



БАЛТИЙСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИММАНУИЛА КАНТА

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Сборник научных трудов

Выпуск 2

Калининград
2023

БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ИММАНУИЛА КАНТА

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск 2

Под редакцией А. Д. Быковой

Калининград

Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта

2023

УДК 004
ББК 22
Ф947

Рецензенты

О. В. Агеев, д-р техн. наук, проф., Калининградский Государственный технический университет; *Э. Д. Харьков*, канд. экон. наук, руководитель по исследованию данных, ПАО Сбербанк; *А. Е. Кобелянский*, канд. техн. наук, зам. начальника, ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»; *А. Г. Дивин*, д-р техн. наук, зав. кафедрой, Тамбовский государственный технический университет; *А. А. Шпилевой*, канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский Федеральный университет им. И. Канта; *Л. Л. Карам*, канд. пед. наук, доц., зав. кафедрой, РАНХиГС при президенте РФ Западный филиал; *А. А. Меркулов*, канд. техн. наук, начальник технопарка, Калининградский Государственный технический университет; *А. В. Юров*, д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский Федеральный университет им. И. Канта; *А. В. Вялова*, канд. физ.-мат. наук, доц., Калининградский Государственный технический университет

Ф947 **Фундаментальные и прикладные исследования в области высоких технологий** : сб. науч. тр. / под ред. А. Д. Быковой. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2023. — Вып. 2. — 138 с. ISBN 978-5-9971-0857-1

Включает теоретические и прикладные исследования магистров, аспирантов, молодых ученых, преподавателей и специалистов в области высоких технологий. Охватывает широкий круг вопросов, касающихся информатики, информационных систем, математического моделирования, приборостроения, программирования, радиофизики и телекоммуникаций.

Адресован широкому кругу специалистов в сфере высоких технологий, аспирантам и студентам высших учебных заведений.

УДК 004
ББК 22

ISBN 978-5-9971-0857-1

© БФУ им. И. Канта, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Аникович А. Г., Черкашина И. А., Нестеров С. В., Федянин А. В.</i> Программирование микроконтроллера и реализация HMI-интерфейса программы на панели для АСУ ТП котельной	4
<i>Казакова Д. А., Копанев М. С.</i> Разработка модели машинного обучения для информационной системы автоматизации рекрутинга и оценки квалификационных показателей сотрудников банка	24
<i>Кесова Е. Н., Носарев Е. М.</i> Разработка программного обеспечения поиска и сигнализации для системы обнаружения попадания посторонних предметов в сырьё на производственной линии предприятия	35
<i>Нестеров С. В., Федянин А. В.</i> Анализ безопасности SCADA-систем для промышленных объектов на примере МП «Калининградтеплосети»	46
<i>Нестерова О. И., Тарачков М. В.</i> Разработка системы безопасности для работы мобильного робота в окружении людей	58
<i>Казбанов В. А., Курицкий М. С., Алещенко А. Н.</i> Реализация многозадачности на одноядерных микроконтроллерах	69
<i>Казакова Д. А., Лищук И. В.</i> Создание приложения для конвертирования валюты в криптоактивы с использованием технологии блокчейн	77
<i>Слепчатов А. В., Толстель О. В., Солдатенко Т. А.</i> Разработка системы автоматизации технологического процесса канализационной насосной станции в условиях импортозамещения	86
<i>Асташенок А. В., Тепляков А. С.</i> Космологическая эволюция Вселенной и голографическая темная энергия Цаллиса	99
<i>Шоть А. В., Солдатенко Т. А.</i> Внедрение программного продукта «IC:PDM Управление инженерными данными 4 (PLM)» в производственный процесс предприятия обслуживания	118
<i>Васильева Е. А.</i> Применение метода касательного разложения к решению краевых задач для уравнений эллиптического типа	130

А. Г. Аникович, И. А. Черкашина, С. В. Нестеров, А. В. Федянин

ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА И РЕАЛИЗАЦИЯ HMI-ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММЫ НА ПАНЕЛИ ДЛЯ АСУ ТП КОТЕЛЬНОЙ

Описывается разработка системы удаленного диспетчерского контроля для АСУ ТП котельной и последующему ее вводу в эксплуатацию на основе микроконтроллера типа ОВЕН ПЛК-200. Представлены результаты, полученные при проектировании диспетчеризации котельной с использованием программирования в MasterSCADA 4D и панели СП310 Б. Также был проведен анализ функционирования микроконтроллеров типа ОВЕН ПЛК-110 [МО2] и ОВЕН ПЛК-200 CS, описаны их характеристики, функции и принципы работы, раскрыты возможные области использования. Программа, определяющая конструкцию и структуру системы удаленного диспетчерского контроля, была создана в CodeSys 3.5, а затем импортирована в MasterSCADA 4D и панель СП310 Б, где были определены внешний вид и компоненты системы управления и визуализации. Данная система диспетчеризации была внедрена с целью доказательства перспективности обновления АСУ ТП предприятия на функционирование на базе современного отечественного ПО и оборудования. В рамках работы представлена мнемосхема котельной, описан процесс создания элементов котельной в SCADA и HMI, а также рассмотрена логика управления ПЛК. Был реализован ввод в эксплуатацию системы диспетчерского контроля в рамках АСУ ТП предприятия. Для иллюстрации наглядности результатов представлены экраны визуализации SCADA и HMI-интерфейса на панели.

This article is devoted to the development of a remote supervisory control system for the automated process control system of a boiler room and its subsequent commissioning based on a microcontroller of the OWEN PLC-200 type. The paper presents the results obtained in the design of boiler room dispatching using programming in MasterSCADA 4D and the SP310 B panel. An analysis of the functioning of microcontrollers such as OWEN PLC-110 [MO2] and OWEN PLC-200 CS was also carried out, their characteristics, functions and principles of operation are described, possible areas of use are disclosed. The program that defines the design and structure of the remote supervisory control system was created in CodeSys 3.5, and then imported into MasterSCADA 4D and the SP310 B panel, where the appearance and components of the control and visualization system were determined. This dispatching system was introduced in order to prove the prospects of updating the enterprise's automated process control system for functioning on the basis of modern domestic software and equipment. As part of the work, a boiler room mnemonic diagram is presented, the process of creating boiler room elements in SCADA and HMI is described, and the

PLC control logic is considered. The commissioning of the dispatch control system within the framework of the industrial control system of the enterprise was implemented. To illustrate the clarity of the results, SCADA and HMI visualization screens are presented on the panel.

Ключевые слова: АСУ ТП, диспетчеризация, SCADA, котельная, мнемосхема, визуализация, микроконтроллер, ОВЕН ПЛК-110 [МО2], ОВЕН ПЛК-200 CS, панель SP310 B, MasterSCADA 4D, CodeSys 3.5, внедрение, эксплуатация

Keywords: automatic process control system, dispatching (APCS), SCADA, boiler room, mnemonic diagram, visualization, microcontroller, OWEN PLC-110 [MO2], OWEN PLC-200 CS, SP310 B panel, MasterSCADA 4D, CodeSys 3.5, implementation, exploitation

Калининградское муниципальное предприятие (далее — МП) «Калининградтеплосеть» работает в сфере ЖКХ, обеспечивая теплоснабжение и ГВС (горячее водоснабжение) во всех жилых районах города Калининграда.

Для поддержания комфортной температуры в зданиях внутри всего Калининграда МП «Калининградтеплосеть» эксплуатирует сеть котельных и РТС, обеспечивающих отопление в каждом районе города [1]. Для повышения управляемости технологическими процессами и обеспечения бесперебойного теплоснабжения, предприятие использует АСУ ТП (автоматизированную систему управления технологическим процессом) [2] для каждой котельной на основе современных микроконтроллеров и НМИ [3] (Human-Machine Interface — человеко-машинный интерфейс) с применением SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных).

АСУ ТП для любого автоматизированного производства состоит из трех уровней: нижнего (полевой уровень — датчики и исполнительные устройства), среднего (контроллеры, вторичные преобразователи, НМИ-интерфейс) и верхнего (SCADA — пользовательский интерфейс) [3; 4]. Для обновления SCADA-системы на производстве необходимо запрограммировать и встроить микроконтроллер нового поколения [5] (средний уровень), а также создать и внедрить НМИ-интерфейс (SCADA) для текущей деятельности операторов и диспетчеров (верхний уровень) [2].

На нижнем (полевом) уровне АСУ ТП происходит физическая настройка оборудования котельной. На данном уровне рабочие устанавливают котлы, горелки, насосы, датчики, реле температуры и давления, счетчики, настраивают их, чтобы датчики показывали верные значения, чтобы котлы запускались и поддерживали ту температуру, которую им задал поддерживать оператор, и т. д.

Для работы среднего уровня АСУ ТП внутри котельной должен быть установлен микроконтроллер, который будет принимать сигналы от всего оборудования и передавать их в SCADA [3]. Микроконтроллеры, устанавливаемые внутри АСУ ТП на больших производствах и программируемые с помощью SCADA-систем, называются промышленными логическими контроллерами (далее — ПЛК) [5].

ПЛК в рамках АСУ ТП необходимы для:

- приема и передачи дискретных сигналов с оборудования на производстве в систему диспетчерского контроля;
- отправки управляющих дискретных сигналов с системы диспетчерского управления на оборудование на производстве;
- приема и передачи аналоговых сигналов по промышленным протоколам с оборудования на производстве в систему диспетчерского контроля;
- программирования системы автоматизированного управления посредством приема и передачи дискретных сигналов управления из диспетчерской на производство;
- передачи аварийных сигналов в диспетчерскую в случае возникновения ЧП на производстве [6].

Российская компания OWEN, специализирующаяся на разработке и производстве контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации для различных отраслей промышленности, изготавливает промышленные логические контроллеры для работы в АСУ ТП предприятий — ОВЕН ПЛК.

МП «Калининградтеплосеть» достаточно длительное время использует ПЛК и оборудование КИПиА этой компании для разработки систем удаленного диспетчерского контроля эксплуатируемых объектов (РТС, котельные, ЦТП). Основные модели промышленных микроконтроллеров на предприятии — линейки контроллеров ОВЕН ПЛК200 CS (рис. 1) и ОВЕН ПЛК110 [M02] (рис. 2).



Рис. 1. Микроконтроллер линейки ОВЕН ПЛК 200-02 CS



Рис. 2. Микроконтроллеры линейки ОВЕН ПЛК 110-х [M02]

Работа данных моделей микроконтроллеров в АСУ ТП осуществляется на базе отличных друг от друга SCADA-систем: модель ОВЕН ПЛК110 [M02] программируется через систему MasterSCADA 4D [8; 9] российской компании МПС Софт, а ОВЕН ПЛК200 CS — через систему CodeSys 3.5 [10] немецкой компании 3S-Smart Software Solutions Gmb H. Тем не менее обе модели микроконтроллеров предназначены примерно для одной и той же работы и обладают похожим функционалом в рамках своих SCADA-систем. Сравнительная характеристика параметров двух данных линеек микроконтроллеров представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика параметров микроконтроллеров ОВЕН ПЛК110 [M02] и ОВЕН ПЛК200 CS

Параметр	ПЛК110 [M02]	ПЛК200 CS
Количество входных портов (DI)	18 (ПЛК110-30), 36 (ПЛК110-60)	8 (ПЛК200-01, ПЛК200-04), 12 (ПЛК200-02, ПЛК200-03)
Количество выходных портов (DO)	12 (ПЛК110-30), 24 (ПЛК110-60)	14 (ПЛК200-01), 8 (ПЛК200-02-04)
RS-485	2	1
RS-232	1	0
RS-232-Debug	1	0
Ethernet 100 Base-T	1	2
USB B — USB-RNDIS	1	1
Поддерживаемые промышленные протоколы	ОВЕН Modbus RTU Modbus ASCII Modbus TCP DCON GateWay (протокол CoDeSys)	Modbus-TCP (Master/Slave) OPC UA (Server) MQTT (Client/Broker) SNMP (Manager/Agent)

Параметр	ПЛК110 [M02]	ПЛК200 CS
Среда программирования	MasterSCADA 4D	CodeSys 3.5
Встроенная память	128 кб (MRAM)	Отсутствует, поддерживается подключение microSD
Габаритные размеры	(140×114×83)±1 мм (ПЛК110-30), (208×114×83)±1 мм (ПЛК110-60)	(82×124×83)±1 мм
Масса (не более)	1,2 кг	0,6 кг
Индикация на передней панели	Светодиодная	Светодиодная
Степень защиты корпуса по ГОСТ 14254-96	IP20 (передняя панель), IP00 (клеммы)	IP20
Средняя наработка на отказ	100 000 ч	60 000 ч
Средний срок службы	8 лет	8 лет

Составлено на основе данных: [11; 12].

В связи с санкциями, наложенными иностранными компаниями на распространение своей продукции на территории Российской Федерации, МП «Калининградтеплосеть» проводит работу по обновлению оборудования и программного обеспечения (далее — ПО) на современные модели и системы *отечественного производителя*. По плану в будущем во всех котельных будут установлены микроконтроллеры ОВЕН ПЛК110 [M02], а системы диспетчеризации будут спроектированы через MasterSCADA 4D. Однако в связи с тем, что МП «Калининградтеплосеть» еще не полностью перешла на отечественный софт, и общий сервер данных в АСУ ТП всему предприятию по-прежнему работает на базе CodeSys, от заказчика поступило задание о дополнительной настройке системы диспетчеризации на работу с помощью микроконтроллера ОВЕН ПЛК200 CS через систему CodeSys 3.5.

Следующий уровень АСУ ТП — *НМИ* (человеко-машинный интерфейс). К НМИ относятся такие устройства, как *панели оператора*. Они предназначены для отображения значений параметров ПЛК или иных устройств, подключенных к панели, а также их изменений. Панель также дает возможность наблюдать за ходом выполнения технологического процесса и менять значения параметров, которые отвечают за функционирование системы [13].

Реализация НМИ для исследуемой котельной происходит в сенсорной графической панели оператора ОВЕН СП310 Б (рис. 3).

Данная панель принадлежит линейке сенсорных панелей оператора ОВЕН СП3xx. Она предназначена для удобного отображения значений параметров и оперативного управления, а также ведения архива событий или значений [14].



Рис. 3. Сенсорная графическая панель оператора ОВЕН СП310 Б

НМИ необходим для работы оператора производственного процесса и устанавливается непосредственно на рабочем месте (в котельной). Сигналы, поступающие с оборудования котельной (котлы, насосы, аварийные датчики) будут передаваться в панель ОВЕН СП310 Б, чтобы оператор мог на экране одного устройства (панели) следить за ходом технологического процесса внутри котельной (вместо того, чтобы переключаться между несколькими щитами управления).

Перед разработкой НМИ на панели ОВЕН СП310 Б была составлена таблица сигналов для введения тегов в систему (табл. 2) на основе принципиальной тепловой схемы котельной (рис. 4).

