦОДы. Так, "Ростелеком" создал единый центр компетенций "Ростелеком-Центры обработки данных" (РТК-ЦОД), у которого в России по состоянию на октябрь 2019 г. в общей сложности работало 6686 стойко-мест [2].

Рост числа ЦОД, оснащение их инфраструктурой самым передовым IT и инженерным оборудованием, в том числе системами охлаждения и поддержания микроклимата, ставит перед системами мониторинга, контроля и безопасности ЦОД качественно новые задачи, одной из которых является повышение эффективности мониторинга и контроля протечек.

### Традиционные подходы по контролю протечек в ЦОД

Центр обработки данных представляет собой сложный технический объект, центральными элементами которого являются вычислительные узлы. В процессе своей работы вычислительные узлы 90 % входной мощности преобразуют в тепло, которое необходимо вывести за пределы машинного зала. Большинство систем охлаждения ЦОД в качестве теплоотводящей среды (теплоносителя) использует воздух. Чтобы этот воздух подавать с заданными физическими свойствами (охлажденным до нужной температуры, с определенным уровнем влажности, в требуемых объемах) задействован целый комплекс обслуживающего оборудования, также потребляющего электроэнергию и выделяющего тепло. По данным технического комитета Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, около 40 % всей электроэнергии, потребляемой дата-центром, приходится на систему охлаждения, причем 30 % расходуется компрессорами охлаждения [3].

Компания Google одной из первых начала эксперименты в области снижения затрат энергии на охлаждение серверов. Сначала реализовывались проекты по прямому и косвенному охлаждению серверов наружным воздухом. Впоследствии для решения данной задачи, например, в дата-центре Google недалеко от города Хамины (Финляндия) стали использовать воду Финского залива. В стадии согласования с местными властями находится проект использования подземных вод (штат Южная Каролина, США). Последние разработки Google в области использования технологий искусственного интеллекта требуют применения новейшего серверного оборудования, выделяющего колоссальную тепловую мощность, примерно в 8 раз превосходящую по возможностям воздушное охлаждение. Поэтому жидкостное охлаждение,

в том числе контактное, когда теплоноситель отводит тепло от тепловыделяющих элементов, является естественным способом улучшения теплообмена и повышения количества отводимой мощности [4].

По результатам анализа аналитической группы издательства OSP Data в большинстве российских ЦОД средний уровень мощности на стойку составляет от 3 до 10 кВт (рис. 1). Для их охлаждения достаточно эффективными являются классические системы охлаждения: фреоновые и чиллерные [5].

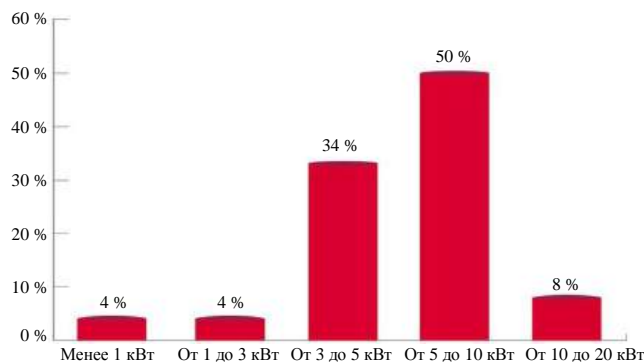


Рис. 1. Средний уровень мощности на стойку российских ЦОД (анализ по 30 объектам, 2016 г.)

Фреоновые системы имеют низкую стоимость, но обладают и низкой энергетической эффективностью, что повышает операционные расходы. Фреоновые системы — это решение для охлаждения небольших корпоративных ЦОД, насчитывающих до нескольких десятков стоек. Крупные коммерческие ЦОДы тоже используют фреоновые системы, но как правило, лишь в качестве дополнения к более эффективным решениям — чиллерным или естественному охлаждению.

Данные крупнейших отечественных ЦОД [6] представлены в таблице.

Крупнейшие ЦОД в России

Название	Сайт	Стойки	Мощность	На стойку	Общая S	S залов
DataPro	datapro.ru	3000	20 МВт	до 20 кВт	16000	
DataLine NORD-1,2,3,4	dtln.ru	2216	23 МВА		10763	
DataLine OST-1,2,3	dtln.re	1487	12 МВт		5769	
SDN	stackdata.net	1476	14 МВт	до 14 кВт	6500	
MMTC-9	mmts.ru	1449	15,3 МВт	до 24 кВт	40938	6700
LinxDaCenter	linxdacenter.ru	1400	12 МВт			9000
ТрастИнфо	servionica.ru	1200	8 МВА		6000	
DataSpace	dataspace.ru	1100	9,5 МВт	до 20 кВт	6565	3000
Сибирь	dc Siberia.ru	1050	1,2 МВт		1650	5000
Stack.M1	stacktelecom.ru	950	9 МВт	до 10 кВт	3850	1700
SafeData-2	safedata.ru	900	10 МВт		3500	1800
Цветочная-2	selectel.ru	850	4 МВт		2450	12000
Компрессор	croc.ru	800	8 МВт	6 кВт	5000	
LinxDaCenter	linxdacenter.ru	640	5 МВт		2500	
SafeData-1	safedata.ru	500	4 МВт		2000	1200
Нагорная	e-moskva.ru	380	6,8 МВт	до 17 кВт	2920	1400
Славянский	dc77.ru	288	4,4 МВт		600	
Дубровка-3	selectel.ru	250	2 МВт		800	1500
Дубровка-1	selectel.ru	240	2,5 МВт		750	1500
Дубровка-2	selectel.ru	240	2,5 МВт		800	1500
Миран-2	miran.ru	216	3,5 МВА	до 14 кВт	685	1115
DataHarbour	dataharbour.ru	212	2,2 МВт	до 8 кВт	567	1000
Цветочная-1	selectel.ru	200	2 МВт		700	1500
Акадо	akado-telecom.ru	192	1,8 МВт	до 10 кВт		1200
Берзарина	selectel.ru	160	0,8 МВт		500	900

Охлаждение большинства крупных ЦОДов, а вместе с ними и многих средних происходит с помощью охлажденной чиллерами воды, будь то воздушные кондиционеры серверного зала (CRAH), внутрирядные кондиционеры, кулеры на задней дверце, насосы для хладагента или даже непосредственное охлаждение на процессоре [7]. Чиллер — это холодильная система, которая производит охлажденную воду, циркулирующую через холодильное оборудование ЦОД, и предусматривает прокладку труб, установку насосов, баков-аккумуляторов и элементов запорно-разъемной арматуры [8].

Примерами внедрения эффективных технологий охлаждения могут служить ЦОДы объектов связи компании "Ростелеком": самый крупный объект ИТ-инфраструктуры Олимпийских игр (г. Сочи) [9]; ЦОД "Удомля", расположенный вблизи Калининской АЭС (Тверская обл.) [10]; первый опорный ЦОД "Ростелекома" на Урале (г. Екатеринбург) [11]; ЦОД "NORD-4", принадлежащий компании "DataLine", приобретаемой дочерней структурой "Ростелекома" — компанией "РТК-ЦОД" (г. Москва) [12].

Следует отметить, что ЦОД "Ростелекома" "Удомля" на площадке Калининской АЭС явля-

ется самым крупным проектом в России и одним из крупнейших в Европе с общей проектной мощностью 4800 стоек, потребляющих 48 МВт. Другим, не менее уникальным по масштабам является ЦОД "Сбербанк" — один из крупнейших в Европе и самый большой в России, построенный на территории Фонда "Сколково". Общая площадь ЦОД "Сбербанк" — около 33 тыс. м<sup>2</sup>, на которых размещены 20 машинных залов по пять блоков с возможностью установки до 24 тыс. серверов с установленной мощностью 31,2 МВт [13].

Общим у систем охлаждения перечисленных ЦОД за исключением ЦОД "Сбербанк", использующего режим свободного охлаждения (прямой фрикуллинг) [14], является использование в качестве теплоносителя воды или растворов гликолей, проводящих электрический ток и не представляющих угрозы электронному оборудованию, что требует от операторов ЦОД ответственного отношения к выбору и построению систем контроля протечек.

На рис. 2 приведены примеры оборудования систем охлаждения рассматриваемых ЦОД (показаны машинные залы, в которых еще не установлены серверные стойки).



Рис. 2. Элементы систем охлаждения ЦОД "Ростелекома":

а — серверные стойки с серверами HP, чиллерное охлаждение сочетается с водяным в высоконагруженных стойках (г. Сочи); б — шкафные прецизионные кондиционеры STULZ с внешним водяным контуром и нижней подачей воздуха (г. Удомля, Тверская обл.); в — шкафные прецизионные кондиционеры STULZ с внешним водяным контуром и трубопроводная система (г. Екатеринбург); г — шкафные прецизионные кондиционеры STULZ с внешним водяным контуром, трубопроводы технического этажа и чиллеры на крыше (г. Москва)

Анализ технических решений рассмотренных систем охлаждения ЦОД позволяет выделить следующие потенциальные источники протечек: кондиционеры, трубопроводы, чиллеры, циркуляционные насосы, накопительные баки-аккумуляторы, элементы запорно-разъемной арматуры (разъемы, краны, клапана, патрубки) и т. д.