Таблица 2

Сигналы системы диспетчеризации

№	Название сигнала	Расшифровка
1	alr BOILER1	Авария котла № 1
2	alr BOILER2	Авария котла № 2
3	alr PUMP VOD1	Авария насоса водоподготовки № 1
4	alr PUMP VOD2	Авария насоса водоподготовки № 2
5	alr PUMP BOILER	Авария насоса подключения котлов
6	alr PUMP SETCONT1	Авария насоса сетевого контура № 1
7	alr PUMP SETCONT2	Авария насоса сетевого контура № 2
8	alr GAZ	Авария загазованности
9	kvirt	Квитирование аварий
10	run BOILER1	Работа котла № 1
11	run BOILER2	Работа котла № 2
12	run PUMP VOD1	Работа насоса водоподготовки № 1
13	run PUMP VOD2	Работа насоса водоподготовки № 2
14	run PUMP BOILER	Работа насоса подключения котлов
15	run PUMP SETCONT1	Работа насоса сетевого контура № 1
16	run PUMP SETCONT2	Работа насоса сетевого контура № 2
17	auto BOILER	Режим работы котлов (автоматический / ручной)
18	auto_PUMP_VOD	Режим работы насосов водоподготовки (автоматический / ручной)
19	auto_PUMP_BOILER	Режим работы насосов подключения котлов и сетевого контура (автоматический / ручной)
20	run PLC	Работа контроллера

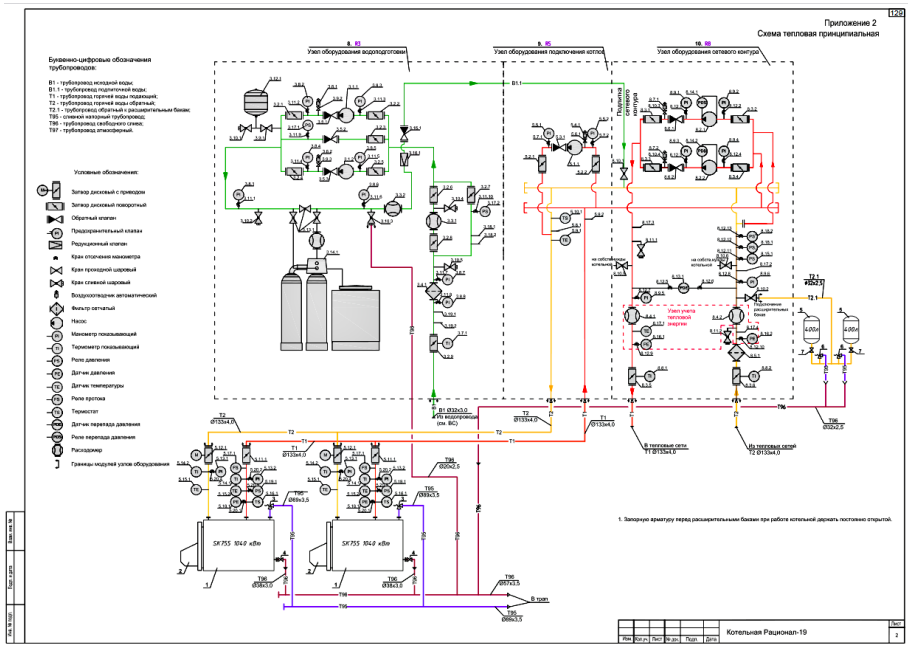


Рис. 4. Принципиальная тепловая схема котельной

Разработка ПО панели ОВЕН СП310 Б осуществляется в среде «Конфигуратор СП300». Были созданы несколько экранов для диспетчеризации котельной: два экрана котлов, два экрана с насосами разных узлов, журнал аварий и журнал событий.

На экранах котлов (рис. 5) отображаются их состояние (работает/не работает, состояние в норме/авария, режим работы), аварии в котельной.

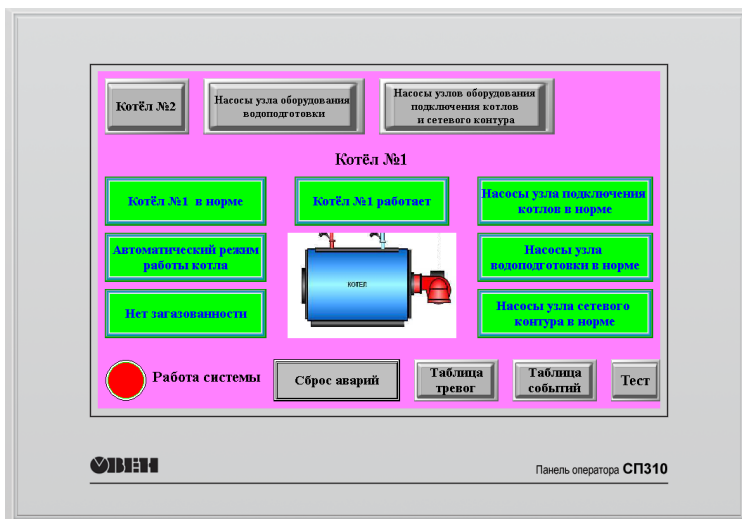


Рис. 5. Экран визуализации котла № 1 на панели ОВЕН СП310 Б

На экране насосов (рис. 6) отображаются их состояние (работает/не работает, состояние в норме/авария, режим работы).

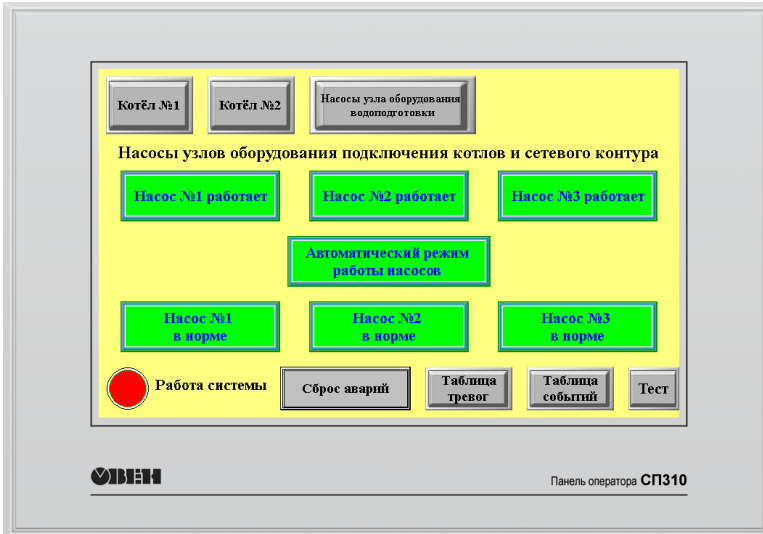


Рис. 6. Экран визуализации насосов узла подключения котлов и сетевого контура на панели ОВЕН СП310 Б

На всех экранах присутствует индикация, которая показывает, что система работает.

Так же на каждом экране визуализации есть переход на экраны с таблицами тревог и событий (рис. 7). На них можно отслеживать все действия, которые происходили во время работы котельной.

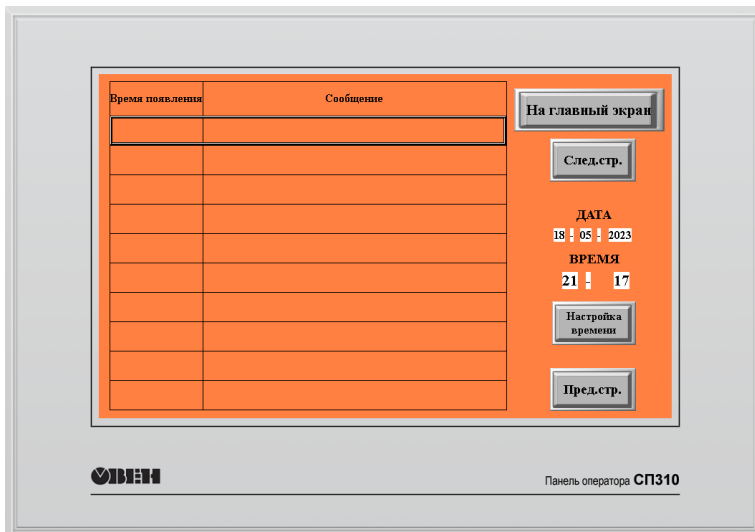


Рис. 7. Экран таблицы событий на панели ОВЕН СП310 Б

На экранах присутствует кнопка «Сброс аварии». Она позволяет осуществить сброс появления дополнительного окна (появляется каждые 5 сек.), которое сообщает о появлении аварии.

Для того, чтобы сигналы с контроллера поступали и на панель, и в диспетчерскую, всем элементам внутри панели нужно присвоить регистры, которые соответствуют регистрам, записанным в SCADA (рис. 8).

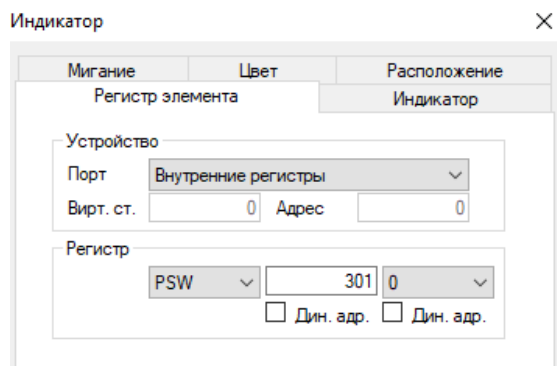


Рис. 8. Назначение регистров в «Конфигуратор СП300»

SCADA — верхний уровень АСУ ТП. SCADA-системы предназначены для диспетчерского управления и сбора данных [2]. В случае котельной на производстве МП «Калининградтеплосеть» SCADA собирает сигналы с оборудования котельной, а именно:

- работа оборудования (котлы, горелки, насосы);
- аварии (утечка газа, пожар, авария питания, сбой оборудования);
- режимы работы оборудования (ручной или автоматический, для котлов и насосов);
- показания датчиков, счетчиков и реле.

Все эти сигналы будут поступать с микроконтроллера и в HMI (панель оператора) внутри котельной, и, параллельно, в SCADA-систему (через дискретные порты и промышленные протоколы), чтобы за ними мог следить диспетчер из диспетчерского пункта.

Помимо передачи сигналов, которые просто представляют числовые показания, диспетчер должен видеть ход работы котельной. Так как в ней камер нет, для более наглядного представления работы оборудования для диспетчеров в SCADA создается мнемосхема. В отличие от инженерных принципиальных схем (рис. 4), мнемосхема в SCADA должна упрощенно, но достаточно подробно показывать местоположение оборудования внутри котельной (рис. 9). Это необходимо для того, чтобы в будущем развернуть на мнемосхеме визуализацию.

На экране визуализации будут отображаться численные показания с датчиков и счетчиков, а также более наглядно представляться режимы работы оборудования котельной (рабочий режим, авария, автоматический, ручной). С помощью визуализации диспетчерам намного удобнее обрабатывать информацию, поступающую из котельной, и легче контролировать ход технологического процесса.

но MasterSCADA) на среднем уровне. Помимо этого, MasterSCADA 4D поддерживает облачные сервера, благодаря чему можно подключиться к главному диспетчерскому серверу МП «Калининградтеплосеть». Также MasterSCADA 4D работает на экранах разных расширений (как на больших экранах в диспетчерских, так и на мобильных телефонах сотрудников предприятия), что значительно повышает удобство контроля работы котельной через данную программу [15].

Поэтому разработка SCADA для котельной в МП «Калининградтеплосеть» будет осуществлена на MasterSCADA 4D с учетом следующих пунктов:

1. Контроллер ОВЕН ПЛК110 [M02] будет подключаться к MasterSCADA 4D на верхнем уровне АСУ ТП напрямую [9].
2. Контроллер ОВЕН ПЛК200 CS будет подключаться к CodeSys на среднем уровне АСУ ТП [7], а сигналы через облачный сервер CodeSys будут передаваться в MasterSCADA 4D.
3. Сигналы с системы диспетчеризации на MasterSCADA 4D будут передаваться на общий сервер данных МП «Калининградтеплосеть».
4. Экран MasterSCADA 4D будет одинаково выглядеть как на большом экране диспетчерской, так и на экране телефона сотрудников [15] (см. рис. 9), что повысит мобильность и быстрдействие сотрудников МП «Калининградтеплосеть» при наблюдении за работой котельной.

Перед началом создания системы диспетчеризации в MasterSCADA 4D необходимо разобраться со списком сигналов, поступающих в систему. Так как на этапе разработки HMI был составлен список сигналов (см. табл. 2), перенесем их в CodeSys 3.5 (рис. 10) и соединим со входами микроконтроллера ОВЕН ПЛК200 CS, привязав их к входам регистра/регистров (рис. 11) в соответствие с панелью ОВЕН СП310 Б.

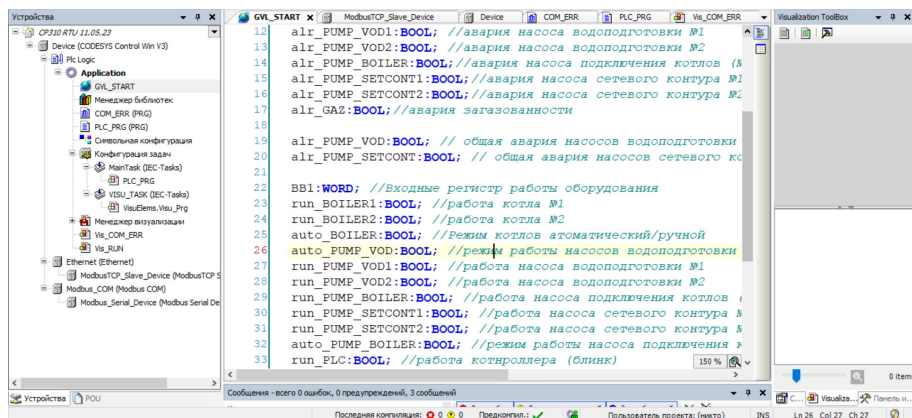


Рис. 10. Экран настройки списка сигналов микроконтроллера в CodeSys 3.5

Для передачи сигналов, поступающих от микроконтроллера ОВЕН ПЛК200 CS в CodeSys 3.5, в систему диспетчеризации, построенной в MasterSCADA 4D, необходимо настроить передачу данных. Одним из самых распространенных методов удаленной передачи данных между различными аппаратными платформами или операционными системами

ми (кроссплатформенные протоколы передачи данных) являются **OPC-протоколы** (Open Platform Communications — коммуникации на открытой платформе) OPC UA и OPC DA.

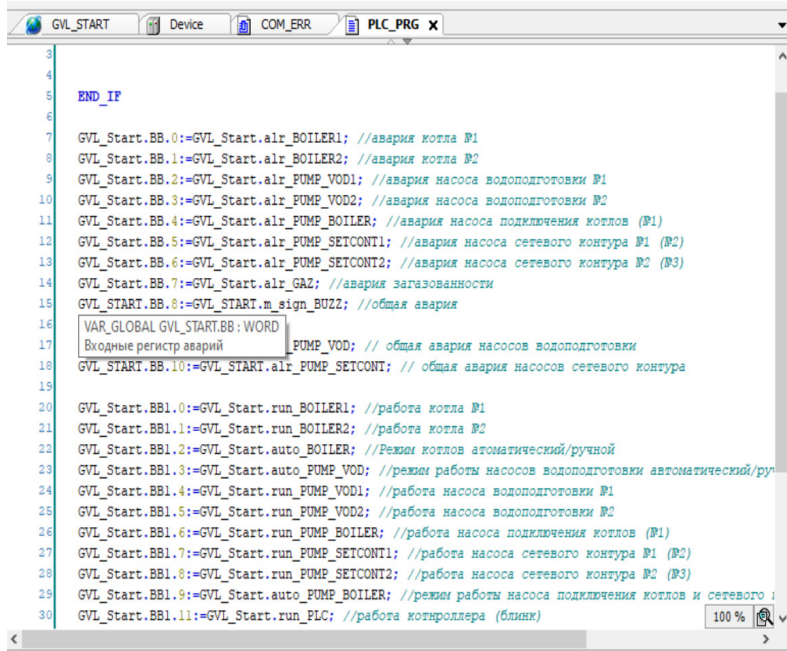


Рис. 11. Экран привязки сигналов к входам регистров аварии и работы в CodeSys 3.5

Для настройки передачи сигналов по протоколу OPC в CodeSys 3.5 необходимо добавить объект «Символьная конфигурация» (рис. 12), а в настройках символьной конфигурации — отметить все сигналы, которые будут передаваться из CodeSys 3.5 в MasterSCADA 4D, и настроить для них права доступа в режим чтения и записи (рис. 13).