Следует отметить, что размещение элементов системы охлаждения ЦОД "NORD-4" (технический этаж с трубопроводами на 4-м этаже, чиллеры на крыше) над машинными залами (2—3 этажи) (рис. 3) является эффективным проектным решением, но значительно повышает риски залива серверов при протечке [15].

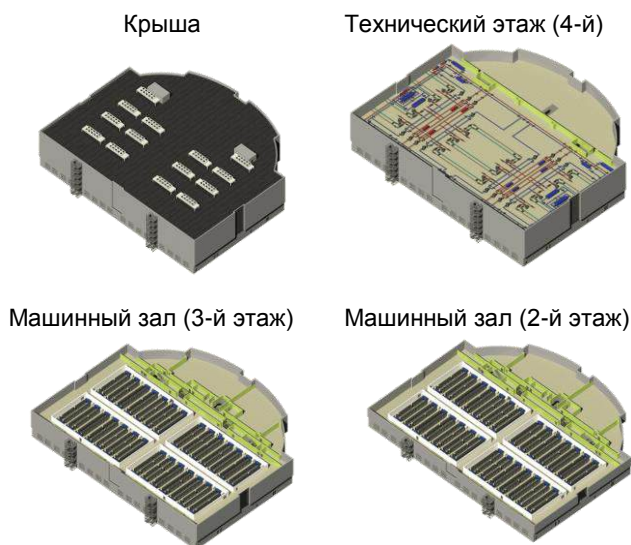


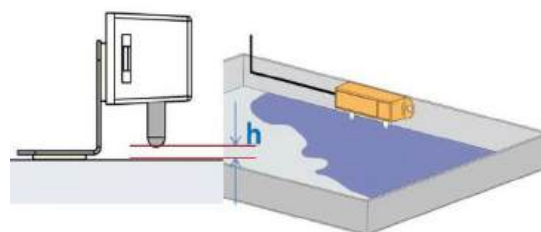
Рис. 3. Размещение элементов чиллерной системы охлаждения над машинными залами

Другими источниками протечек могут быть сами крыши зданий ЦОД, элементы систем отопления и водоснабжения, засорение дренажных отверстий слива конденсата из кондиционеров и т. д.

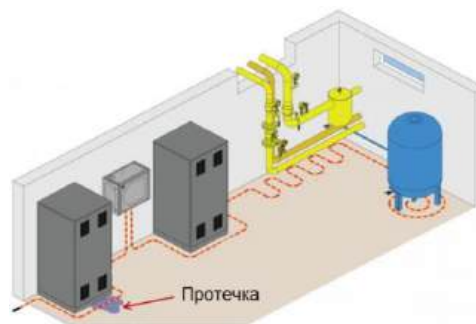
Существующие системы контроля протечек в ЦОД используют точечные и кабельные гидросенсоры, которые размещают в непосредственной близости от возможных источников протечек. В частности, для ЦОД и серверных комнат с фальшполами дают следующие рекомендации по контролю протечек:

- протекающие кондиционеры (датчик протечки должен быть установлен под каждым кондиционером);
- протечка воды через крышу (датчики протечки должны стоять по периметру комнаты на расстоянии около 50 см от внешних стен и под фальшполами);
- протечка труб водоснабжения (датчики воды должны располагаться под фальшполом) [16].

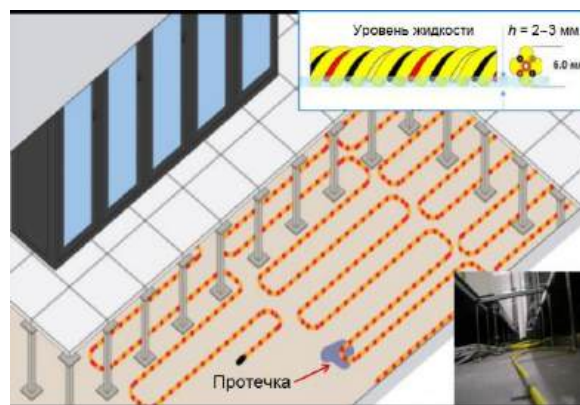
Примеры размещения точечных и кабельных гидросенсоров контроля протечек в ЦОД приведены на рис. 4.



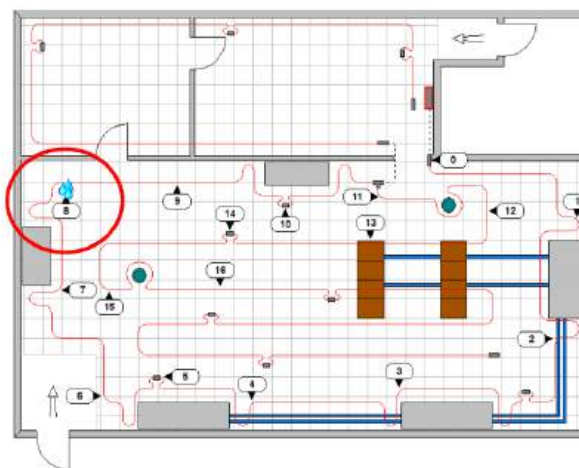
а



б



в



г

Рис. 4. Основные способы размещения традиционных гидросенсорных датчиков в ЦОД:

а — точечный, в поддонах (лотках) для сбора жидкости; б — кабельный, в отдельном помещении на полу, огибая потенциальные источники протечек; в — кабельный большой длины, под фальшполом для контроля всей площади серверного зала; г — пример карты привязки размещения кабеля к схеме расположения оборудования



Следует отметить, что для защиты от ложных тревог у традиционных точечных и кабельных гидросенсоров сенсорные контакты приподняты над поверхностью размещения на уровень  $h$  в 2—3 мм и условием срабатывания является скопление жидкости протечки (лужи) вокруг датчика или участка кабеля такого же слоя или более [17—19].

В зависимости от площади контролируемого объекта (локального или протяженного) местоположение протечки с помощью традиционных точечных и кабельных гидросенсоров можно определять зонным или линейным методами. Инструментом реализации зонного метода контроля служат точечные датчики и отрезки гидросенсорных кабелей ограниченной длины, каждому из которых соответствует своя зона контроля. Например, точечные датчики могут быть установлены в поддонах под кондиционерами (рис. 4, а), и срабатывание датчика однозначно определит кондиционер-источник протечки. Два отрезка кабеля в помещении с небольшой площадью (локальный объект) на рис. 4, б контролируют каждый свою группу оборудования (слева и справа от блока управления). Срабатывание одного из кабелей определяет группу оборудования, в которой произошла протечка.

Для контроля протечек на протяженных объектах большой площади, например серверного зала ЦОД, применяют один или несколько линейных кабельных гидросенсоров большой длины, размещая их под фальшполом (рис. 4, в) по определенной схеме, привязанной к схеме размещения оборудования. При заливе какого-либо участка гидросенсорного кабеля водой (попадание участка кабеля в лужу) замыкаются его сенсорные жилы и по изменившемуся сопротивлению электрической цепи вычислительное устройство определяет расстояние до точки замыкания [20]. По карте привязки размещения кабеля к схеме расположения оборудования определяют оборудование-источник протечки (рис. 4, г).

Ограничения традиционных гидросенсоров, связанные с принципом срабатывания "в луже", не позволяют размещать их на потолках, наклонных поверхностях, непосредственно на трубопроводах и в других местах, где лужа не может образоваться. Время, в течение которого протекающая жидкость будет скапливаться вокруг сенсора, является временем задержки обнаружения протечки, в течение которого ущерб может развиваться.

Для сокращения времени обнаружения протечек и минимизации ущерба в России разработано семейство высокочувствительных сорбционных кабельных сенсоров (СКС), позволяющих детектировать протечки по первым их признакам (появление капель, микротечей) [21—23].

### Сорбционный кабельный сенсор — новые возможности по контролю протечек в ЦОД

Основное отличие СКС от существующих гидросенсоров — его высокая чувствительность, обусловленная сорбционным принципом взаимодействия сорбционной оболочки как с жидкостью протечки, так и с ее парами. Экспериментально подтвержденный порог чувствительности СКС — 50 мг воды (капля из пипетки). Также электрические параметры сорбционного кабеля чувствительны к изменениям уровня относительной влажности воздуха [24, 25].

Основные конструкции СКС, двухжильного и коаксиального, представлены на рис. 5.

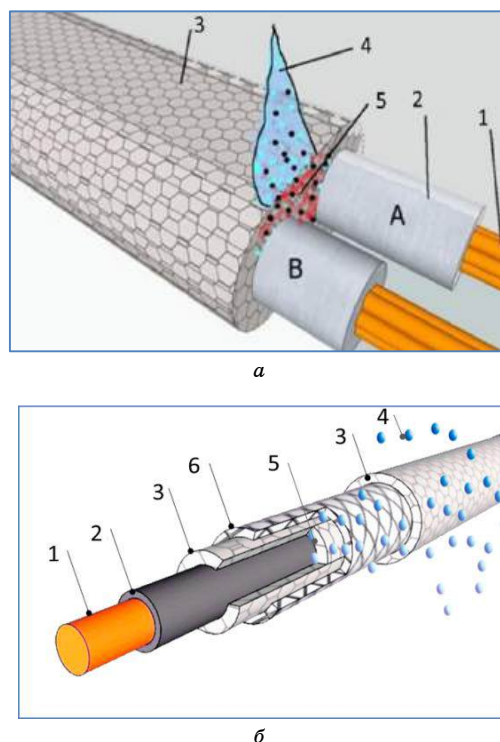


Рис. 5. Основные конструкции сорбционного кабельного сенсора, двухжильного (а) и коаксиального (б):

1 — металлические проводники; 2 — композитная электропроводящая оболочка; 3 — сорбционная оболочка; 4 — вода (молекулы воды — пар); 5 — местоположение увлажнения; 6 — металлический сетчатый экран

При соприкосновении СКС с каплей или молекулами воды (паром) 4 в сорбционной оболочке 3 за счет адсорбции накапливаются молекулы воды. Наиболее сильное влияние на изменение электрических сопротивления и емкости у двухжильного кабеля происходит при накоплении молекул воды в области 5, т. е. между композитными электропроводящими оболочками 2 жил А и В, а у коаксиального — в сорбционной оболочке 3, т. е. между композитной электропроводящей оболочкой 2 и металлическим сетчатым экраном 6. При этом общее электрическое сопротивление у рассмотренных конструкций СКС падает, а электрическая емкость растет.

Экспериментальные исследования показали, что за счет высокой чувствительности и возможности детектировать первые признаки протечек (появление капель, микротечей) СКС можно размещать в любой точке 3D-пространства, где протечки наиболее вероятны [26].

Для обнаружения факта протечки подходят обе конструкции СКС, так как время их реакции на контакт с каплей воды или микротечью составляет единицы секунд. При этом падение электрического сопротивления СКС при дальнейшем намокании кабеля (зависимость электрического сопротивления от длины замкнутого участка) носит нелинейный характер с переходом в зону нечувствительности, а рост значений электрической емкости с длиной замкнутого участка характеризуется зависимостью, близкой к линейной. Данные результаты исследований открывают возможность контролировать степень замкания кабеля и динамику развития протечки по изменению значения электрической емкости сработавшего СКС [27].

Примером организации зонного контроля протечек может служить внедрение сорбционно-кабельного сенсора в качестве сенсора протечек и влажности в вычислительные узлы с жидкостным охлаждением российского суперкомпьютера им. Н. Н. Говоруна (рис. 6), размещенного в лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Московская обл.) [28].

Система мониторинга и управления программного стека "РСК БазИС" суперкомпьютера им. Н. Н. Говоруна в реальном масштабе времени контролирует электрические параметры всех СКС, имеющих идентификационные номера, и по специальным программным алгоритмам определяет текущие значения влажности и статус протечки в вычислительных узлах суперкомпьютера.

Почти годовой опыт эксплуатации системы контроля вычислительного поля суперкомпьютера им. Н. Н. Говоруна показал ее высокую эксплуатационную надежность и способность

зарегистрировать нетипичное отклонение уровня влажности в одном из вычислительных узлов относительно соседних. Вывод из эксплуатации и диагностика данного узла позволили выявить парение теплоносителя через микротрещину в разъеме контура охлаждения, что фактически предотвратило развитие протечки.

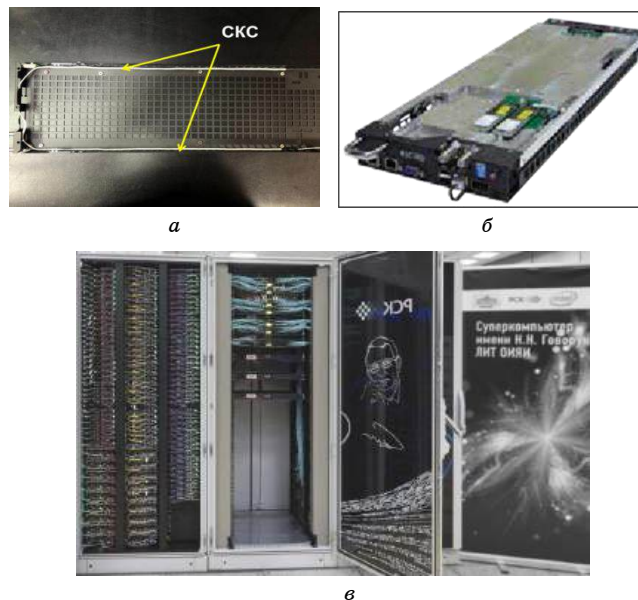
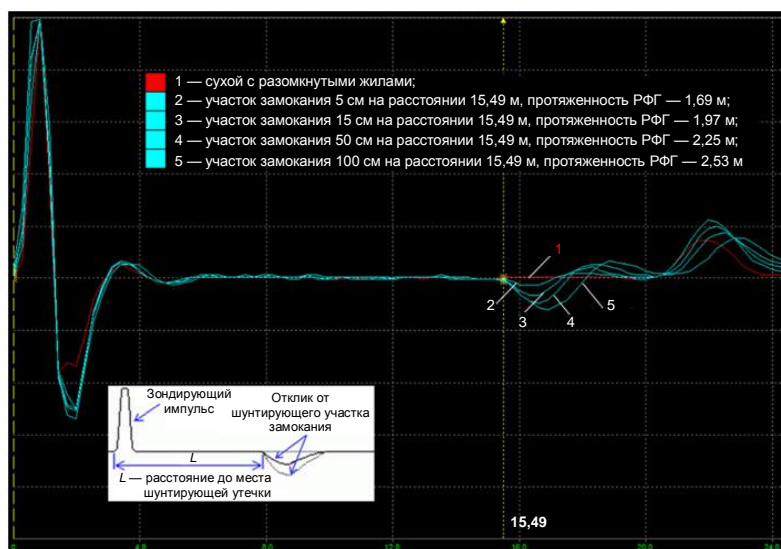


Рис. 6. Внедрение сорбционного кабельного сенсора в вычислительные узлы с жидкостным охлаждением суперкомпьютера им. Н. Н. Говоруна для контроля протечек и влажности:

а — СКС размещается по внутреннему периметру корпуса вычислительного узла; б — вычислительный узел в сборе; в — высокоплотное размещение вычислительных узлов

В случае необходимости контроля протечек на больших площадях возможно использование линейных СКС большой длины и метода импульсной рефлектометрии для определения местоположения участка замкания кабеля. По виду получаемых рефлектограмм можно качественно оценить длину замкнутого участка и динамику развития протечки (рис. 7) [29].

Рис. 7. Динамика изменения вида рефлектограммы в зависимости от увеличения длины участка замкания коаксиального СКС

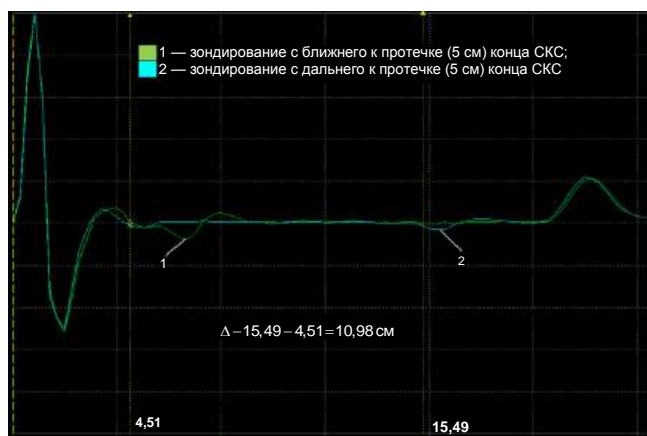




Следует отметить, что для целей рефлектометрии предпочтительнее использовать коаксиальный СКС, так как в нем условия распространения для зондирующих импульсов из-за меньшего волнового сопротивления лучше, чем у двужильного [30].

Анализ рис. 7 показывает, что по мере увеличения длины участка замкания кабеля растет амплитуда отклика отрицательной полярности и его длина вдоль горизонтальной оси расстояний, причем длина отклика на рефлектограмме значительно превышает физический размер замкания СКС.

Для повышения точности определения размера замкнутого участка зондирование следует производить с обоих концов кабельного сенсора. Разница полученных расстояний до начала замкнутого участка будет близка к физическому размеру замкания (рис. 8).