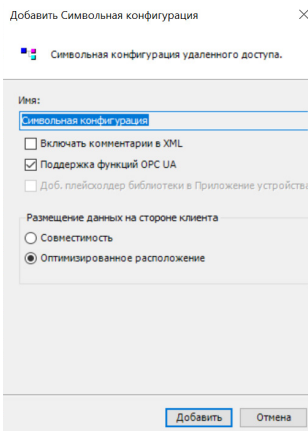


Рис. 12. Создание символьной конфигурации в CodeSys 3.5

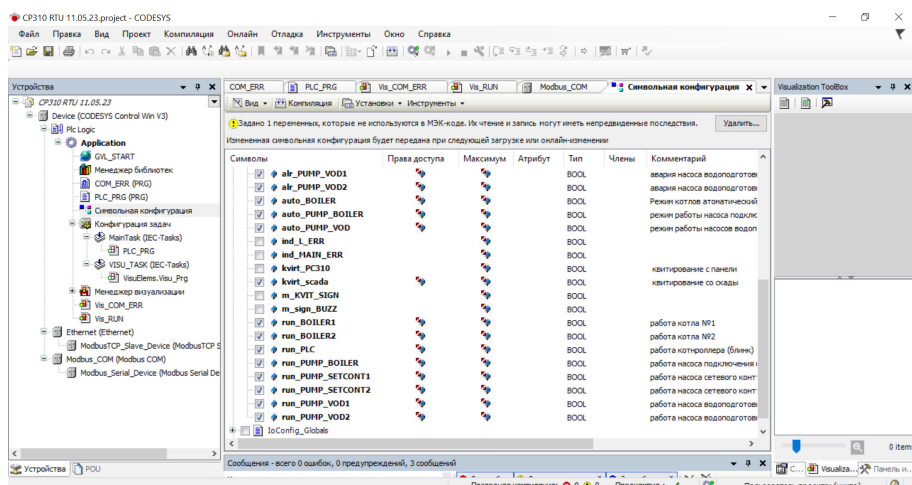


Рис. 13. Настройка передачи сигналов с помощью символьной конфигурации в CodeSys 3.5

Для приема сигналов, поступающих по протоколу OPC из CodeSys 3.5, необходимо в дереве «Система» программы MasterSCADA 4D добавить протокол OPC (например, OPC DA) и отметить те поступающие сигналы, которые необходимы для работы диспетчерской программы (рис. 14).

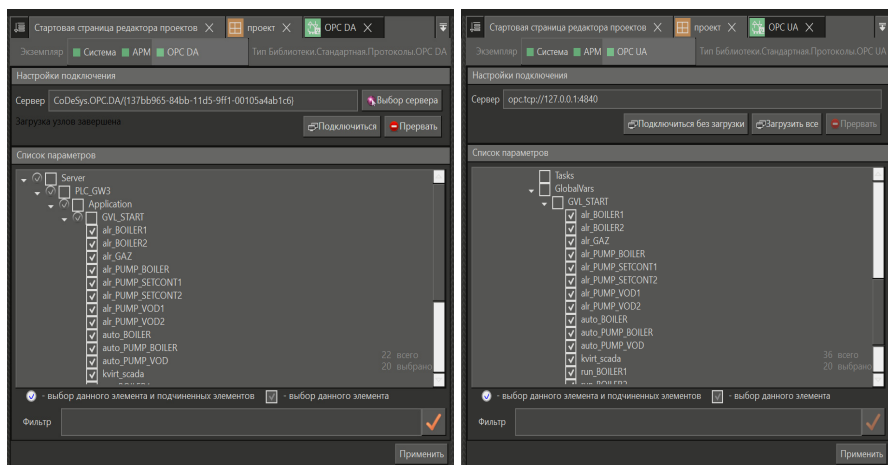


Рис. 14. Настройка приема сигналов с помощью протоколов OPC DA (слева) и OPC UA (справа) в MasterSCADA 4D

При прямом подключении микроконтроллера к MasterSCADA 4D, в дереве программы «Система» среди встроенных дистрибутивов можно найти ПЛК модели ОВЕН ПЛК110 [M02], в которой заранее прописаны все порты, как в настоящем контроллере. При подключении дистрибутива входы и выходы ПЛК можно переименовать непосредственно в программе (рис. 15).

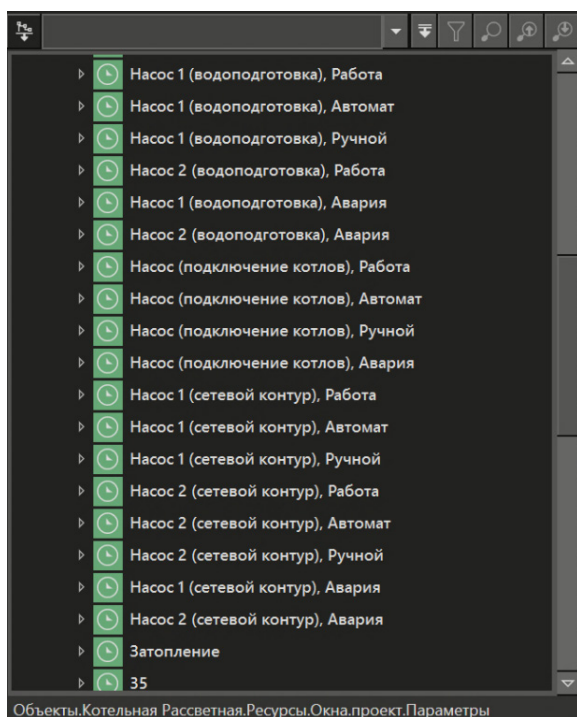
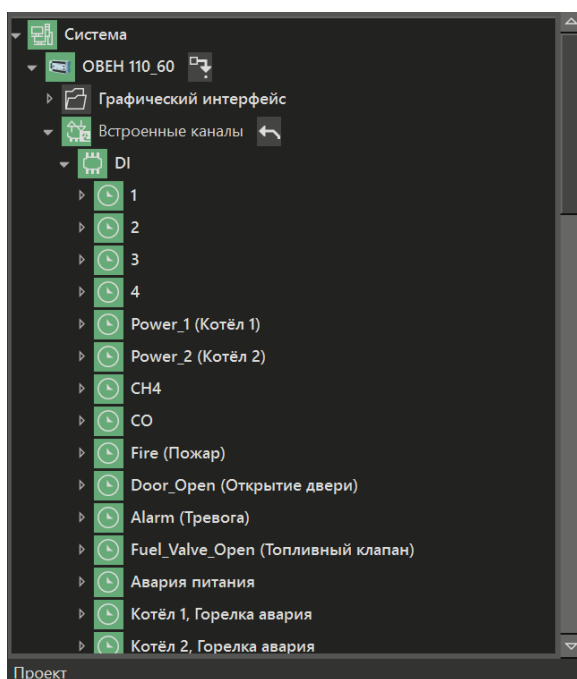


Рис. 15. Переименование входов ПЛК дистрибутива ОБЕН 110_60 в MasterSCADA 4D

Для подключения микроконтроллера к компьютеру, на котором будет инсталлирована SCADA, необходимо установить соединение, чтобы компьютер видел ПЛК. Для этого среди портов микроконтроллера существует несколько разъемов — например, USB и Ethernet (см. табл. 1). С помощью одного из этих кабелей необходимо соединить микроконтроллер с компьютером. При подключении через USB на компьютере необходимо установить USB драйвер СПК1XX и определить установленный драйвер устройству RNDIS (рис. 16). При выборе Ethernet среди сетевых подключений появится «Подключение по локальной сети», в свойствах которого необходимо настроить протокол TCP/IPv4 и прописать IP-адрес (рис. 17).

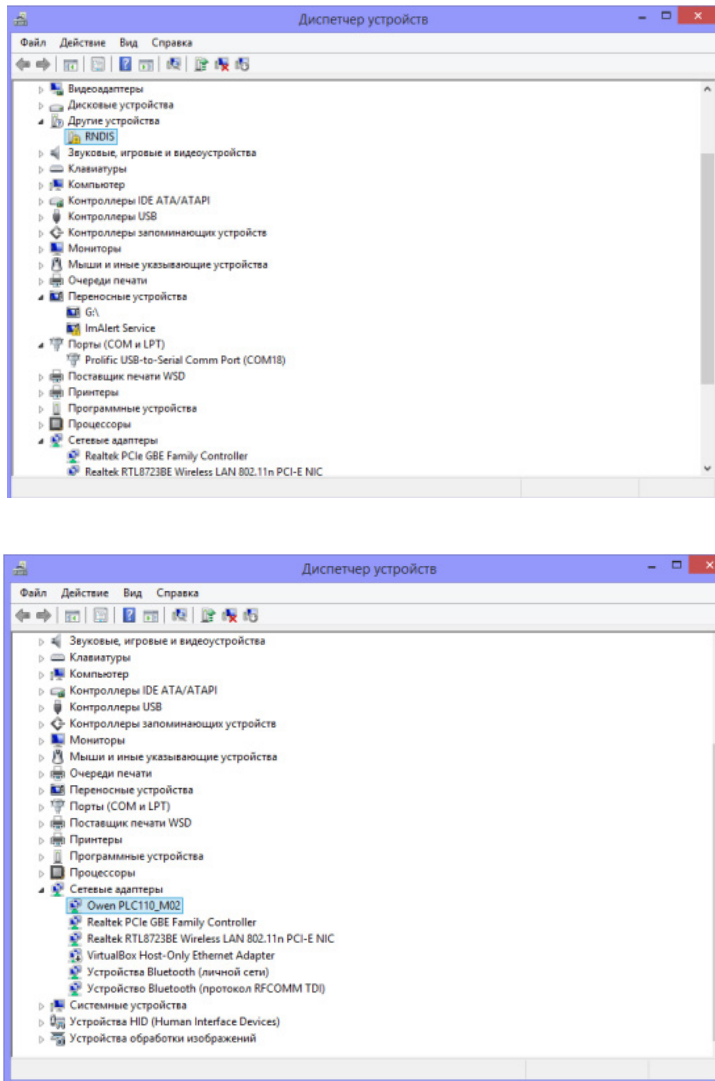


Рис. 16. Диспетчер устройств до (слева) и после (справа) установки USB драйвера СПК1XX

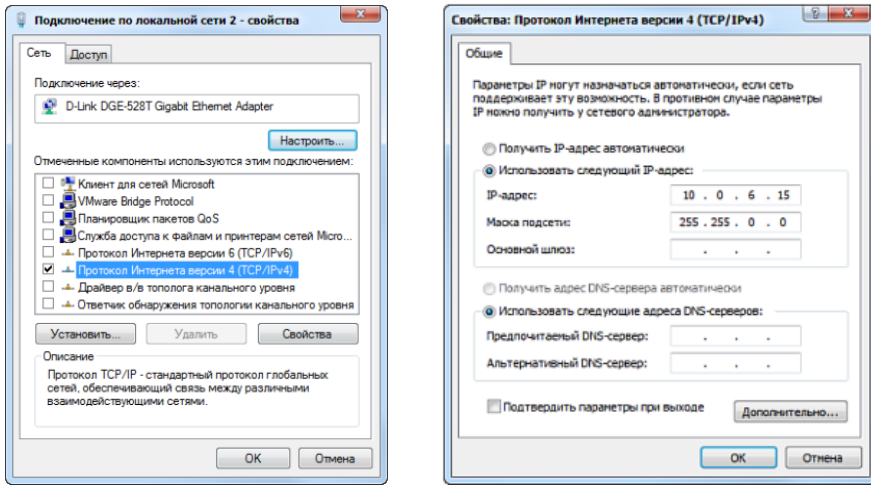


Рис. 17. Подключение протокола TCP/IPv4 в Свойствах локальной сети (слева) и настройка IP-адрес в Свойствах протокола TCP/IPv4 (справа)

После установки локального подключения ПЛК к ПК необходимо установить (настроить) возможность удаленного подключения (чтобы SCADA на ПК в диспетчерской, могла связаться с контроллером в котельной). Для этого нужно изменить IP-адрес микроконтроллера.

Необходимо зайти в настройки ПЛК через дистрибутив Putty. Для этого нужно создать подключение напрямую, с помощью USB, Ethernet-кабеля (рис. 18), или с помощью кабеля KC14, подключенному к порту Debug RS-232 (рис. 19).

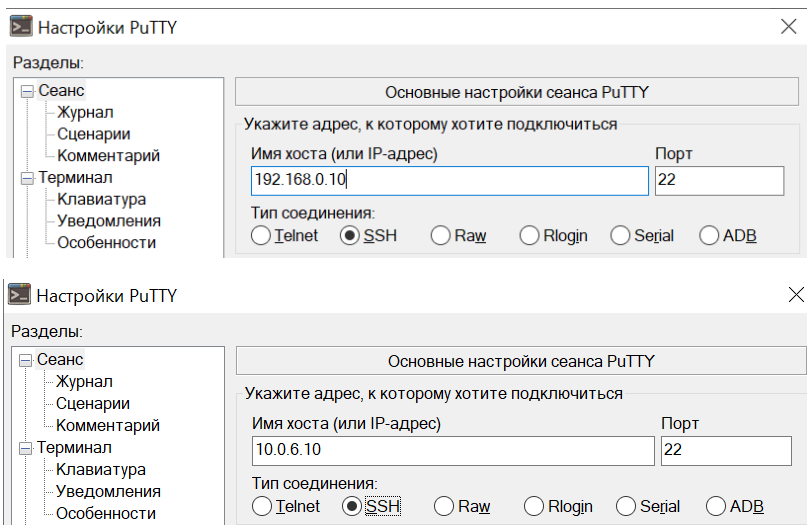


Рис. 18. Подключение дистрибутива Putty к ПЛК через USB-интерфейс (слева) и через Ethernet-интерфейс (справа)

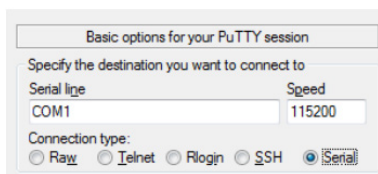


Рис. 19. Подключение дистрибутива Putty к ПЛК через порт Debug RS-232, используя кабель KC14

После изменения IP-адреса для удаленного подключения микроконтроллера к SCADA достаточно прописать IP-адрес ПЛК в настройках объекта дерева «Система» (в MasterSCADA 4D) или в параметрах связи объекта (в CodeSys) (рис. 20).

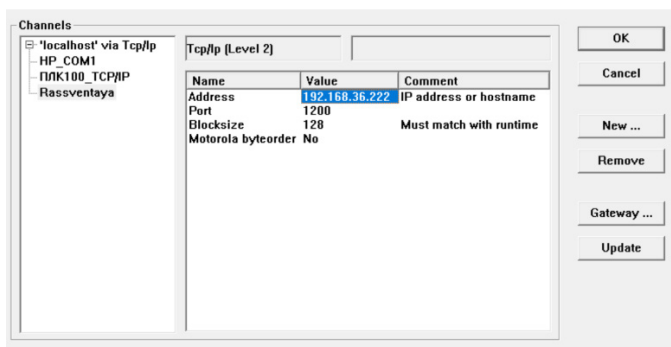
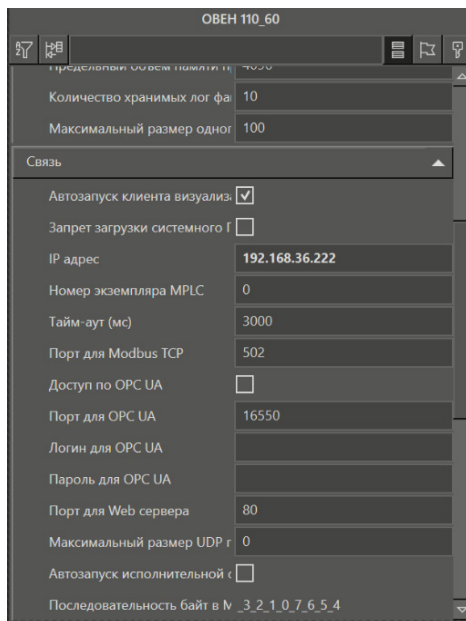


Рис. 20. Подключение ПЛК к SCADA через IP-адрес в MasterSCADA 4D (слева) и в CodeSys (справа)

Таким образом, было настроено подключение микроконтроллеров ОВЕН ПЛК110 [M02] и ОВЕН ПЛК200 CS к панели СП310 Б в котельной и к MasterSCADA 4D в диспетчерском пункте. Рабочие экраны итоговых версий программ диспетчеризации на панели СП310 Б и в MasterSCADA 4D, внедренных в производство, представлены на рисунках 21 и 22.

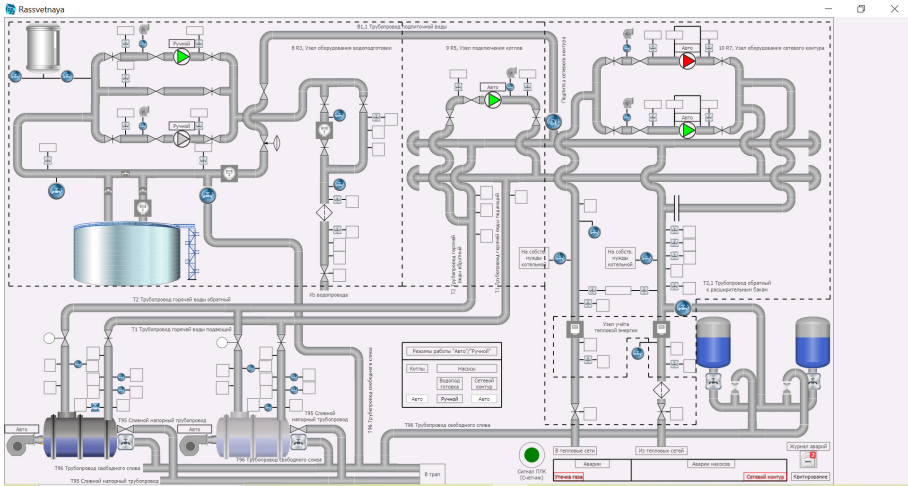


Рис. 21. Итоговый экран визуализации системы диспетчеризации в MasterSCADA 4D в рабочем режиме

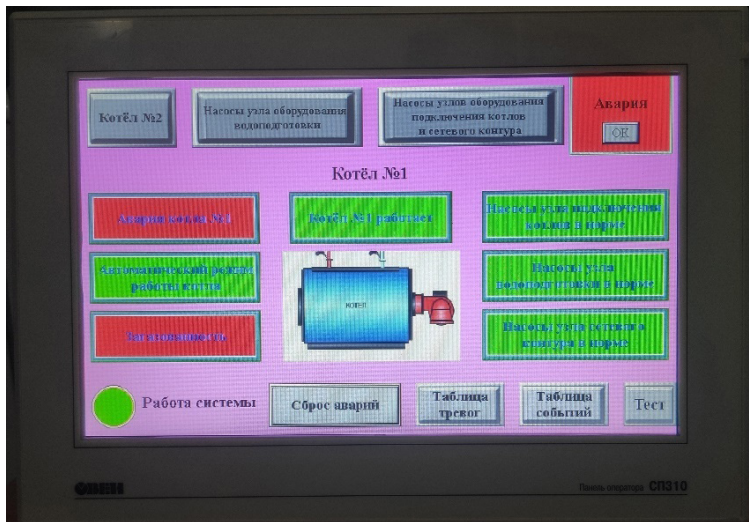


Рис. 22. Итоговый экран визуализации панели оператора ОВЕН СП310 Б в рабочем режиме

Рабочие экраны отображают производственный процесс в котельной. Глядя на них, можно увидеть, что произошла авария, связанная с утечкой

газа, а также повреждением насоса сетевого контура (рис. 21). Операторы и диспетчеры, глядя экран SCADA или HMI, видят необходимую информацию о рабочем процессе и, заметив аварию, могут начать предпринимать действия по ее предотвращению.

Список литературы

1. *Муниципальное* предприятие городского округа «Город Калининград» Калининградтеплосеть. О предприятии. URL: <https://www.kts39.ru/about/> (дата обращения: 05.05.2023).

2. *Зыкин С. А., Катаева М. И.* Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом на предприятии // Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2018. Т. 1. С. 139—140.

3. *Убайдуллаев Ш. Р., Акбарова С.* Промышленные сети и интерфейсы в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Курск, 2019.

4. *Андрюшин А. В., Сабанин В. Р., Смирнов Н. И.* Управление и инноватика в теплоэнергетике // Московский энергетический институт. М., 2011. С. 15.

5. *Егоров А. А.* Промышленные контроллеры: прошлое, настоящее и будущее // Автоматизация IT в энергетике. М., 2018. № 6 (107). С. 36—50.

6. *Елизаров И. А., Мартемьянов Ю. Ф., Схиртладзе А. Г., Фролов С. В.* Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры : учеб. пособие. М., 2004. С. 7—8.

7. *ОВЕН*, Оборудование для автоматизации. Каталог продукции. Программируемые устройства. Программируемые логические контроллеры. ПЛК200 контроллер для малых и средних систем автоматизации. URL: <https://owen.ru/product/plk200> (дата обращения: 05.05.2023).

8. *ОВЕН* ПЛК110. *ОВЕН* ПЛК160. Контроллеры для средних систем автоматизации. URL: <https://owen.ru/uploads/plk110.pdf> (дата обращения: 05.05.2023).

9. *Программирование* ПЛК110-MS4. Руководство пользователя. URL: https://owen-prom.ru/files/rp_programmirovanie_plk110-ms4_31.pdf (дата обращения: 05.05.2023).

10. *Быстрый* старт ПЛК200. URL: https://owen-prom.ru/files/plr200_bystart.pdf (дата обращения: 05.05.2023).

11. *ПЛК110-MS4*. Контроллер программируемый логический. Руководство по эксплуатации. URL: https://owen-prom.ru/files/plk110_5.pdf (дата обращения: 05.05.2023).

12. *ПЛК200*. Программируемый логический контроллер. Руководство по эксплуатации (версия 1.11). URL: https://owen-prom.ru/files/plk200_ruk.pdf (дата обращения: 05.05.2023).

13. *ОВЕН*, Оборудование для автоматизации. Каталог продукции. Программируемые устройства. Панели оператора. URL: <https://owen.ru/product/sp3xx> (дата обращения: 05.05.2023).

14. *Панели* оператора СП3хх. Руководство по эксплуатации (версия 2.1). URL: https://owen.ru/uploads/251/sp3xx_gp_2.1.pdf (дата обращения: 05.05.2023).

15. *SCADA* система MasterSCADA — российская SCADA. URL: <https://insat.ru/products/?category=9&etext=&yclid=2703221248334815837> (дата обращения: 05.05.2023).

Об авторах

Алексей Георгиевич Аникович — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: dog-200@mail.ru

Ирина Александровна Черкашина — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: ira603@mail.ru

Сергей Валерьевич Нестеров — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: serg0044@mail.ru

Артем Владимирович Федянин — руководитель группы автоматизации бизнес-процессов МП «Калининградтеплосеть», Калининград, Россия

E-mail: artem.fedyanin@kts39.ru

The authors

Alexey G. Anikovich, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: dog-200@mail.ru

Irina A. Cherkashina, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: ira603@mail.ru

Dr Sergei V. Nesterov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: serg0044@mail.ru

Artem V. Fedyanin, Head of Business Process Automation Group of MP «Kaliningradtepliset», Kaliningrad, Russia.

E-mail: artem.fedyanin@kts39.ru

Д. А. Казакова, М. С. Копанев

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕКРУТИНГА
И ОЦЕНКИ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СОТРУДНИКОВ БАНКА**

Описывается разработка модели машинного обучения для информационной системы автоматизации рекрутинга и оценки квалификационных показателей сотрудников банка. Методология исследования включает сбор и предобработку данных, выбор алгоритмов машинного обучения, обучение модели, оценку качества и использование ее для автоматизации процессов. Результаты работы могут быть полезны для HR-специалистов и менеджеров банковского сектора, занимающихся вопросами подбора кадров. Создание алгоритмов и моделей искусственного интеллекта для информационной системы имеет огромную значимость, так как это позволяет автоматизировать процессы принятия решений и повысить эффективность работы. Машинное обучение может использоваться для анализа больших объемов данных, выявления закономерностей и прогнозирования событий. Это позволит сократить время анализа данных и принятия решений, что особенно важно в условиях быстро меняющейся ситуации. Основные результаты исследования включают успешную разработку и внедрение модели, что предполагает повышение эффективности работы банка и качества обслуживания клиентов.

The article describes the development of a machine learning model for an information system for automating recruiting and evaluating the qualification indicators of bank employees. The article presents the main stages of creating a model, including data collection and preprocessing, the choice of machine learning algorithms, and assessing the quality of the model. The authors discuss the possibilities of using the model to optimize the recruitment process and improve the quality of work of bank employees. The results of the study may be useful for HR specialists and managers of the banking sector involved in recruiting and personnel management. The development of a machine learning model for an information system is of great importance, as it allows you to automate decision-making processes and increase the efficiency of the system. A machine learning model can be used to analyze large amounts of data, identify patterns, and predict future events. This allows you to reduce the time for data analysis and decision-making, which is especially important in a rapidly changing situation. In addition, the machine learning model can help improve the customer experience, optimize production and resource management processes, and improve the security of the information system. Thus, the develop-

ment of a machine learning model for an information system is a necessary and important task that allows you to increase the efficiency of the system and improve the quality of customer service.

Ключевые слова: машинное обучение, рекрутинг, оценка квалификационных показателей, банк, информационная система, разработка, управление персоналом

Keywords: machine learning, recruiting, performance assessment, bank, information system, development, personnel management

Создание алгоритма машинного обучения для информационной системы автоматизации рекрутинга и оценки квалификационных показателей сотрудников банка является важным шагом в повышении эффективности работы банка и улучшении качества обслуживания клиентов [1].

Для разработки искусственного интеллекта необходимо провести анализ данных о сотрудниках банка, включая их профессиональный опыт, квалификационные показатели, результаты оценки работы и другие параметры [3].

На основе этой информации можно разработать модель машинного обучения, которая будет использоваться для прогнозирования квалификационных показателей новых сотрудников и оценки работы текущих сотрудников [4]. Модель может быть настроена на выявление связей между различными параметрами и прогнозирование результатов на их основе [2].

Кроме того, искусственный интеллект может использоваться для автоматического отбора кандидатов на новые должностные вакансии в банке, что значительно ускорит процесс рекрутинга и поможет найти наилучших работников [5].

При разработке модели машинного обучения для оценки квалификационных показателей сотрудников коммерческого банка, поиск данных осуществлялся на сайте *Kaggle*. Были собраны данные о сотрудниках, их опыте работы, КРІ (ключевых показателях эффективности), количестве пройденных курсов повышения квалификации, образовании, трудовых навыках и компетенциях [15].

Модель было принято основывать на методе регрессии по следующим причинам:

1. Прогнозирование. Регрессия позволяет предсказывать числовые значения, такие как рейтинг квалификации сотрудника или его производительность. Это полезно при оценке и сравнении кандидатов на вакансию или при определении эффективности текущих работников.

2. Интерпретируемость. Модель регрессии обеспечивает возможность интерпретировать влияние каждого признака на результат. Это позволяет понять, какие факторы имеют наибольшее значение для успеха сотрудников банка и использовать эту информацию при принятии решений о найме и улучшении квалификации.

3. Простота реализации. Регрессия является относительно простым методом машинного обучения, который легко применить к набору дан-

ных о сотрудниках банка. Это позволяет быстро разработать и внедрить модель, что особенно важно в условиях быстро меняющегося рынка труда.

Для разработки модели был использован язык программирования Python. Он обладает простым и читаемым синтаксисом, что делает его легким для написания и понимания кода. Большое количество библиотек и фреймворков в Python позволяют разработчикам экономить время и усилия при создании программ. Кросс-платформенность языка позволяет запускать программы на различных операционных системах без изменений в коде.

Первым шагом при написании модели машинного обучения в Python была загрузка необходимых библиотек. Нужные библиотеки импортированы следующим образом [6]:

```
from sklearn.svm import SVR
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error
from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
import pandas as pd
from sklearn import metrics
from keras.layers import Dense
from keras import Sequential
import pandas as pandas
import numpy as np
import xgboost as xgb
```

Были подготовлены данные для обучения модели, проведен их предварительный анализ и очистка от выбросов и пропущенных значений [8].

Далее, для превращения категориальных значений в числовые создан словарь, где каждой категории соответствует уникальное числовое значение [9]:

```
gender_map = {
    'f': 0,
    'm': 1
}

departament_map = {
    'Sales & Marketing': 0,
    'Operations': 1,
    'Technology': 2,
    'Analytics': 3,
    'R&D': 4,
    'Procurement': 5,
    'Finance': 6,
    'HR': 7,
    'Legal': 8,
}
```

```

education_map = {
    'Below Secondary': 0,
    'Bachelor\'s': 1,
    'Master\'s & above': 2,
}

recruitment_channel_map = {
    'sourcing': 0,
    'other': 1,
    'referred': 2,
}

```

После создания словарей следовала разработка послойной модели. Послойная модель в программировании представляет собой архитектурный подход, при котором модель разделяется на слои, каждый из которых выполняет определенную функцию и взаимодействует только с соседними слоями.

Создание послойной модели в Python может быть полезно для разработки крупных проектов, которые требуют хорошей организации и структурирования кода. При этом каждый слой может быть реализован в виде отдельного модуля или пакета, что упрощает поддержку и расширение приложения.

Для разработки последовательной модели применялся класс `Sequential`. Он поддерживает различные типы слоев, такие как сверточные, пулинговые, полносвязные и другие, что позволяет создавать разнообразные модели для решения различных задач машинного обучения [10].

В первых двух слоях необходимо было внедрить функцию активации `ReLU`, которая используется в нейронных сетях для добавления нелинейности в выходной сигнал нейрона. Она имеет несколько преимуществ перед другими функциями активации, такими как сигмоида или гиперболический тангенс. `ReLU` более проста в вычислении и обладает лучшей скоростью сходимости при обучении нейронных сетей. Кроме того, она помогает решить проблему затухания градиента, которая может возникнуть при использовании других функций активации [11].

В третьем слое использовалась функция активации сигмоида. Она действует для преобразования входного сигнала в выходной, который может быть интерпретирован как вероятность.