**Рис. 8. Результат зондирования коаксиального СКС длиной 20 м с противоположных концов от участка замкания протяженностью 5 см:**

1 — расстояние до протечки 4,51 м; 2 — расстояние до протечки 15,49 м; вычисленная по результатам измерений протяженность участка замкания  $\Delta = 10,98$  см

Для повышения эффективности мониторинга инженерной инфраструктуры ЦОД объектов связи в части контроля протечек и уровня влажности среды целесообразно использовать сорбционные кабельные сенсоры, которые можно размещать непосредственно на объектах инфраструктуры — источниках возможных протечек.

Такими местами размещения СКС могут быть:

- трубопроводы систем охлаждения; СКС стяжками прикрепляется к нижней части трубы на горизонтальных участках и по спирали — на вертикальных;
- перекачивающие насосы, запорные краны, фланцы; СКС на стяжках прокладывается по точкам наиболее вероятного движения первых микротечей от протечки;

- потолочные контуры серверных залов ЦОД, технических этажей, крыш;

- критические точки внутреннего пространства кондиционеров, из которых может начаться протечка;

- внутреннее пространство корпусов вычислительных узлов с жидкостным охлаждением и серверных шкафов, в которых циркулирует теплоноситель;

- элементы системы водоснабжения и отопления ЦОД, трубы, радиаторы и другие места в 3D-пространстве.

### Заключение

В ЦОД все большее распространение получают системы охлаждения с развитыми системами циркуляции теплоносителя в виде воды или растворов гликолей, при этом риск ущерба от протечек повышается.

Контроль протечек в ЦОД осуществляется с помощью традиционных точечных и кабельных гидросенсоров, принцип срабатывания которых основан на заливе слоем воды определенного уровня, что накладывает ограничения на места их размещения и вызывает объективную задержку во времени обнаружения протечки, в течение которого ущерб продолжает развиваться.

Результаты исследований и опыт практического внедрения СКС, разработанных в России, демонстрируют возможность размещения СКС в любой точке 3D-пространства и детектирование с их помощью первых признаков протечек в виде появления капель и микротечей, а также возможность контроля изменения уровня влажности окружающего кабель пространства. С помощью СКС можно детектировать протечки на ограниченных площадях локальных объектов с применением зонного принципа контроля и на протяженных объектах большой площади с использованием линейных кабелей большой длины. При этом после обнаружения протечки возможно определить ее местоположение, масштаб и динамику развития.

Данные выводы открывают перспективы внедрения СКС в системы контроля протечек, прежде всего для контроля чиллерных систем охлаждения, перспективных контактных жидкостных систем охлаждения закрытого типа, а также контроля протечек таких объектов инфраструктуры ЦОД, как крыши, системы отопления и водоснабжения.

Повышение эффективности мониторинга инженерной инфраструктуры ЦОД в части контроля протечек позволит сократить время обнаружения аварийных событий, связанных с протечками, и предпринять своевременные меры для минимизации ущерба.

## Литература

1. Телекоммуникации и связь, центры обработки данных [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://euroetpao.ru/otrasli/telekommunikatsii-i-svyaz-tsentry-obrabotki-dannykh/> (дата обращения: 25.12.2019).
2. "Ростелеком" лидирует в рейтинге IKS Consulting российского рынка коммерческих ЦОДов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.company.rt.ru/press/news/d452424/> (дата обращения: 25.12.2019).
3. Обзор рынка систем жидкостного охлаждения для ЦОД [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://servernews.ru/924318> (дата обращения: 25.12.2019).
4. Охлаждение серверов в ЦОД — Новости от Google, Vapor IO, Panasonic и Axiom Exergy [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://telecombloger.ru/97154> (дата обращения: 25.12.2019).
5. Инженерная инфраструктура российских ЦОДов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osp.ru/lap/2016/06/13049346/> (дата обращения: 25.12.2019).
6. Родные ЦОДы: обзор российских дата-центров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/poiskvps/blog/324994/#1> (дата обращения: 25.12.2019).
7. Ожидаемые улучшения в работе охлаждающих систем ЦОДа [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.alldc.ru/experts/2573.html> (дата обращения: 25.12.2019).
8. Кондиционирование ЦОД среднего размера [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://mir-klimata.info/archive/2018\\_1/kondicionirovanie\\_cod\\_srednego\\_gazmera/](https://mir-klimata.info/archive/2018_1/kondicionirovanie_cod_srednego_gazmera/) (дата обращения: 25.12.2019).
9. Экскурсия в ЦОД "Ростелеком" в Сочи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osp.ru/dcworld/2013/02/13034030.html> (дата обращения: 25.12.2019).
10. Строительство ЦОДа на базе Калининской АЭС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nag.ru/articles/article/27265/stroitelstvo-tsoda-na-baze-kalininskoy-aes.html> (дата обращения: 25.12.2019).
11. Первый опорный ЦОД "Ростелекома" на Урале [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nag.ru/articles/article/105856/pervyy-opornyy-tsod-rostelecoma-na-urale.html> (дата обращения: 25.12.2019).
12. Совет директоров "Ростелеком" одобрил приобретение компании "ДатаЛайн" АЭС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.company.rt.ru/press/news/d452945/> (дата обращения: 25.12.2019).
13. Сбербанк открыл в Сколково самый большой в России ЦОД [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sk.ru/news/b/news/archive/2017/12/18/sberbank-otkryl-v-skolovo-samy-bolshoy-v-rossii-cod.aspx> (дата обращения: 25.12.2019).
14. Удивительные, но настоящие: энергоэффективные системы охлаждения действующих и проектируемых ЦОД в России и за рубежом ЦОД [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://mir-klimata.info/archive/2018\\_6/sistemi-ohlazhdeniya-deistvujushih-i-proektiruemih-cod/](https://mir-klimata.info/archive/2018_6/sistemi-ohlazhdeniya-deistvujushih-i-proektiruemih-cod/) (дата обращения: 25.12.2019).
15. Дата-центр NORD-4. Залы NORD-4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dtl.ru/tsod-nord4> (дата обращения: 25.12.2019).
16. Мониторинг серверной комнаты и ЦОД. Рекомендованные стандарты и лучшие практики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.netping.ru/Blog/monitoring-servernoj-komnaty-i-tsod-rekomendovannye-standarty-i-luchshie-praktiki> (дата обращения: 25.12.2019).
17. Data Center Monitoring [Электронный ресурс]. (дата обращения: 25.12.2019).
18. Датчик протечки воды, установка и монтаж [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.equicom.ru/sensors-and-device/29-datchik-protechki.html> (дата обращения: 25.12.2019).
19. Системы обнаружения и локализации утечек TraceTek [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.intel-a.ru/downloads/TraceTek%20Ubersicht.pdf> (дата обращения: 25.12.2019).
20. TraceTek sensing circuit [Электронный ресурс]. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/50489863/r-tracetek-leak-detection-product-selection-guide-for-water/33> (дата обращения: 25.12.2019).
21. Сакуненко Ю. И., Кондратенко В. С. Датчик утечек электропроводящих жидкостей. Патент РФ № 2545485. Заявка № 2013155730 от 17.12.2013.
22. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. Датчик влажности. Патент РФ № 179730. Заявка № 2018104563 от 06.02.2018.
23. Кондратенко В. С., Rogov A. Ю. Кабельный сенсор влажности и протечек. Патент РФ № 186924. Заявка № 2018137133 от 22.10.2018.
24. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Бурляй Д. А. Новые достижения в гидросенсорике // Приборы. 2016. № 9. С. 28—31.
25. Кондратенко В. С., Rogov A. Ю., Андреев Н. М., Дружинин Е. А., Катенев А. В. Особенности обнаружения протечек с помощью сорбционного кабельного сенсора в условиях колебаний относительной влажности воздуха: сб. докл. конф. "Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике". — М.: РТУ МИРЭА, 2019. Т. 2. С. 30—43.
26. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. Сорбционный гидросенсорный кабель — новые возможности // РИТМ машиностроения. 2015. № 1. С. 40—42.
27. Кондратенко В. С., Rogov A. Ю., Сакуненко Ю. И., Сорокин А. В. Разработка методов определения места и размеров протечек с помощью сорбционного гидросенсорного кабеля // Контроль. Диагностика. 2018. № 5. С. 32—37.
28. Rogov A. Ю. Повышение эффективности обнаружения протечек с помощью сорбционных кабельных сенсоров // Базис. 2019. № 2 (6). С. 21—28.
29. Кондратенко В. С., Rogov A. Ю., Сакуненко Ю. И. Повышение эффективности определения местоположения и масштаба протечки с помощью сорбционного кабельного сенсора рефлектометрическим методом // Приборы. 2019. № 10. С. 6—10.
30. Метод импульсной рефлектометрии (TDR). Как найти обрыв [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometrija/> (дата обращения: 25.12.2019).