Применяемые функции активации были выбраны экспериментальным методом.

При разработке модели нейронной сети использовалась библиотека `Keras`:

```

def create_model(shape):
    m = Sequential()
    m.add(Dense(64, activation='relu', input_shape=shape))
    m.add(Dense(64, activation='relu'))
    m.add(Dense(1, activation='sigmoid'))

```

Для настройки параметров обучения и достижения наилучшего результата, была использована компиляция и применен оптимизатор.

Компиляция с оптимизатором — это важный шаг при обучении модели. В библиотеке Keras можно выбрать различные оптимизаторы, такие как SGD, Adam, Adagrad, RMSprop и др. [12].

Для компиляции модели с оптимизатором в Keras использовался метод `compile()`. В качестве параметра `optimizer` передается выбранный оптимизатор. В разрабатываемой модели применен оптимайзер RMSprop [14]. Выбранный оптимайзер является хорошим выбором при обучении модели для различных задач, особенно когда данные имеют высокую размерность и много шума.

В модели применяются функции потерь MSE (Mean Squared Error) и MAE (Mean Absolute Error). Они являются двумя распространенными метриками для оценки качества модели в задачах регрессии.

MSE вычисляет среднее значение квадратов отклонений предсказанных значений от реальных. Чем меньше значение MSE, тем лучше модель.

MAE вычисляет среднее значение абсолютных отклонений предсказанных значений от реальных. Она более устойчива к выбросам, чем MSE. Чем меньше значение MAE, тем лучше модель.

Компиляция была реализована следующим образом:

```
m.compile(optimizer='rmsprop', loss='mse', metrics=['mae'])
return m
```

Далее была осуществлена нормализация данных. Она позволяет сравнивать и анализировать признаки, имеющие различные единицы измерения и диапазоны значений. Это также может помочь улучшить производительность алгоритмов машинного обучения, устранить проблемы с выбросами и улучшить интерпретируемость результатов [13].

Была осуществлена нормализация данных и проведено замещение ненужных слов на цифры, назначенные ранее:

```
def normalize_data(df):
    df = df.drop('is_promoted', axis=1)
    df = df.dropna()
    df.department = df.department.map(department_map)
    df.region = df.region.map(lambda x: int(x.replace('region_', '')))
    df.education = df.education.map(education_map)
    df.gender = df.gender.map(gender_map)
    df.recruitment_channel = df.recruitment_channel.map(recruitment_channel_map)
    return df
```

Затем был произведен вывод различных необходимых метрик (среднеабсолютной и среднеквадратичной ошибки, корня из среднеквадратичной ошибки), передавая модели тестовые и предугаданные данные:

```
def model_result(y_test, y_pred, label):
    print(label)
    df = pd.DataFrame({'Actual': y_test, 'Predicted': y_pred, 'Difference': abs(y_test - y_pred)})
    print(df)
```

```

print('Mean Absolute Error:', metrics.mean_absolute_error(y_test, y_
pred))
print('Mean Squared Error:', metrics.mean_squared_error(y_test, y_
pred))
print('Root Mean Squared Error:', np.sqrt(metrics.mean_squared_er
ror(y_test, y_pred)))

```

После этого была создана и обучена последовательная послонная модель Sequential:

```

def sequential(X_train, X_test, y_train, y_test):
    model = create_model((X_train.shape[1],))
    model.fit(X_train, y_train, batch_size=32, epochs=20, validation_
data=(X_test, y_test))
    y_pred = model.predict(X_test).flatten()

```

```

df = pd.DataFrame({'Y test':y_test, 'Y predicted': y_pred, '|Y —
Y predicted|': abs(y_test — y_pred)})
print(df)
print('Средняя квадратичная ошибка ' + str(mean_squared_error(y_
test, y_pred)))
print('Средняя абсолютная ошибка ' + str(mean_absolute_error(y_
test, y_pred)))

```

При разработке модели машинного обучения, было реализовано шесть методов регрессии: lasso, ridge, decision_tree, K-NN, SVM и XGBoost. Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем определить наилучшее и применять в модели для информационной системы.

Результаты работы модели lasso показаны на рисунке 1.

```

Best alpha = 0.01
Lasso result

```

	Actual	Predicted	Difference
2760	0.151273	0.428376	0.277104
2761	0.937235	0.751425	0.185810
2762	0.682234	0.573344	0.108890
2763	0.872566	0.672184	0.200381
2764	0.846091	0.752189	0.093902
...
17252	0.501560	0.567747	0.066188
17253	0.399388	0.615613	0.216225
17254	0.200642	0.617111	0.416469
17255	0.506411	0.807740	0.301330
17256	0.966258	0.414198	0.552060

```

[14497 rows x 3 columns]
Mean Absolute Error: 0.21191312279584845
Mean Squared Error: 0.06384559504745063
Root Mean Squared Error: 0.2526768589472543

```

Рис. 1. Результаты работы модели lasso

Результаты работы модели ridge показаны на рисунке 2.

```
Best alpha = 0.01
Ridge result
      Actual Predicted Difference
2760  0.151273  0.410897  0.259624
2761  0.937235  0.665476  0.271760
2762  0.682234  0.551993  0.130241
2763  0.872566  0.646768  0.225798
2764  0.846091  0.936219  0.090128
...    ...    ...    ...
17252 0.501560  0.448380  0.053180
17253 0.399388  0.580801  0.181413
17254 0.200642  0.526128  0.325486
17255 0.506411  0.688112  0.181702
17256 0.966258  0.504256  0.462002

[14497 rows x 3 columns]
Mean Absolute Error: 0.1997566352549959
Mean Squared Error: 0.059551468860599206
Root Mean Squared Error: 0.2440316964260979
```

Рис. 2. Результаты работы модели ridge

Результаты работы модели decision_tree показаны на рисунке 3.

```
Decision tree result
      Actual Predicted Difference
2760  0.151273  0.857616  0.706343
2761  0.937235  0.818587  0.118648
2762  0.682234  0.102976  0.579258
2763  0.872566  0.872060  0.000505
2764  0.846091  0.871151  0.025060
...    ...    ...    ...
17252 0.501560  0.114295  0.387265
17253 0.399388  0.698746  0.299357
17254 0.200642  0.699012  0.498369
17255 0.506411  0.413937  0.092473
17256 0.966258  0.359832  0.606426

[14497 rows x 3 columns]
Mean Absolute Error: 0.2334780551657533
Mean Squared Error: 0.10298828477304235
Root Mean Squared Error: 0.32091787855001525
```

Рис. 3. Результаты работы модели decision_tree

Результаты работы модели k-ближайших соседей показаны на рисунке 4.

	Y	Y predicted	P2 - P2 predicted
0	0.491625	0.420124	0.071501
1	0.659936	0.430665	0.229272
2	0.679259	0.482145	0.197115
3	0.430470	0.513432	0.082962
4	0.164767	0.419934	0.255166
...
14593	0.634924	0.468523	0.166401
14594	0.410739	0.453316	0.042577
14595	0.687725	0.410850	0.276874
14596	0.657821	0.472606	0.185215
14597	0.179297	0.493589	0.314292

[14598 rows x 3 columns]
Минимальная средняя квадратичная ошибка 0.04851455994654494 при 53 соседей
Минимальная средняя абсолютная ошибка 0.18058134034292037 при 51 соседей

Рис. 4. Результаты работы модели k-ближайших соседей

На рисунке 4 видно, что минимальная средняя квадратичная ошибка модели k-ближайших соседей равна приблизительно 0,0485, средняя абсолютная ошибка модели K-NN равна приблизительно 0,1806. Из сравнения выведенных результатов рукописной модели sequential и модели k-ближайших соседей сделан вывод, что у рукописной модели ошибка немного меньше.

Результаты работы модели опорных векторов показаны на рисунке 5.

	P2	P2 predicted	P2 - P2 predicted
0	0.491625	0.435094	0.056531
1	0.659936	0.445652	0.214284
2	0.679259	0.409743	0.269516
3	0.430470	0.488803	0.058333
4	0.164767	0.384668	0.219900
...
14593	0.634924	0.450779	0.184145
14594	0.410739	0.466962	0.056223
14595	0.687725	0.371728	0.315997
14596	0.657821	0.369402	0.288419
14597	0.179297	0.460706	0.281409

[14598 rows x 3 columns]
Средняя квадратичная ошибка 0.04448336623877886
Средняя абсолютная ошибка 0.17446099744232596

Рис. 5. Результаты работы модели опорных векторов

На рисунке 5 видно, что минимальная средняя квадратичная ошибка модели опорных векторов равна приблизительно 0,0445, средняя абсолютная ошибка модели равна приблизительно 0,1745. При сравнении

результатов работы модели k-ближайших соседей и модели опорных векторов сделан вывод, что при реализации метода SVM и средняя квадратичная ошибка, и средняя абсолютная ошибка меньше.

Результаты работы модели с применением метода бустинга показаны на рисунке 6.

	Y test	Y predicted	Y - Y predicted
0	0.491625	0.423818	0.067807
1	0.659936	0.240920	0.419017
2	0.679259	0.405657	0.273602
3	0.430470	0.500532	0.070062
4	0.164767	0.419986	0.255218
...
14593	0.634924	0.404044	0.230880
14594	0.410739	0.331823	0.078916
14595	0.687725	0.387658	0.300067
14596	0.657821	0.488418	0.169403
14597	0.179297	0.483651	0.304355
[14598 rows x 3 columns]			
Средняя квадратичная ошибка 0.04158468884024287			
Средняя абсолютная ошибка 0.1687777477135582			

Рис. 6. Результаты работы модели, с применением метода бустинга

На рисунке 6 видно, что минимальная средняя квадратичная ошибка, с применением метода бустинга равна приблизительно 0,0416, средняя абсолютная ошибка модели равна приблизительно 0,1688. При сравнении результатов работы модели опорных векторов и модели с применением метода бустинга был сделан вывод, что при реализации метода бустинга и средняя квадратичная ошибка, и средняя абсолютная ошибка меньше.

Таким образом, посредством реализации различных моделей регрессии подобрана наилучшая для будущей информационной системы. При сравнении средней абсолютной и средней квадратичной ошибки моделей, сделан вывод о том, что у модели с применением метода бустинга и модели с применением метода ridge все ошибки меньше, чем у других. Следовательно, при разработке информационной системы автоматизации рекрутинга и оценки квалификационных показателей сотрудников банка необходимо применить именно модель с использованием метода ridge применением метода бустинга.

В итоге была разработана модель машинного обучения, основанная на методе регрессии, которая позволяет прогнозировать квалификационные показатели новых сотрудников и оценивать работу текущих сотрудников. Для подготовки данных для обучения модели был проведен предварительный анализ и очистка данных от выбросов и пропущенных значений. Категориальные значения были преобразованы в числовые с помощью словарей, где каждой категории соответствует уникальное числовое значение. Модель была обучена и протестирована на данных

о сотрудниках банка. Результаты показали, что модель регрессии позволяет достаточно точно прогнозировать квалификационные показатели сотрудников и оценивать их работу.

Соответственно, создание алгоритма машинного обучения для автоматизации рекрутинга и оценки квалификационных показателей сотрудников банка является важным шагом в повышении эффективности работы банка и улучшении качества обслуживания клиентов. Модель машинного обучения, основанная на методе регрессии, дает возможность прогнозировать и оценивать квалификационные показатели сотрудников с высокой точностью.

Список литературы

1. *Воронцов К. В.* Лекции по алгоритмам восстановления регрессии. М., 2007.
2. *Bishop C.* Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics). Springer, 2007.
3. *Маккинли У.* Python и анализ данных. М., 2015.
4. *Эффективные алгоритмы* / О. Н. Долинина, В. В. Печенкин, Б. Л. Файфель, К. Д. Кузнецова. Саратов, 2020.
5. *Шолле Ф.* Глубокое обучение на Python. СПб., 2018.
6. *Вьюгин В. В.* Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М., 2013.
7. *Бринк Х., Ричардс Дж., Феверолф М.* Машинное обучение. СПб., 2017.
8. *Шарден Б., Массарон Л., Боскетти А.* Крупномасштабное машинное обучение вместе с Python / пер. с англ. А. В. Логунова. М., 2018.
9. *Раиша С.* Python и машинное обучение / пер. с англ. А. В. Логунова. М., 2017.
10. *Флах П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А. А. Слинкина. М., 2015.
11. *Агравал А.* Искусственный интеллект на службе бизнеса. Как машинное прогнозирование помогает принимать решения. М., 2019.
12. *A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance* / Th. P. Carvalho, R. Vitac, R. da P. Franciscob [et al.]. Alcala, 2019.
13. *Лекция 6.* Python и Машинное обучение. URL: https://www.youtube.com/watch?v=CqNf4mfd4Hw&feature=emb_logo (дата обращения: 03.04.2023).
14. *Балабанов Н. Р.* Обзор библиотек обучения нейронных сетей на языке Python // Молодой ученый. 2020. № 46 (336). С. 6—8.
15. *Hybrid quantum-classical Neural Networks with PyTorch and Qiskit.* URL: <https://qiskit.org/textbook/ch-machine-learning/machine-learning-qiskit-pytorch.html> (дата обращения: 28.04.2023).

Об авторах

Дарья Александровна Казакова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: darya.kazakova.99@list.ru

Михаил Сергеевич Копанев — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: ko5anev@gmail.com

The authors

Daria Alexandrovna Kazakova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: darya.kazakova.99@list.ru

Mikhail Sergeevich Kopanev, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: ko5anev@gmail.com

Е. Н. Кесова, Е. М. Носарев

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОИСКА
И СИГНАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
ПОПАДАНИЯ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ В СЫРЬЕ
НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ ПРЕДПРИЯТИЯ**

Описывается процесс разработки программного обеспечения поиска и сигнализации для системы обнаружения посторонних предметов в сырье на производственной линии предприятия. Исследуется оборудование необходимое для работы автоматизированной системы, а также процесс создания программного средства, предназначенного для выявления объектов по цветовому признаку на изображении, полученном с камеры видеонаблюдения, и оповещении сотрудников за счет передачи сигнала на модуль удаленного ввода/вывода.

Разработанная система предполагает значительное снижение производственных потерь на этапе подготовки объектов за счет отслеживания попадания в сырье посторонних предметов, которые могут привести к браку итоговой продукции в дальнейшем. Рассматривается возможность подключения к модулю ввода/вывода и удаленной камере видеонаблюдения посредством сетевых протоколов Modbus TCP/IP и RTSP для обмена данными между устройствами и сервером. Обработка входного изображения реализована с помощью алгоритмов компьютерного зрения, позволяющих находить необходимые объекты основываясь на цвете. Этот метод был выбран после проведения анализа требований и изучения существующих решений. Также разработана база данных, необходимая для хранения информации о компонентах, уведомлениях и других событиях. Это обеспечивает централизованное хранение и доступ к сведениям о системе, позволяя эффективно анализировать данные и принимать соответствующие меры в случае необходимости.

В результате была разработана автоматизированная система, которая позволяет сократить количество бракованной продукции и, соответственно, избежать материальных затрат.

The software needed to track foreign objects is an essential tool for production work. It allows you to avoid additional raw material costs that may arise due to the human factor.

The purpose of this article is to develop a search and alarm software for the detection of foreign objects in the raw materials on the production line of the enterprise. The work describes the necessary equipment for an automated system and the process of creating a software tool for the detection of foreign objects by color on the image obtained from the video camera, and alerting employees by sending a signal to a remote I / O module.

The developed system assumes significant reduction of production losses at the stage of preparation of objects due to tracking of foreign objects in the raw material, which can lead to rejected final products in the future. We consider the possibility of connecting to the input/output module and the remote camera through the network protocols Modbus TCP / IP and RTSP for data exchange between devices and the server. In the current work, the input image processing for foreign object detection is implemented using computer vision algorithms to find the necessary objects based on color. This method was chosen after analyzing the requirements and studying existing solutions. A database was also developed that implements the data structure necessary to store information about components, detected foreign objects, notifications and other events. This provides centralized storage and access to information about the foreign object detection system, allowing the data to be efficiently analyzed and appropriate actions to be taken when necessary.

As a result, an automated system has been developed that reduces the number of rejected products and therefore avoids material costs.

Ключевые слова: автоматизация, обнаружение объекта, база данных, Ethernet-модуль, сетевые протоколы, Modbus TCP, RTSP, цветовая модель, HSV

Keywords: automation, object detection, database, Ethernet module, network protocols, Modbus TCP, RTSP, color model, HSV

Контроль качества выпускаемой продукции является одной из перво-степенных задач, стоящих перед промышленными предприятиями. Внедрение автоматизированной системы (далее — АС) контроля в процесс производства помогает сократить количество бракованной продукции. Также к плюсам использования подобной АС можно отнести:

- повышение эффективности работы и увеличение прибыли предприятия;
- увеличение прибыли за счет снижения расходов на производство;
- улучшение общей системы контроля качества продукции;
- сокращение влияния человеческого фактора на производство;
- привлечение новых заказчиков за счет повышения качества продукции;
- поддержание репутации компании в глазах потребителей.

Соответственно, можно предположить, что предприятия достаточно замотивированы внедрять данную систему.

Одним из этапов производства, на котором можно эффективно сократить влияние человеческого фактора на итоговый продукт является процесс выгрузки сырья на производственную ленту, так как есть вероятность, что сотрудник, выполняя монотонную работу может допустить ошибку в процессе подготовки [9].

На данном этапе выполняются важные операции по обработке и подготовке сырьевых материалов различных типов в зависимости от сферы деятельности предприятия. Выбор оборудования и технологий также обусловлен типом сырья и требованиями технологического процесса. На

многих предприятиях одной из ключевых задач сотрудников на обозначенном этапе является распаковка поступившего сырья для последующего его использования в производстве [1].

Выполняется вышеописанный процесс на так называемых участках подготовки. На предприятии каждый такой участок обычно состоит из следующих компонентов:

1. Камера видеонаблюдения, которая служит для обеспечения безопасности и визуального контроля процесса подготовки сырья, а также для записи видеофрагментов прошедшего недавно производства.

2. Рабочее пространство — зона, где сотрудники выполняют распаковку сырья, которая оборудована необходимыми инструментами для эффективной и безопасной обработки материалов в зависимости от их типов.

3. Емкость для подготовленного сырья. После обработки сырье помещается в контейнер, который обеспечивает защиту подготовленных материалов и позволяет осуществить их дальнейшее перемещение на следующий участок производства.

Также на современных предприятиях, чаще всего на пищевых, используется так называемое «цветовое кодирование». Различные упаковки имеют свои ярко-выраженные цвета, отличные от непосредственно запакованного в них сырья. Данное кодирование позволяет разработать АС, которая будет по заданным цветовым признакам определять наличие постороннего предмета в емкости для подготовки сырья, после чего оповещать об этом ответственных сотрудников для быстрого принятия решений.

АС обнаружения посторонних объектов (далее — АС ОПП) в сырье на производственной линии будет выполнять следующие функции:

1. Вывод и обработка изображения камеры. Программное средство получает изображение с камеры (на современных предприятиях чаще всего используются камеры удаленного доступа, которые подключены к локальной сети), расположенной на нужном участке. После чего, к кадру применяются алгоритмы обработки изображения с целью выявления постороннего предмета по заданному цветовому признаку.

2. Передача сигнала на систему оповещения. При обнаружении предмета программа подает сигнал на контроллер, который активирует систему оповещения предприятия, чаще всего звуковую, работающую до тех пор, пока сотрудники не устранят проблему.

3. Документирование инцидентов. В данном контексте «инцидент» — временной промежуток нахождения постороннего предмета в емкости для подготовленного сырья. Необходимо для дополнительного контроля и анализа произошедшего инцидента в случае, если он повлиял на качество производимой продукции.

Таким образом, для функционирования АС ОПП в сырье на производственной линии предприятия (рис. 1) потребуются следующие программные и аппаратные средства:

- ПК оператора производственной линии;
- СУБД для манипуляции данными, полученными при контроле производственных процессов;
- камера, расположенная над участком автоматизируемого процесса;

- система оповещения;
- устройство для передачи сигнала на систему оповещения.



Рис. 1. Архитектура АС ОПП

На производстве для обеспечения безопасности и контроля производственных процессов используются так называемые IP-камеры, которые подключаются не напрямую к ПК, а к локальной сети предприятия [15]. Для передачи видеопотока такие камеры используют RTSP (Real-Time Streaming Protocol) — протокол прикладного уровня, созданный для систем телекоммуникаций, который осуществляет управление доставкой данных мультимедиа. Для получения изображения с камеры используется URL-адрес, который начинается с «rtsp://» и содержит в себе данные для входа, IP-адрес устройств, порт и т. д. Формат данной строки зависит от производителя.

Для функционирования АС ОПП потребуется устройство для передачи сигнала на систему оповещения. Возможны два варианта [10]:

- 1) программируемый промышленный контроллер (ПЛК);
- 2) Ethernet-модуль ввода/вывода.

В первом случае подключение происходит напрямую к ПЛК, который выполняет функцию управления работой и ее контроля. При получении соответствующего сигнала или команды, ПЛК активирует выходной канал [4].

Во втором случае пользователь может отправлять команды удаленно, например, по средствам локальной сети на модуль ввода/вывода, который, в свою очередь, активирует выходной канал и подает сигнал на датчики для включения или выключения нужной системы.

При выборе конкретного устройства, которое будет применено в рассматриваемой системе, следует учитывать требования и возможности, а также особенности производственного процесса и предпочтения пользователей. Оба варианта представляют собой надежные и эффективные средства для передачи сигнала на оповещающие устройства и обеспечивают функциональность АС ОПП в сырье на производственной линии предприятия.

Для удобства настроек подключения и сборки системы в АС ОПП будет использоваться Ethernet-модуль или модуль удаленного ввода / вывода, который обеспечивает гибкость удаленного управления.

После определения аппаратных средств было разработано два модуля программного обеспечения, которые осуществляют автоматизацию выбранного типа производственных процессов [3]:

1. Модуль поиска. Обеспечивает поиск посторонних объектов на изображении, полученном с камеры видеонаблюдения, после обнаружения передает сигнал на следующий модуль;

2. Модуль сигнализации. При получении сигнала от модуля поиска передает его на Ethernet-модуль, сохраняя необходимые данные в БД.

Поиск постороннего предмета будет осуществляться на предприятии с четким цветовым разделением упаковок и формы персонала. Исходя из этого и того, что система работает в реальном времени, то для выполнения поставленной задачи автоматизации применялось компьютерное зрение, с помощью инструментов которого был разработан нетребовательный к ресурсам алгоритм, выполняющий следующие шаги для получения нужного результата: преобразование цветового пространства, удаление шумов, сужение области интереса, обнаружение постороннего предмета [11; 12].

Получаемый с производственной камеры сигнал представляет собой последовательность кадров (изображений), передающихся в режиме реального времени. Изначально каждое из этих изображений представлено в формате RGB.

В модели RGB (от англ. red — красный, green — зеленый, blue — голубой) цвет задается путем смешивания трех базовых цветов в различных соотношениях.

Задача программы — обнаружить на конвейере упаковку определенного цвета (все упаковки стандартизированы и известно заранее, какая может встретиться в тот или иной момент производственного процесса). Поэтому использование цветовой модели RGB является нецелесообразным, так как поиск параметров любого цвета предполагает анализ всех трех составляющих. Например, изменение значения координаты R влияет на необходимые значения других координат.

Именно поэтому для поиска на изображении объекта по цветовому признаку, как правило, используют цветовую модель HSV. В данной цветовой модели координатами цвета являются [13; 14]:

1. Цветовой тон (от англ. hue). Варьируется в пределах от 0 до 360° , однако иногда приводится к диапазону от 0 до 100 или от 0 до 1.

2. Насыщенность (от англ. saturation). Варьируется в пределах от 0 до 100 или от 0 до 1. Чем ближе этот параметр к 1, тем насыщеннее или «чище» цвет, а чем ближе к 0, тем ближе цвет к нейтральному серому.

3. Значение цвета или яркость (value). Также задается в пределах от 0 до 100 или 0 до 1.

В результате преобразований значения цвета будут находиться в следующих диапазонах $0 \leq H \leq 360$, $0 \leq S \leq 1$, $0 \leq V \leq 1$. Данный тип представления цвета удобен для работы. Так цвет можно необходимо задать лишь одним параметром, после чего с помощью оставшихся двух настроить под освещение предприятия, которое является фиксированным.

Для разработки итогового программного средства был выбран язык программирования C#, так как он позволяет реализовать весь необходимый системе функционал.

Выбранный язык предоставляет модулю поиска автоматический механизм управления памятью и удобные инструменты для работы с многопоточностью, что немаловажно при обработке изображения с камеры

в реальном времени. В качестве библиотеки использовалась EmguCV, которая является «оберткой» OpenCV. Она позволяет использовать функции библиотеки .NET совместимым языкам.

В первую очередь был реализован следующий функционал:

1. Настройка данных камеры.

Позволяет пользователям добавлять, изменять и удалять информацию о камерах, которая затем используется в режиме поиска. Каждая настройка камеры включает в себя название настройки, адрес камеры и параметры области интереса камеры — это область, которую в дальнейшем будет обрабатывать фильтр. Представляет собой прямоугольник. Хранится в виде координат двух противоположных точек — левой верхней и правой нижней.

Благодаря данному функционалу можно задавать данные камеры, с которой программа будет получать видеопоток, использующийся для поиска постороннего предмета по цветовому диапазону.

Для реализации подключения к камере программой использовался VideoCapture — класс из библиотеки EMGU CV, предназначенный для получения изображения из заданного источника. То есть с помощью объекта данного класса можно получить кадры видеопотока из различных источников, таких как веб-камеры, видеофайлы или IP-камеры. Конструктор класса принимает параметр, который может быть либо путем к видеофайлу, либо адресом/индексом камеры.

При создании объекта класса VideoCapture (рис. 2) предусмотрены две ситуации: если пользователь ввел либо адрес (строковое значение), либо индекс камеры (числовое значение), подключенной напрямую к ПК.

```

if (int.TryParse(addressBox.Text, out int result))
{
    capture = new VideoCapture(Convert.ToInt32(addressBox.Text));
}
else
{
    capture = new VideoCapture(addressBox.Text);
}
    
```

Рис. 2. Создание объекта класса VideoCapture

2. Подбор цветового диапазона.

Поиск предмета осуществляется по подобранному пользователем диапазону, сохраненному в формате HSV. Поэтому необходимо дать возможность добавлять/изменять/удалять данные фильтров. При этом реализован удобный графический интерфейс для подбора диапазона под разные виды упаковок.

Для этого можно использовать фотографию упаковки. После загрузки следует выбрать любой нужный пиксель с помощью ЛКМ, преобразовать его в HSV и задать цветовой тон (H) в диапазоне от – 10 до + 10 от его цветовых параметров, а диапазоны остальных параметров (S и V) заранее установлены под стандарты освещения, однако в случае необходимости есть возможность их поправить.

Для проверки подобранного цветового диапазона маска, основанная на нем, выводится рядом с исходным изображением.

Генерация маски (рис. 3) происходит по следующему алгоритму:

A. У оригинального изображения `originalImage` с помощью метода `Convert` изменяется цветовое пространство с BGR на HSV, после чего полученный результат сохраняется в переменную `hsvImage`.

B. Создается объект `mask` класса `Mat` — матрица, в которой будут храниться результаты сегментации изображения.

C. К изображению применяется метод `InRange` с последующим сохранением результата в матрицу `mask`. В результате выполнения этой операции на изображении останутся только те пиксели, которые соответствуют заданным параметрам. На вход идет диапазон HSV.

D. На маску применяются морфологические операции с целью удаления шумов.

```
private void maskGenerate()
{
    Image<Bgr, byte> originalImage = new Image<Bgr, byte>((Bitmap)pictureBoxOriginal.Image);
    Image<Hsv, byte> hsvImage = originalImage.Convert<Hsv, byte>();
    Mat mask = new Mat();
    ...
    CvInvoke.InRange(hsvImage, new ScalarArray(new MCvScalar(hmin / 2.0, smin * 2.55, vmin * 2.55)),
        new ScalarArray(new MCvScalar(hmax / 2.0, smax * 2.55, vmax * 2.55)), mask);
    Image<Gray, byte> maskImage = mask.ToImage<Gray, byte>();
    maskImage = MorphOp(maskImage);
    maskImage.SmoothGaussian(5);
    pictureBoxMask.Image = maskImage.Bitmap;
    GC.Collect();
    GC.WaitForPendingFinalizers();
}
```

Рис. 3. Метод генерации маски

В случае если упаковка имеет несколько цветов, была реализована возможность хранения множество цветовых диапазонов в рамках одного фильтра, которые потом совместно использовались для генерации маски.

Затем полученные данные из первого и второго пунктов используются для поиска постороннего предмета на видеопотоке по цветовому признаку в режиме реального времени.

3. Работа в режиме поиска.

Программа подключается к выбранной камере, после чего начинает обрабатывать с помощью алгоритмов компьютерного зрения получаемый поток кадров. Далее изображения преобразуются из цветового пространства RGB в HSV. На основе сохраненных ранее цветовых диапазонов генерируется маска, которая используется для отслеживания посторонних предметов. Если на маске есть белые пиксели, которые означают, что на оригинальном изображении пиксели попадают в сохраненный в фильтре диапазон, то программа начинает документировать инцидент. Собирает сообщение с текущим временем, кадрами с посторонними предметами и данными подключения, чтобы затем отправить его модулю сигнализации.

4. Тестирование подобранного фильтра.

Данный дополнительный функционал схож с описанным выше поиском в режиме реального времени, однако предназначен для тестирования фильтра на заранее записанном видеофрагменте.

Первым шагом при разработке модуля сигнализации стало проектирование БД. Microsoft SQL Server оказалась отличным вариантом, по-

скольку поддерживает множество функций, включая операции выбора, вставки, обновления и удаления данных, а также агрегатные функции, операции со строками и числами, и многое другое. Управление и администрирование компонентов базы данных реализовано с помощью SQL Server Management Studio.

Для эффективной работы с различными цветами в упаковках сырья, которые могут быть использованы в одном фильтре, была создана отдельная таблица (рис. 4), предназначенная для хранения информации, связанной с настройками одного цвета. После выбора оттенка, данные объединяются в индивидуальной таблице для хранения фильтров. В ней реализована возможность выбрать несколько сохраненных цветов, при этом каждый фильтр имеет уникальное имя.