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF MONITORING THE ENGINEERING INFRASTRUCTURE OF DATA CENTERS OF COMMUNICATION FACILITIES USING A SORPTION CABLE SENSOR

V. S. Kondratenko, A. Yu. Rogov, A. N. Kobysh, M. N. Semchukov  
MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

E. V. Kondratenko  
LLC "TERMOINTERFEYS", Moscow, Russia

M. A. Sleptsov  
LLC "T8", Moscow, Russia

E. N. Shkorkina  
LLC "Practical Security Systems", Saint-Petersburg, Russia

*The paper discusses current trends in the development of data centers of communication facilities and the use of efficient cooling systems on a liquid coolant. Modern approaches to control leaks in the data center based on existing point and cable hydrosensors, their disadvantages and limitations associated with the principle of operation — at the Bay are shown. An alternative solution is presented — sorption cable sensors with high sensitivity, on the basis of which it is possible to build systems for monitoring leaks and humidity of the environment at any point in 3D space in the conditions of local and extended objects. Experience of practical implementation of sorption cable sensors in the monitoring and control system of the RSC Basis software stack of the supercomputer. N. N. Govoruna allows us to count on improving the efficiency of monitoring the engineering infrastructure of the data center, in terms of monitoring leaks, which will reduce the time of detecting emergency events and take timely measures to minimize damage.*

**Keywords:** data center, data center of the communication object, coolant, leak, water, liquid cooling, hydro sensor, sorption cable sensor, monitoring system of engineering infrastructure.

---

**Кондратенко Владимир Степанович**, профессор.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Рогов Александр Юрьевич**, заместитель директора по инновационному развитию.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Кобыш Алина Николаевна**, доцент.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Семчуков Михаил Николаевич**, доцент.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Кондратенко Елена Владимировна**, заместитель генерального директора по маркетингу и связям с общественностью.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Слепцов Михаил Алексеевич**, заместитель генерального директора.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Шкоркина Елена Николаевна**, специалист по защите информации.

E-mail: vsk1950@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 20 января 2020 г.*

## ОБЗОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ И ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ СЕРВЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА, ОСНОВАННОГО НА АРХИТЕКТУРЕ RESTful

<sup>1,2</sup>В. И. Анисимов, д-р техн. наук; <sup>2</sup>С. А. Васильев, канд. техн. наук;

<sup>1</sup>И. А. Евдокимов; <sup>1</sup>О. Б. Тарасова

<sup>1</sup>ФГБУ «Центр информационных технологий в проектировании РАН»,  
г. Одинцово, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,  
Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрена методика построения систем автоматизации тестирования и документирования API серверной составляющей веб-сервиса, имеющая большую актуальность при реализации распределенных систем. Описаны типы тестирования для точек подключения (endpoints) архитектуры построения веб-служб RESTful API и их основные отличия. Интерпретирована концепция стратегии Shift Left применительно к организации процесса тестирования программного обеспечения. Сформулированы требования, предъявляемые к автоматизированным средствам тестирования серверной составляющей веб-сервиса. Приведены способы документирования API серверной составляющей и выделена совокупность факторов, определяющая наиболее эффективный подход к автоматизации документирования API. Произведен сравнительный анализ автоматизированных средств тестирования и документации серверной API. Рассмотрен пример использования специализированного программного обеспечения для автоматизации тестирования и документирования серверной составляющей. Проведена параллель между требованиями, предъявляемыми к автоматизированным средствам тестирования, документации, и функционалом, предоставляемым приложением Postman для автоматизации тестирования и документирования.*

**Ключевые слова:** распределенное ПО, веб-сервисы, API, RESTful, endpoint, Shift Left, автоматизация тестирования, автоматизация документирования, Postman.

Разработка распределенного программного обеспечения (ПО), в частности построение веб-сервисов на основе REST-архитектуры, подразумевает работу сервера с гетерогенной клиентской средой. Созданием составляющих веб-сервиса могут быть заняты разные группы программистов с применением различных технологий, языков и сред разработки. При этом основной парадигмой REST-архитектуры является работа с ресурсами, а не с операциями, в отличие от альтернативных технологий организации веб-сервисов (например, SOAP). Однако при работе над ресурсами, соответственно, и интерфейс ограничивается различными вариациями базовых CRUD-операций, что в теоретическом плане не требует описания. Учитывая реальные условия разработки программного обеспечения, можно выделить ряд факторов, требующих наличия в документировании точек подключения к серверу. Например, такие факторы, как изменение состава группы разработчиков или отпуск сотрудника, требуют восстановления в памяти человека незавершенного процесса поставленных задач на основе описывающей документации. Принимая во внимание описанные аспекты разнородности клиентского программного обеспечения, при построении серверной составляющей требуется решать задачи строгой регламентации и документирования точек подключения RESTful API. В дополнение к этому процессы создания серверных и клиентских частей могут быть разнесены во времени, что тре-

бует применения дополнительных программных средств отладки для сервера приложения. Необходимо подчеркнуть, что неразрешенные исключительные ситуации в логике, описывающей endpoint API, могут привести к новым исключениям как на серверной, так и на клиентской составляющей, которые, в свою очередь, могут повлиять на качество исполнения задач, возложенных на сервис в целом. Согласно изложенному актуальной задачей является решение проблемы автоматизации тестирования и документирования RESTful API серверной составляющей веб-сервиса.

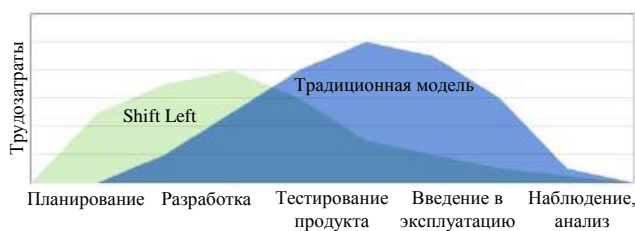
### Тестирование API

В индустрии разработки программного обеспечения все больше внимания уделяется процессу тестирования. Появилась целая стратегия тестирования, именуемая Shift Left, основными принципами которой являются следующие:

- время начала тестирования совпадает со стартом разработки программного обеспечения, что позволяет предотвращать дефекты, а не находить их в конце разработки;
- непрерывное тестирование для уменьшения дефектов продукта;
- автоматизация тестирования.

Все приведенные принципы работают в целях сокращения сроков реализации программного продукта и увеличения его качества, что, в

свою очередь, приводит к сокращению расходов на разработку и сопровождение [1]. На рисунке приведено сравнение трудозатрат при использовании различных концепций тестирования.



**Сравнение трудозатрат концепций тестирования**

Следует разделить два принципиально разных уровня тестирования для endpoint RESTful API. Первым уровнем является модульное тестирование, производимое разработчиком, имеющим доступ к исходному коду, и охватывающее базовый функционал. Вторым уровнем является API-тестирование, которое тестировщик производит с использованием, как правило, метода черного ящика, абстрагируясь от внутреннего устройства, охватывающего полный функционал и любые другие внешние воздействия, согласно техническим требованиям и спецификациям, предъявляемым к тесту [2].

Создание API зачастую связано с интеграцией сервиса в систему, в которой с ним взаимодействуют не только клиентские приложения, но и другие сервисы. Это накладывает следующие требования на тестирование: проверка функциональности, нагрузочное тестирование, контроль безопасности. Для организации нагрузочного тестирования необходимо предусмотреть возможность отправки серий запросов и взаимодействия между запросами (обмен информацией для формирования нового запроса на базе ответа от предыдущего). Для осуществления контроля безопасности ответ на запрос должен проходить автоматизированную семантическую проверку. Проверка функциональности определяется техническим заданием на тестирование.

К наиболее распространенным проблемам при тестировании API можно отнести комбинацию и выбор параметров запроса, отсутствие графического интерфейса программного обеспечения или сложность его управления, валидацию и верификацию выходных данных в разных системах, проверку обработки исключений, а также необходимость знаний в области программирования для тестировщика [3].

Исходя из описанного можно сформировать требования к средствам автоматизации тестирования: возможность проведения модульного и API-тестирования, наличие консольного (для возможности интеграции) и графического интерфейса, возможность организации серии запросов, их взаимодействия и семантического анализа.

## Документирование API

Существует несколько основных подходов к написанию документации:

- создание документации вручную на основе собственных представлений о работе сервиса;
- автоматическая генерация документации по комментариям в коде endpoint RESTful API;
- автоматическая генерация документации по коду серверной составляющей;
- автоматическая генерация документации к методам API на основе проводимых тестов (ответов сервера).

Подходы к генерации документации по коду и на основе проводимых тестов можно считать наиболее достоверными, так как при описании запросов и ответов на них в основе лежат или программный код, или непосредственная работа с сервером. Ручной подход или работа с комментариями не требуют специализированного программного обеспечения.

К особенностям автоматического подхода на основе ответов сервера можно отнести:

- поддержку актуальности документации, так как в любой момент времени можно в автоматическом режиме запустить тест и получить подробное описание API;
- доступ к исходному коду серверной составляющей не требуется;
- отсутствие зависимости от языков программирования и использованного в API фреймворка;
- возможность подготовки машиночитаемой документации.

На основе описанных особенностей можно считать автоматический подход наиболее целесообразным.

## Сравнительный анализ средств автоматизации тестирования и документирования

Наблюдается рост популярности способа организации программного обеспечения посредством веб-сервисов. Он основан на ряде преимуществ, определяемом текущим состоянием среды (инфраструктуры). Этот рост ведет к увеличению интереса в области автоматизации процесса тестирования и документирования среди разработчиков. Например, согласно исследованиям Google, запрос API-testing (<https://trends.google.com/trends/explore?date=today%205-y&q=api%20testing>) набирает популярность от года к году. Использование инструментов и технических решений для автоматизации тестирования API, являющихся частью концепции Shift Left, становится не просто решением по контролю за качеством, а возводится в статус одного из принципов успешной реализации программного обеспечения.

Существует большое количество программных средств, позволяющих как разноуровневое

тестирование, так и документирование серверного API. К наиболее популярным программным обеспечениям в указанной предметной области можно отнести SoapUI, Postman, Katalon Studio, Tricentis Tosca, Apigee, JMeter, Rest-Assured, Assertible, Karate DSL и т. д. Все они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к автоматизированным средствам тестирования, и способны генерировать документацию к методам API на основе проводимых тестов.

По мнению авторов, оптимальным сочетанием функционального оснащения и качества исполнения пользовательского интерфейса для автоматизации тестирования и документирования RESTful API обладает приложение Postman. К его положительным особенностям можно отнести наличие клиентов для различных популярных операционных систем и возможность работы с расширением Google Chrome. В дополнение к этому его основной функционал предоставляется бесплатно.

#### **Процесс автоматизации тестирования и документирования на примере приложения Postman**

Перед началом процесса автоматизации тестирования необходимо описать техническое задание: функции сервера, которые будут тестироваться, сроки проведения работ, форму предоставления результата [4].

Приложение Postman оперирует коллекциями. Это упорядоченные по различным параметрам наборы запросов на сервер (файл проекта). Упорядочивание производят по папкам, объединяя запросы или другие папки в одну группу внутри коллекции. Создание запросов осуществляют в специальном конструкторе, способном работать со всеми стандартными HTTP-методами и позволяющим конфигурировать заголовки, cookie и тело запроса. Особенность запросов в приложении Postman определяется тем, что при осуществлении разбора ответа на запрос имеется возможность сконфигурировать следующий запрос на основе полученных и имеющихся в коллекции данных, которые хранятся в различных областях видимости: глобальные переменные, переменные коллекции, переменные окружения, локальные переменные, переменные уровня данных.

Приложение Postman позволяет создавать скрипты в среде исполнения JavaScript на различных уровнях иерархии вплоть до уровня коллекции. Используя скрипты, можно подготовить запрос и обработать ответ, обеспечивая тем автоматизацию тестирования. В дополнение к этому программное обеспечение предоставляет шаблоны (сниппеты) для формирования тестов. Используя переменные окружения, например cookie или token, и скрипты формирования запроса/разбора ответа, можно тестировать без-

опасность доступа к точкам подключения сервера и осуществлять контроль предоставляемой информации.

Нагрузочное тестирование представляет встроенный инструмент Collection Runner. Он обеспечивает настройку количества итераций запросов, групп запросов или коллекции. Порядок выполнения также можно определить пользователю. После выполнения всех запросов формируется отчет, который покажет количество успешно и неуспешно пройденных тестов.

Существуют два способа экспорта коллекций (интерактивной документации к API): с помощью создания файла коллекции в формате JSON (может быть машиночитаемым) и по предоставлению URL-коллекции, с которой можно работать в веб-интерфейсе или импортировать ее в локальную версию приложения Postman.

Приложение Postman предоставляет различные возможности для тестирования API от создания запроса до проведения автоматизированных нагрузочных действий, что делает инструмент универсальным как для разработки, так и для тестирования программного обеспечения. Также предлагаются проверка безопасности путем установки правил разбора ответа сервера и несколько видов экспорта отчетной документации, в том числе и машиночитаемой. Таким образом, это приложение полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к автоматизированным средствам тестирования и генерации документации.

#### **Выводы**

Тестирование и документирование серверного API, основанного на архитектурном стиле взаимодействия компонентов распределенного приложения в сети RESTful, является ключом к сокращению сроков реализации и увеличению качества такой формы программного обеспечения, как веб-сервис. Автоматизация в сфере указанных процессов позволяет повысить их эффективность для обеспечения ключевых показателей, что приводит к снижению расходов на производство программного продукта. Приведенный аналитический обзор основных подходов тестирования и документирования RESTful API, а также программных средств их автоматизации позволяет получить представление о возможных стратегиях сокращения сроков производства программного обеспечения и улучшения его качества.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00082а.*

**Литература**

1. Sykora R. How we updated tools and processes while moving toward tier zero and self-service // HDI. 2017.
2. Вишневецкая Т. И. Тестирование программного обеспечения как учебная дисциплина // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 1 (4).

3. Корнюшко В. Ф., Костров А. В., Породникова П. А. Подход к развитию системы управления тестированием программных средств // Программные продукты и системы. 2015. № 4 (112). С. 126—132.
4. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и постановки продукции на производство (СПП). Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. Дата введения 01.09.2017.

## OVERVIEW OF AUTOMATION AND DOCUMENTATION METHODS FOR THE SERVER INTERFACE BASED ON THE RESTful ARCHITECTURE

<sup>1,2</sup>V. I. Anisimov, <sup>2</sup>S. A. Vasilev, <sup>1</sup>I. A. Evdokimov, <sup>1</sup>O. B. Tarasova

<sup>1</sup>Design Information Technologies Center of RAS, Odintsovo,  
Moscow region, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia

*The technique of building automation systems for testing and documenting the API of the server component of the web service, which is of great relevance in the implementation of distributed systems, is considered. The types of testing for connection points (endpoints) of the architecture of building RESTful API web services and their main differences are described. The concept of the "Shift Left" strategy is interpreted in relation to the organization of the software testing process. The requirements for automated testing tools for the server component of the web service are formed. Methods of documenting the API of the server component are presented and a set of factors that determine the most effective approach to automating the documentation of the API are highlighted. A comparative analysis of automated testing tools and server API documentation is performed. An example of using specialized software to automate testing and documentation of the server component is considered. A parallel is drawn between the requirements for automated testing tools, documentation, and the functionality provided by the Postman application to automate testing and documentation.*

**Keywords:** distributed software, web services, API, RESTful, endpoint, Shift Left, test automation, document automation, Postman.

---

**Анисимов Владимир Иванович**, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: info@ditc.ras.ru

**Васильев Сергей Алексеевич**, ассистент.

E-mail: venom-gt@list.ru

**Евдокимов Иван Александрович**, младший научный сотрудник.

E-mail: info@ditc.ras.ru

**Тарасова Ольга Борисовна**, старший научный сотрудник.

E-mail: info@duct.ras.ru

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.



УДК 338.364

## ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ ДЛЯ "УМНОГО ПРОИЗВОДСТВА"

М. А. Пирогова, канд. техн. наук; И. Е. Лешихина, канд. техн. наук  
ФГБОУ ВО НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия

В. А. Краюшкин, канд. техн. наук  
ООО «Продуктивные технологические системы», Москва, Россия

*Рассмотрены основные области эффективного промышленного применения технологии дополненной реальности.*

**Ключевые слова:** дополненная реальность, визуальный контент, руководство, процессы производства, цифровая трансформация.

По результатам исследований рынка информационных технологий, проведенных консалтинговой компанией McKinsey, к 2024 г. промышленные компании планируют инвестировать в технологии дополненной реальности (AR) более 7 млрд долл., однако многие из них уже сейчас получают инвестиционный доход от использования AR в производственной сфере, в сфере предоставления профессиональных сервисных услуг, при обучении производственного персонала, в сфере продаж и маркетинга [1].

AR изменяет характер выполнения производственных процессов на промышленных предприятиях, так как применение этой технологии нацелено на получение конкретных бизнес-выгод путем повышения эффективности работников.

Компании, использующие AR для повышения квалификации своих сотрудников, наблюдают повышение производительности труда, снижение количества производственного брака и доработок, рост показателей безопасности производственного процесса и повышение степени соответствия исполнения рабочих операций нормативам и стандартам.

Дополненная реальность — это будущее эффективной и удобной передачи знаний и производственной информации среди персонала заводских цехов и сотрудников вспомогательных и сервисных подразделений. Значительное число рабочих, обладающих серьезными техническими навыками и незаменимым опытом, неизбежно покидает цеха в силу возрастных ограничений. Им на смену приходят новые поколения рабочих, контрактники и сотрудники других подразделений, не имеющие должного опыта. В связи с этим появляется необходимость в быстром и эффективном обучении, полноценной передаче накопленного опыта.