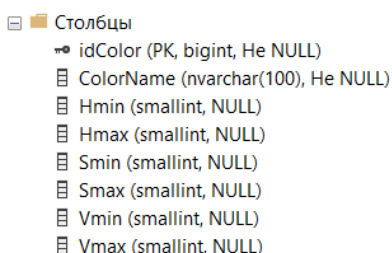


Рис. 4. Таблица для хранения данных цвета

В БД сформированы отдельные таблицы, учитывающие особенности подключаемых элементов системы и то, какие поля могут использоваться для подключения к камере и модулю ПЛК. Это необходимо, поскольку на производствах устанавливается множество камер видеонаблюдения, а в системе должны использоваться лишь определенные. Подключение к модулю может происходить через открытый коммуникационный протокол Modbus TCP. В отличие от Modbus RTU и ASCII, Modbus TCP устанавливает прямое соединение с конкретным устройством через TCP/IP. Кроме этого, важно наличие пароля и логина для использования портов ввода / вывода используемого модуля [2; 7].

Настройка связей между таблицами стала следующим шагом, так как она является важным аспектом проектирования базы данных. Это позволило установить связи и отношения между данными, что обеспечило целостность и связность информации. Кроме того, при настройке были учтены типы связей, чтобы правильно организовать структуру БД.

В разработанной АС ОПП предусмотрено оповещение в случаях, когда происходит заполнение БД. В этих ситуациях, система автоматически отправляет электронное сообщение на рабочую почту специалиста, ответственного за устранение таких ошибок. Также, подобное оповещение осуществляется при потере соединения с модулем.

Для реализации данного функционала используется сетевой протокол SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). Он предназначен для передачи электронной почты в сетях TCP/IP, обеспечивает обмен сообщениями между серверами электронной почты отправителя и получателя, гарантируя, что письмо будет доставлено в нужный почтовый ящик.

Для успешного подключения к определенным Ethernet-модулям рекомендуется использовать библиотеки, предоставляемые производителем. Как правило, они содержат набор функций, классов и методов, специально разработанных для работы с соответствующими Ethernet-модулями, и предоставляют удобные интерфейсы для настройки подключения, передачи данных при управлении. Использование таких библиотек значительно упрощает процесс разработки программного обеспечения. Они предоставляют готовые решения и абстракции, что позволяет разработчикам сосредоточиться на более высокоуровневых задачах, не тратя время на написание низкоуровневого кода для управления модулем [6].

Алгоритм работы с Ethernet-модулем включает следующие шаги [5; 8]:

1. Определение номера TCP-порта для установки соединения и массива для хранения идентификатора соединения, а также дополнительные переменные. Устанавливается соединение с сервером по указанному порту, отправляются запросы на сервер и происходит чтение ответов от сервера в виде входных данных.

2. Проверка соединения и сохранение статуса подключения в соответствующей переменной. Этот статус будет использоваться для принятия решений и выполнения дальнейших действий в программе.

3. Настройка режима непрерывных каналов вывода на устройстве.

4. Перевод устройства в режим ожидания, готового к передаче данных.

5. Установка режима непрерывных каналов. Это означает, что каналы на устройстве ввода/вывода будут работать в режиме непрерывного потока данных. Сигнал, поданный на вход, будет передаваться на выходы до тех пор, пока на вход не будет подан новый сигнал.

6. Подтверждение успешной установки режима. На данном этапе следует производить запись инцидента в базу данных.

7. Передача данных сигнала и считывание состояния выходов.

8. Осуществление команды для завершения работы и освобождения ресурсов, связанных с модулем.

Таким образом передается сигнал на модуль удаленного ввода/вывода, который включает систему сигнализации, предусмотренную на производстве.

В результате проделанной работы была разработана система обнаружения посторонних предметов в сырье на производственной линии. АС ОПП выполняет поиск постороннего предмета по цветовому признаку, в случае нахождения оповещает сотрудника о произошедшем инциденте и делает запись в базу данных.

Список литературы

1. *Проектирование систем автоматизации технологических процессов* : справ. пособие / А. С. Клюев, Б. В. Глазов, А. Х. Дубровский, А. А. Клюев. М., 1990.

2. *Ефимова Ю. В.* Автоматизированная система визуализации с передачей параметров по протоколу Modbus // Форум молодых ученых. 2018. № 12. Ч. 28. С. 511—520.

3. *Гайнанова Р. Ш., Широкова О. А.* Создание клиент-серверных приложений // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 9. С. 79—84.

4. *Kasemir K. U., Dalesio L. R.* Interfacing the ControlLogix PLC over Ethernet/IP // 8th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems. 2001. P. 481—483.

5. *Лившиц Ю. Е., Лакин В. И., Монич Ю. И.* Программируемые логические контроллеры для управления технологическими процессами : учеб.-метод. пособие и лабораторные работы для студ. всех форм обучения специальностей «Автоматизация технологических процессов и производств», «Промышленные роботы и робототехнические комплексы», «Программное обеспечение информационных технологий», «Информационные системы и технологии» : в 2 ч. Минск, 2014. Ч. 1.

6. *Крюков О. В.* Коммуникационная среда передачи данных сети Ethernet на полевом уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 12. С. 26—30.

7. *Подключение устройств по протоколу Modbus.* URL: <https://rapidscada.net/doc/content/latest/ru/use-cases/modbus-protocol.html> (дата обращения: 13.04.2023).

8. *Wayand B.* What is a PLC? URL: <https://www.mroelectric.com/blog/what-is-a-plc/> (дата обращения: 23.11.2022).

9. *Хлебенских Л. В., Зубкова М. А., Саукова Т. Ю.* Автоматизация производства в современном мире // Молодой ученый. 2017. № 16 (150). С. 308—311.

10. *Мишин Г. Л., Хазанова О. В.* Системы автоматизации с использованием программируемых логических контроллеров : учеб. пособие. М., 2005.

11. *Артемов А. А., Кавалеров М. В., Кузнецов Г. С.* Проблема поиска объектов на изображениях с помощью компьютерного зрения на основе информации о цвете // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2011.

12. *Snyder W., Qi H.* Machine Vision. Cambridge, 2004.

13. *Comparison of RGB and HSV Colour Spaces for Visual Attention Models / A. Ajmal, C. Hollitt, M. Frean, H. Al-Sahaf // 2018 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ).* 2018. P. 6.

14. *Что такое RGB, CMYK, HSV+HSL, Lab — цветовые модели и параметры.* URL: <https://sonikelf.ru/znakomimsya-s-cvetom-vsyo-o-cvetovyx-modelyax-rgb-cmyk-hsvhsl-lab/> (дата обращения: 23.03.2023).

15. *Захват видео с сетевых камер.* URL: <https://habr.com/ru/articles/117735/> (дата обращения: 09.01.2023).

Об авторах

Елизавета Николаевна Кесова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: bloom.ek@mail.ru

Евгений Мартинович Носарев — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: e-nosarev@yandex.ru

The authors

Elizaveta N. Kesova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia.

E-mail: bloom.ek@mail.ru

Evgenii M. Nosarev, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia.

E-mail: e-nosarev@yandex.ru

С. В. Нестеров, А. В. Федянин

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ SCADA-СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ МП «КАЛИНИНГРАДТЕПЛОСЕТИ»

Рассмотрены вопросы информационной безопасности для системы диспетчеризации территориально распределенных объектов. Описаны функции SCADA-систем для управления предприятием теплоэнергетики, в том числе для организации планирования и ремонта промышленного оборудования. Изучены риски и угрозы системам автоматизации при несанкционированном доступе или работе вредоносного программного обеспечения. Рассмотрены меры по снижению указанных рисков для территориально распределенных информационных систем. Системы управления технологическими процессами ряда объектов предприятия относятся к объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ), поэтому выполнению требований по обеспечению информационной безопасности объектов КИИ на предприятии уделяется существенное внимание со стороны отдела автоматизированных систем управления.

The issues of information security for the dispatch system of geographically distributed objects are considered. The functions of SCADA systems for managing a thermal power enterprise, including organizing the planning and repair of industrial equipment, are considered. Risks and threats to automation systems due to unauthorized access or operation of malicious software are considered. Measures to reduce these risks for geographically distributed information systems are considered. The technological process control systems of a number of enterprise facilities are classified as critical information infrastructure (CII) objects, therefore, the implementation of the requirements for ensuring the information security of CII facilities at the enterprise is given significant attention by the automated control systems department.

Ключевые слова: информационная безопасность, SCADA системы, диспетчеризация, системы автоматизации

Keywords: information security, SCADA systems, dispatch systems, industrial automation

В современном, быстро развивающемся промышленном ландшафте системы диспетчерского управления и сбора данных (далее — SCADA) стали популярными решениями для мониторинга и управления критическими процессами. Системы SCADA привлекли значительное внимание и получили широкое распространение благодаря своим многочисленным достоинствам и преимуществам [1].

Одной из ключевых причин распространенности систем SCADA является их непревзойденная способность контролировать различные промышленные процессы. Системы SCADA предоставляют операторам полный обзор всей системы, объединяя данные из нескольких источников, таких как датчики, приводы и другие подключенные устройства. Этот централизованный подход позволяет осуществлять непрерывный мониторинг критических параметров, например, температуры, давления, скорости потока и т. д. в режиме реального времени. Используя необходимую информацию о состоянии оборудования и системы в целом, операторы могут быстро выявлять аномалии или отклонения, обеспечивая быстрое реагирование и превентивные действия для снижения потенциальных рисков или сбоев.

В дополнение к мониторингу в реальном времени системы SCADA предлагают мощные функции управления, оптимизирующие производственные процессы. Благодаря удобному интерфейсу операторы могут удаленно регулировать параметры, изменять заданные значения и инициировать автоматические ответы на основе заранее определенных правил и алгоритмов. Этот уровень контроля облегчает оптимизацию, сокращает ручное вмешательство и повышает эффективность работы. Будь то регулировка скорости потока в химическом процессе или оптимизация энергопотребления на электростанции, системы SCADA позволяют операторам быстро и точно вносить корректировки, что приводит к экономии средств и повышению производительности.

Системы SCADA, включающие большое количество данных, предоставляют множество возможностей для анализа данных и принятия обоснованных решений. Собирая и сохраняя технологические параметры в режиме реального времени, системы SCADA позволяют операторам и руководству получать ценную информацию о производительности системы, тенденциях и закономерностях. Используя инструменты анализа и визуализации данных, операторы могут выявлять узкие места, прогнозировать потребности в обслуживании, оптимизировать процессы и принимать решения на основе данных для повышения общей операционной эффективности и производительности.

Хотя системы SCADA предлагают множество преимуществ для различных отраслей промышленности, важно осознавать потенциальные риски и уязвимости, связанные с их широким внедрением. Одной из серьезных проблем является возможность вмешательства третьих лиц в управление промышленными объектами через Интернет.

Основные источники угроз представлены в таблице 1. Процент компьютеров АСУ, на которых были заблокированы вредоносные объекты отражен в таблице 2.

Таблица 1

Основные источники угроз для систем промышленной автоматизации в 2021—2022 гг., % [2]

Показатель	H1 2021	H2 2021	H1 2022	H2 2022
Процент атакованных компьютеров АСУ в мире	33,8	31,4	31,8	34,3
Интернет	18,3	16,5	16,5	19,9

Окончание табл. 1

Показатель	H1 2021	H2 2021	H1 2022	H2 2022
Почтовые клиенты	3,5	3,7	7,0	6,4
Съемные носители	5,2	4,8	3,5	3,8
Сетевые папки	0,52	0,57	0,6	0,6

Таблица 2

Доля компьютеров АСУ, на которых были заблокированы вредоносные объекты различных категорий, %

Категории	H1 2021	H2 2021	H1 2022	H2 2022
Вредоносные скрипты и фишинговые страницы (JS и HTML)	8,8	9,3	12,9	13,5
Ресурсы в Интернете из списка запрещенных	14,0	10,1	9,5	10,1
Троянцы-шпионы, бэкдоры и кейлоггеры	7,4	8,1	8,6	7,1
Вредоносные документы (MSOffice+PDF)	—	2,3	5,5	4,5
Черви (Worm)	4,6	4,0	2,8	2,5
Вирусы (Virus)	2,9	2,7	2,4	2,4
Майнеры — исполняемые файлы для ОС Windows	1,7	2,1	2,3	1,5
Веб-майнеры, выполняемые в браузерах	0,9	1,4	1,8	1,8
Вредоносные программы для AutoCAD	—	0,5	0,6	0,6
Программы-вымогатели	0,4	0,5	0,6	0,4

Интеграция систем SCADA с Интернетом вещей (IoT) и другими взаимосвязанными технологиями, предоставляя многочисленные преимущества, также открывает новые возможности для кибератак. Чем больше устройств подключено к Интернету, тем больше площадь атаки и количество потенциальных точек входа для хакеров. Эти изолированные киберугрозы представляют серьезную проблему для безопасности и целостности систем SCADA, а также для отраслей, которые на них полагаются.

Риск несанкционированного доступа к промышленным объектам и контроля над ними вызывает опасения по поводу возможных сбоев, саботажа или даже физического вреда персоналу. Успешный взлом системы SCADA может привести к манипулированию критическими процессами, что повлечет серьезные последствия, такие как простои производства, повреждение оборудования, опасность для окружающей среды или нарушение протоколов безопасности. Поэтому обеспечение безопасности и устойчивости систем SCADA к таким вторжениям имеет первостепенное значение.

Ниже приведены примеры вмешательства третьих лиц в работу SCADA-систем, которые имели серьезные последствия и большой общественный резонанс.

1. Вирус Stuxnet. В 2010 г. было обнаружено, что компьютерный червь, известный как Stuxnet, проник в системы управления ядерными объектами Ирана. Червь был разработан для контроля систем автоматизации, которые управляли центрифугами, используемыми для обогаще-

ния урана (рис. 1). В результате работы вируса центрифуги были выведены из строя, нанося значительный ущерб и срывая ядерную программу государства [3].

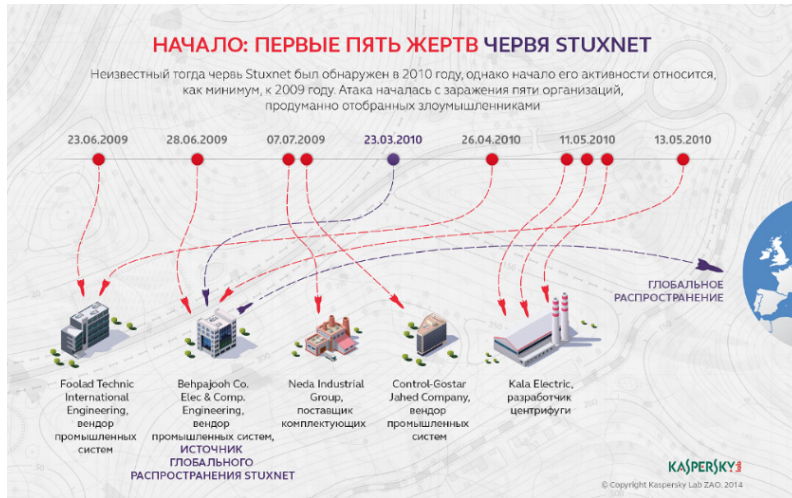


Рис. 1. Последовательность заражения вирусом Stuxnet промышленных объектов в Иране

2. Разлив сточных вод города Маручи-Шайр. В 2000 г. автоматизированная система управления сточными водами в австралийском городе Маручи-Шайр подверглась взлому, в результате чего более 1 млн литров неочищенных сточных вод было сброшено в местные водные пути и на пляжи. Хакер смог манипулировать системой управления и выпустить сточные воды, что привело к значительному ущербу окружающей среде и проблемам со здоровьем населения.

3. Отключение электроэнергии на Тайване. В 2016 г. кибератака систем автоматизации, управляющих электросетью на Тайване, привела к массовым отключениям электроэнергии. Атака была осуществлена хакерами, которые смогли проникнуть в системы управления и манипулировать распределением электроэнергии, что привело к массовым нарушениям и экономическому ущербу.