Промышленные компании больше не должны полагаться на традиционные бумажные инструкции и базовые методы обучения персонала. Для подготовки квалифицированных кадров этого уже недостаточно. Также в условиях постоянного усложнения изделий и производственных процессов нельзя рассчитывать на продолжительный по времени процесс обучения.

Чтобы привнести новую динамику в традиционный процесс подготовки рабочей силы, промышленным компаниям необходимо внедрять новые методы обучения и применять актуальные стратегии рабочего процесса.

## Дополненная реальность в промышленности

Технологии дополненной реальности в промышленности — это технологии, использующие наложение виртуального цифрового контента на визуализацию реального пространства предприятия [2, 3] при сканировании специальных физических ориентиров реального мира (меток). В то время как методы работы с AR в промышленности могут существенно различаться, практика применения AR обычно включает следующие компоненты:

- *Физический ориентир (метка)*, который служит для топологической привязки виртуального цифрового контента к реальному просматриваемому пространству. Физические ориентиры могут быть универсальными (например, горизонтальная плоскость), но это может быть и конкретное изображение, распознаваемое по уникальной форме (метке), или по индивидуальному тегу ссылки (например, QR-коду), размещаемым в нужной точке реального пространства. Физическим ориентиром могут также быть реальные 3D-объекты, силуэт которых, рассматриваемый под нужным углом, будет служить для точной топологической привязки.

- *Соответствующий цифровой контент*, транслируемый пользователю после того, как цель распознана. Цифровой контент AR может включать инструкции в режиме реального времени, информацию о статусе или дополнительные данные, включая 3D-контент, улучшающие пользовательский опыт.

- *Среда разработки ПО*, позволяющего соотносить цифровой контент с физической целью. Варьируется от ресурсоемких платформ разработки до стандартных коробочных решений, не требующих кодирования.

- *Пользовательское программное обеспечение*, которое распознает физические ориентиры и накладывает соответствующий цифровой контент в виде объектов дополненной реальности.

• *Пользовательское аппаратное обеспечение* для взаимодействия с AR-контентом. Аппаратным обеспечением AR могут быть смартфон, планшет или очки AR.

### Эффективные приложения AR для промышленности

Приложения AR выгодны как для всего промышленного предприятия в целом, так и для отдельных этапов жизненного цикла изделия [2].

#### Рабочие 3D-инструкции в AR

Сложность изделия и недостаток навыков у рабочих усугубляют негативное влияние человеческого фактора и сказываются на безопасности труда.

Технология AR, создающая эффект присутствия, решает эти задачи посредством создания AR-пошаговых инструкций, повышающих безопасность, оперативность действий и производительность труда:

- позволяет работникам видеть скрытые компоненты и сложные данные;
- сокращает время выполнения проверок и улучшает качество;
- помогает сократить количество ошибок при сборке;
- позволяет ускорить производственный цикл и снизить тарифы на первичное сопровождение и обслуживание.

Применение очков AR показано на рис. 1.



Рис. 1. Применение очков дополненной реальности для доведения пошаговых инструкций при проведении сложных работ (по материалам GE и Upskill)

#### Обучение и демонстрации в AR

Поскольку разрыв в навыках рабочих в ведущих отраслях производства, например в оборонной и аэрокосмической индустрии, продолжает увеличиваться, традиционные методы обучения при быстром наборе новых сотрудников перестают работать эффективно. AR ускоряет

процесс превращения новых сотрудников в компетентных, эффективных работников:

- обеспечивает преемственность опыта и знаний и предлагает принципиально новое качество обучения;
- учебная программа легко может имитировать работу в затрудненных и опасных условиях;
- обучающие материалы могут легко обновляться и локализоваться.

Обучение нового специалиста в компании Alstom показано на рис. 2.



Рис. 2. Обучение нового специалиста по системам электrorаспределения в компании Alstom. Применение очков дополненной реальности Microsoft HoloLens (по материалам компании Immersion3D)

#### Расширенное экспертное руководство

Опытные эксперты — это наиболее ценный человеческий ресурс для любой организации. Такие специалисты обычно в дефиците, их опыт и экспертиза стоят недешево. AR может заместить ценность этих экспертов и расширить охват распространения их навыков.

Лучшее в своем классе AR-решение PTC Vuforia Expert Capture дает возможность 3D-фиксации "по месту" передовых приемов и методов, знаний и умений эффективного выполнения операций, многократного повторного использования знаний, получаемых у экспертов на рабочем месте от первого лица. В результате получается полноценный информационный актив для обучения новых сотрудников. Знания, переведенные в дополненную реальность, легко распространяются в рамках целого предприятия, что, в свою очередь, является обязательной предпосылкой к успеху цифровой трансформации предприятия — переходу к "умному" предприятию [4].

Новые работники быстрее становятся компетентными, обучаясь прямо на рабочем месте.

Стандартные рабочие процедуры могут быть документированы без необходимости отвлекать ценных сотрудников.

Решения для удаленного руководства позволяют экспертам совместно решать проблемы и взаимодействовать с менее опытными коллегами посредством обмена видео, дополняемого AR.

В условиях постоянного усложнения изделий и все возрастающей конкуренции оборонная и

аэрокосмическая отрасли нуждаются во все большей гибкости, и эти решения оптимизируют использование ресурса экспертов.

Старшие эксперты могут ассистировать менее опытным специалистам на местах (рис. 3). Это обеспечивает принципиально новый гибридный подход к обслуживанию, дающий положительные результаты при рациональном использовании человеческих ресурсов.



*Рис. 3. Совместное обсуждение процессов разборки-сборки трехфазных асинхронных электродвигателей с использованием технологии дополненной реальности (mixed reality и очков Microsoft HoloLens)*

Удаленное ассистирование позволяет специалисту на месте быстро получать ответы на вопросы и компетентно решать задачи, обмениваясь информацией со старшим специалистом посредством AR.

### Визуализация

Визуализация изделия — краеугольный камень технологии AR. Возможность получать полномасштабное цифровое представление физического изделия может решить несколько важных проблем:

- полномасштабная виртуальная демонстрация дорогого и громоздкого оборудования может быть спроецирована в реальном мире;
- интерактивные превью (предпросмотры без выполнения физического прототипирования) имеют почти безграничный потенциал для кастомизации;
- изделия могут быть быстро переконфигурированы для удовлетворения конкретных требований заказчика без необходимости трудоемкого перепроектирования.

### Оптимизация эффективности, безопасности и соответствия стандартам

Технология дополненной реальности крайне полезна для машиностроительных отраслей

промышленности. Пока предприятия в этой области разрабатывают все более сложные изделия, достигающий пенсионного возраста высококвалифицированный персонал становится все труднее заменить. Промышленный AR — это бесценное новое решение по сохранению и распространению накопленного предприятием опыта для обеспечения роста квалификации рабочего персонала.

Внедрение технологий AR повышает эффективность и качество выполнения операций рабочим персоналом, положительно влияет на соблюдение регулятивных норм и повышение безопасности при общем снижении затрат.

AR-приложения предлагают поддержку на производстве рабочих с любым уровнем опыта. Обучение и повышение квалификации на основе технологий дополненной реальности позволяют наращивать профессионализм производственного персонала. Выполненные в технологии AR руководства и рабочие инструкции могут помочь как новым, так и опытным работникам. Удаленное ассистирование и применение AR-технологии при совместной работе в непредвиденных ситуациях позволяют менее компетентным коллегам использовать знания и опыт более компетентных специалистов вне зависимости от степени физической удаленности друг от друга.

Влияние AR на производство:

- уменьшение времени простоя оборудования;
- снижение затрат на брак и доработки;
- оптимизированные процессы настройки, наладки и обслуживания станков;
- сокращение количества ошибок операторов и ошибок при сборке;
- упрощение проверок;
- улучшение процессов нормативного соответствия;
- повышение безопасности труда;
- сокращение временных и финансовых затрат на адаптацию персонала.

### Дополненная реальность для обслуживания: улучшение качества, увеличение доходности

Все большее значение приобретает удовлетворенность заказчика в области послепродажного техобслуживания, сопровождения и ремонта, а сама эта область — послепродажный сервис — становится потенциальным источником дополнительного дохода. Для качественного выполнения сервисных работ и операций по обслуживанию техники необходимы опытные квалифицированные кадры, так как отсутствие необходимой квалификации работников напрямую сказывается на степени удовлетворенности клиентов. Промышленная дополненная реальность становится незаменимым инструментом



для повышения квалификации персонала, занятого на операциях технического обслуживания, сопровождения и ремонта (рис. 4).



**Рис. 4. Применение дополненной реальности при выполнении работ по обслуживанию и ремонту вертолетного двигателя (по данным компании Atheer)**

AR поддерживает квалификацию работников сектора обслуживания аналогично тому, как это происходит на производстве. Система адаптации и обучения сервисного персонала, передача ему накопленных знаний от производственных рабочих мест, выстроенные на базе AR, существенно сокращают время подготовки технических специалистов с гарантией того, что столкнувшись с конкретной задачей, они смогут ее решить. Руководства и инструкции, усовершенствованные AR, гарантируют, что даже работник с низкой квалификацией в "полевых условиях" сможет справиться с поставленной задачей, причем время обслуживания не только не увеличится, но и существенно сократится.

Легкий доступ к интерактивной помощи в технологиях дополненной реальности от более опытных коллег станет неоценимым инструментом для быстрого решения сложных или неожиданных проблем и позволит компаниям более эффективно использовать ценных экспертов, предоставляя дистанционную помощь более молодым специалистам в режиме реального времени.

За счет применения AR при выполнении сервисных операций достигается:

- повышение общего уровня качества и рентабельности;
- оптимизация тарифов на обслуживание;
- снижение командировочных затрат;
- ускорение процесса ремонта;
- решение проблем по запросу;
- усиление безопасности труда;
- повышение уровня удовлетворенности клиентов.

#### **Дополненная реальность для эффективного обучения и подготовки производственных кадров**

Недостаток в достаточном количестве квалифицированной рабочей силы вызывает потреб-

ность компаний в ускорении процессов обучения и адаптации новых сотрудников. Для этого необходимо в ускоренном темпе передать необученному персоналу навыки и знания ключевых технических экспертов. Однако зачастую предприятия сталкиваются с устаревшими методиками обучения, сложностью оборудования и рабочих процессов. Быстрая адаптация новых кадров становится серьезной проблемой.

Технология AR обладает уникальным потенциалом для учебных кейсов, предполагающих наглядные демонстрации и вовлеченность в реальный рабочий процесс [5]. Применение AR-технологий в обучении улучшает понимание и усвоение материала, повышает безопасность и снижает временные затраты на выполнение производственных задач за счет снижения количества ошибок. Интерактивные 3D-инструкции, которые даются в соответствующем контексте, и процедуры, выполняемые в AR-технологиях под руководством экспертов, обеспечивают промышленных рабочих необходимыми знаниями в их области.

За счет применения AR в обучении достигается:

- быстрый ввод в курс дела новых и опытных рабочих;
- сокращение времени на обучение и адаптацию к новым навыкам;
- повышение безопасности и соответствия нормативам;
- снижение общих затрат на обучение;
- более гибкий и оперативный штат работников;
- увеличение удовлетворенности от работы;
- более эффективный рекрутинг "цифрового поколения".

#### **Дифференцированная демонстрация изделий: применение AR для эффективных продаж и маркетинга**

С учетом высокой конкуренции в индустрии возможность дифференцировать изделия и приобретаемый опыт может принести серьезные дивиденды.

Ожидания растут: покупателей больше не устраивают полиграфические буклеты, громоздкие демонстрации и очень медленный процесс продаж. AR позволяет производителям уйти сразу на несколько шагов вперед в конкурентной гонке, сократив при этом затраты на продажи и маркетинг.

Полномасштабные цифровые визуализации деталей и оборудования, демонстрации в дополненной реальности всего изделия, его агрегатов и способов их взаимодействия помогают быстрее и легче понимать уникальные особенности изделий.

Демонстрации в дополненной реальности обходятся намного дешевле привычных, потому что могут проходить где угодно, в том числе на

выставках, на заводах или в переговорных залах без затрат на доставку и транспортировку.

Креативный подход к использованию технологии AR также даст производителям инструмент для разработки и демонстрации привлекательных динамичных предложений, что несомненно укрепит позиции бренда и лояльность пользователя.

За счет применения AR в области продаж и маркетинга достигается:

- рост доходности бизнеса;
- ускорение цикла продаж;
- уменьшение необходимости в рекламной полиграфии и физических маркетинговых материалах;
- снижение затрат на доставку и транспортировку;
- укрепление репутации бренда.

#### Усовершенствование существующих активов технологиями AR

Вне зависимости от того, где применяются AR-решения (в инженерном процессе, в производстве или на этапе послепродажного сопровождения), с их помощью можно многократно повысить ценность уже существующих активов.

Традиционные печатные руководства и инструкции переводятся в 3D-формат, так как больше не могут служить эффективным инструментом передачи информации для работников на местах (см. рис. 4). В результате:

- увеличиваются быстрота разворачивания и эффективность затрат;
- в момент публикации контент немедленно становится доступен работникам на местах;
- пошаговые инструкции, проецируемые на соответствующий контекст (например, станок или рабочую среду), гораздо проще интерпретировать;
- использование анимации и интуитивно понятной иконографии снижает необходимость перевода;
- такие руководства легко поддерживать и изменять мгновенно;
- очки дополненной реальности дают техническим специалистам доступ к hands-free-инструкциям, что повышает эффективность и безопасность.

#### Полномасштабная визуализация проектных данных САПР и цифровых разработок

САПР и другие активы разработчиков — ключевая часть процесса разработки любого современного изделия. Однако обычно, после того как этап разработки завершен, в дальнейшем их не используют.

3D-модели могут быть использованы для получения опыта в дополненной реальности, они: захватывающие и визуально привлекательны;

виртуальны и, следовательно, минимально зависят от локации; интуитивно понятны; могут использоваться совместно с пошаговыми инструкциями для более эффективного процесса обучения; могут быть переориентированы в статические или анимированные визуальные объекты.

#### Наложение данных промышленного Интернета вещей на физические объекты

Данные, получаемые из Интернета вещей (IoT), уже доказали свою значимость как настраиваемые представления о работе оборудования предприятия [3].

Инструменты промышленного IoT также можно использовать для сбора и представления данных операторам и техническим специалистам сервисной службы о состоянии оборудования и производительности в режиме реального времени.

Наложение данных промышленного Интернета вещей на физические объекты:

- позволяет пользователю видеть "внутри" оборудования без необходимости разбирать его физически;
- помогает визуально идентифицировать необходимость ремонта или обслуживания оборудования на расстоянии;
- дополнительно повышает эффективность работников;
- экономит время и снижает риск человеческого фактора;
- повышает уровень безопасности труда, вовремя предупреждая несчастный случай, если оборудование нестабильно или небезопасно.

#### Заключение

Грамотное внедрение промышленных технологий AR способно значительно трансформировать предприятия дискретного производства, оборонной и аэрокосмической отраслей. Технологии AR показали себя с отличной стороны в части усовершенствования процессов и достижения высоких результатов благодаря более эффективной и технически грамотной рабочей силе. Движущие инициативы цифровой трансформации, в том числе AR, повышают производительность предприятий, снижают брак, положительно влияют на безопасность труда и соответствие нормативам. Применение технологии AR способствует продвижению по пути цифровой трансформации промышленного производства.

#### Литература

1. Porter M. E., Heppelmann J. E. How smart, connected products are transforming companies // Harvard Business Review. 2015. № 93. P. 96—114.

2. Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Краюшкин В. А. На пороге индустриального интернета вещей // Открытые системы. СУБД. 2016. № 3. С. 32.

3. Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Краюшкин В. А. Дополненная реальность: возможности применения для поддержки полного жизненного цикла изделия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 1 (165). С. 16—25.

4. Пирогова М. А., Лешихина И. Е., Краюшкин В. А. Платформа разработки промышленного интернета вещей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 3 (163). С. 18—25.

5. Martin T. Augmented Reality for Learning [Электронный ресурс]. URL: <http://www.2elearning.com/top-stories/item/3460-Augmented-Reality-for-Learning> (дата обращения: 31.05.2019).

## AUGMENTED REALITY FOR SMART MANUFACTURING

M. A. Pirogova, I. E. Leshikhina

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

V. A. Krayushkin

LLC "Productive Technology Systems", Moscow, Russia

*The article considers the main productive area of augmented reality implementation in the modern industry.*

**Keywords:** augmented reality, visual content, technical manual, production and manufacturing processes, digital transformation.

---

Пирогова Марина Аркадьевна, доцент.

E-mail: PirogovaMA@mpei.ru

Лешихина Ирина Евгеньевна, доцент.

E-mail: liy56@mail.ru

Краюшкин Владимир Анатольевич, руководитель проектов.

E-mail: vkray@pts-russia.com

*Статья поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.*



## **Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах**

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

### **Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)**

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи ....., предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

.....  
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: ..... (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала.

Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбираются из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлгией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

#### ***Комплектование статьи (обзора)***

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в

Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вместо экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;
- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;
- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word.

#### ***Оформление статьи:***

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;

- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи;
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литературных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;
- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;
- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.
- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;
- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

### **Оформление рисунков:**

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.
- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

### **Оформление формул:**

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;
- стандартные математические обозначения (например,  $\max$ ,  $\log$ ,  $\sin$ ,  $\exp$  и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;
- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);
- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;
- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $v_{\text{гр}}$  и т. п.
- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

### **Оформление таблицы:**

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;
- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).