В ответ на возможные угрозы отрасли и специалисты по кибербезопасности активно работают над укреплением систем SCADA от киберугроз.

Производители SCADA-систем предлагают ряд решений для предотвращения стороннего вмешательства, например:

1. Компания Siemens предлагает решения по укреплению безопасности SCADA, которые предполагают многоуровневый подход. Их проект включает промышленные брандмауэры, инструменты сегментации сети и безопасные решения для удаленного доступа. Они также предоставляют услуги промышленной безопасности, которые включают оценку безопасности, внедрение мер безопасности и постоянный мониторинг для снижения рисков и защиты производственных процессов [4].

2. Schneider Electric предлагает решения по укреплению безопасности SCADA, связанные с защитой критической инфраструктуры. Их проект включает системы обнаружения и предотвращения вторжений, защищенные шлюзы удаленного доступа и расширенные механизмы аутентификации. Кроме того, они предоставляют консультационные услуги по безопасности, чтобы помочь организациям оценить уязвимости, разработать надежные политики безопасности и внедрить необходимые средства контроля.

3. ABB фокусируется на обеспечении безопасности систем SCADA с помощью комбинации аппаратных и программных решений. Их предложения включают устройства разделения сети, модули шифрования и системы контроля доступа. Они также предоставляют услуги по оценке безопасности для выявления уязвимостей и разработки индивидуальных стратегий безопасности для промышленных объектов.

4. Honeywell предлагает комплексный набор решений кибербезопасности для систем SCADA. Их портфолио включает безопасные решения для удаленного доступа, промышленные брандмауэры и системы обнаружения аномалий. Honeywell также предоставляет управляемые услуги безопасности: непрерывный мониторинг, реагирование на инциденты и анализ угроз для защиты от развивающихся киберугроз.

5. Emerson предлагает решения для обеспечения безопасности SCADA, в рамках которых основное внимание уделяется обнаружению угроз и реагированию на них в режиме реального времени. Их проект включает безопасные технологии удаленного доступа, инструменты сегментации сети и возможности шифрования. Кроме того, они предоставляют консультационные услуги по кибербезопасности для оценки уязвимостей, разработки архитектур безопасности и внедрения надежных методов обеспечения безопасности.

6. GE Digital предлагает решения по укреплению безопасности SCADA, которые относятся как к операционным технологиям (OT), так и к информационным (IT). Их предложения включают системы мониторинга событий безопасности, решения для управления идентификацией и доступом, а также инструменты сегментации сети. GE Digital также предоставляет консультационные услуги по безопасности, помогая организациям разрабатывать и внедрять эффективные стратегии безопасности.

7. Yokogawa предлагает решения по укреплению безопасности SCADA, направленные на защиту критической инфраструктуры. Их проект включает системы обнаружения сетевых вторжений, безопасные шлюзы удаленного доступа и услуги по оценке уязвимостей. Они также предлагают программы обучения по вопросам безопасности для знакомства персонала с передовыми методами кибербезопасности.

Обобщая все эти примеры, можно сказать: надежные меры безопасности, такие как сегментация сети, системы обнаружения вторжений и протоколы шифрования, внедряются для защиты сетей SCADA от несанкционированного доступа. Регулярные аудиты безопасности, оценка уязвимостей и программы обучения сотрудников также являются важными компонентами комплексной стратегии кибербезопасности.

Кроме того, сотрудничество между заинтересованными сторонами промышленности, государственными органами и специалистами по кибербезопасности имеет первостепенное значение для эффективного решения этой проблемы. Обмен информацией об угрозах, использование передового опыта и стандартов применения средств защиты информации может помочь создать надежную защиту от потенциальных кибератак. Вместе с тем, разрабатываются нормативные рамки и отраслевые руководства для обеспечения соблюдения мер кибербезопасности и защиты критической инфраструктуры.

Признавая вышеописанные риски и активно работая над укреплением безопасности систем SCADA, предприятия могут уверенно пользоваться преимуществами автоматизации и подключения, одновременно снижая потенциальные угрозы для своей деятельности.

В настоящее время в коммунальном хозяйстве страны на различных уровнях активно внедряются системы автоматизации, диспетчеризации и учета, что связано с широким применением автоматизированных и автоматических систем для объектов теплогенерации и узлов распределения тепла, развитием коммуникационных каналов и снижения стоимости систем автоматизации.

Одной из ключевых угроз, которые могут повлечь нарушение режимов теплоснабжения является вмешательство в SCADA-системы управления генерацией или распределением тепловой энергии на любом уровне иерархии системы центрального отопления: теплоисточник-ЦТП-ИТП.

Снабжение многоквартирных домов горячей водой с целью отопления помещений является важнейшим вопросом, влияющим на качество жизни и комфорт жильцов. В последние годы потребность в надежных и эффективных системах отопления сохраняется, так как растет спрос на квартиры в многоэтажных новостройках.

Один из путей решения поставленной задачи — использование систем центрального отопления, обеспечивающих теплом все квартиры в здании. Система центрального отопления состоит из теплового источника (котельная, РТС) и системы распределения тепла с узлами типа ЦТП и ИТП на уровне здания [5].

Котельные тепловых сетей относятся к опасным производственным объектам, что подтверждается обязанностью по законодательству получить лицензию ОПО для их эксплуатации [6].

Опасность заключается в использовании высоких температур, давления и взрывоопасных горючих веществ [7]. Вмешательство третьих лиц может нарушить технологические процессы и привести к инцидентам и авариям на объекте [11]. Это является большой проблемой, так как прекращение теплоснабжения большого количества пользователей приведет к чрезвычайной ситуации в населенном пункте. Для предотвращения катастроф необходимо исключить возможность управления техпроцессами извне.

МП «Калининградтеплосеть» — самый крупный поставщик централизованного теплоснабжения в городе Калининград.

Ниже на рисунке 2 приведены предприятия г. Калининграда, поставляющие тепловую энергию [8].

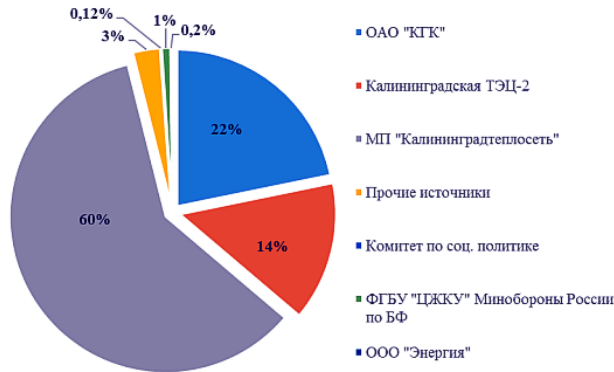


Рис. 2. Структура распределения тепловой нагрузки по теплоснабжающим предприятиям

В МП «Калининградтеплосеть» используется SCADA-система отечественного производства MasterSCADSA.

Безопасность MasterSCADA 4D при разработке программы реализована следующим образом: в разделе «Системы» располагается папка «Безопасность», где есть возможность добавить пользователей системы с заданием различных прав доступа, определенных MasterSCADA заранее (рис. 3, 4) [9].

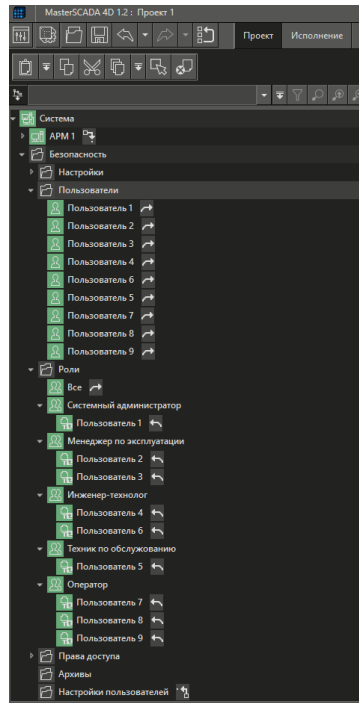


Рис. 3. Пример создания ролей и пользователей

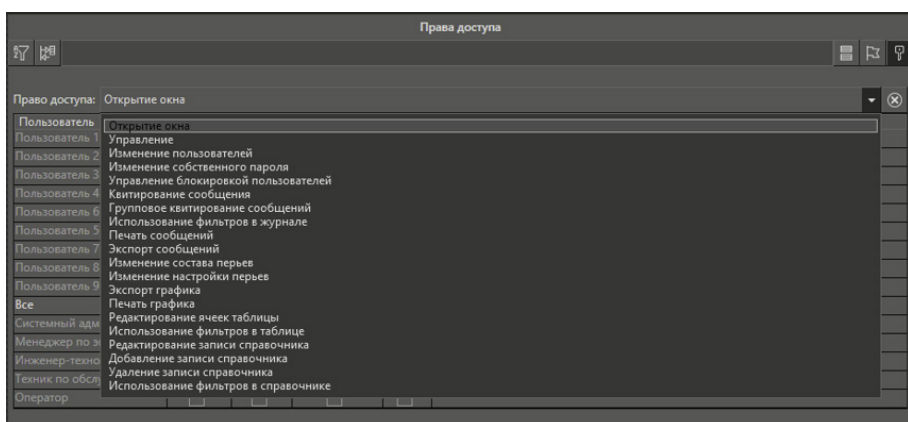


Рис. 4. Выбор прав доступа

Аутентификация позволяет различать администраторов и обычных пользователей, предоставляя различные уровни доступа (рис. 5). Системный администратор наблюдает за всей системой, следит за взаимодействием пользователей и оперативно устраняет возникающие угрозы. MasterSCADA 4D включает в себя разделение пользователей с ограниченными правами, отдельно протоколирует действия операторов, а в скором времени будет внедрена двухфакторная аутентификация и цифровые криптографические подписи для повышения надежности при анализе критических ситуаций и выявлении виновных. Графический клиент предлагает выбрать пользователя и ввести пароль с разрешениями, ограничивающими доступ к окну и запрашивающими подтверждения действий.

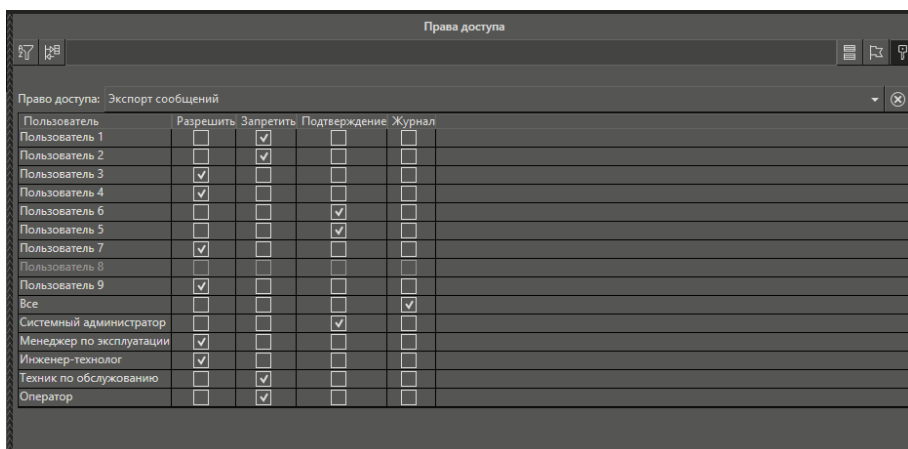


Рис. 5. Назначение прав

На рисунке 5 приведен способ задания общих прав. Также есть возможность для отдельного элемента визуализации задать права доступа для любого созданного пользователя.

Запрет имеет приоритет выше, чем разрешение, следовательно, если у пользователя стоит и разрешение, и запрет на какое-то действие, действие будет запрещено.

Также разработчик добавил возможность завести журнал для отслеживания действий пользователя в программе (рис. 6, 7).

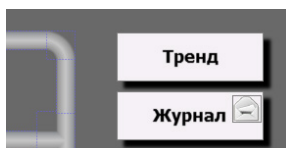


Рис. 6. Кнопка журнала

Для этого во вкладке «Объекты» можно завести отдельное окно (рис. 7).

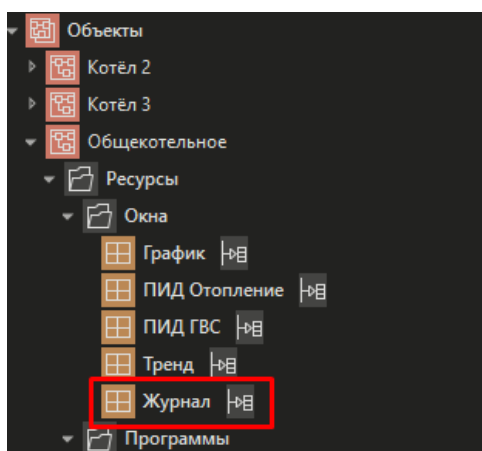


Рис. 7. Окно «Журнал»

В это окно, из палитры, добавляется элемент «Архивный журнал» (рис. 8, 9).

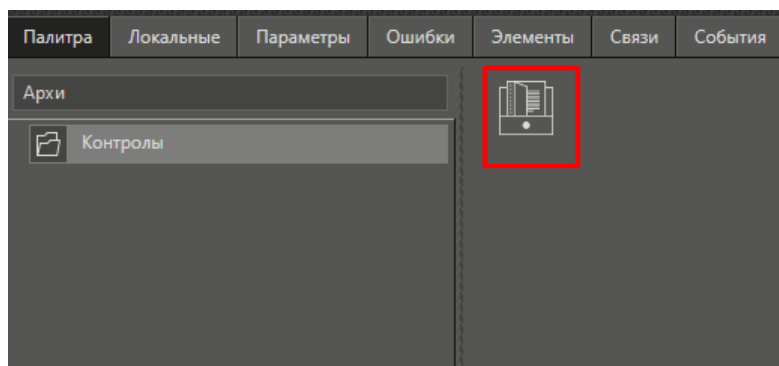


Рис. 8. Архивный журнал

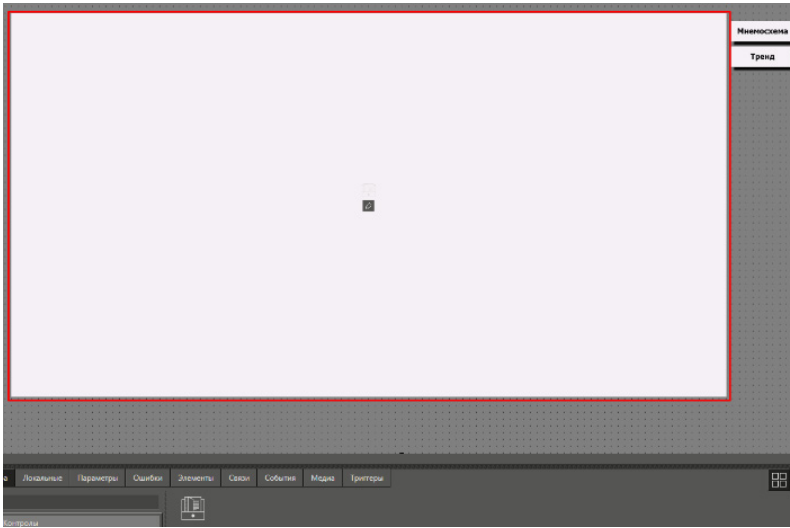


Рис. 9. Вид архивного журнала

В настройках устанавливаем нужные нам значения для отображения (рис. 10). Заполненный данными журнал представлен на рисунке 11.

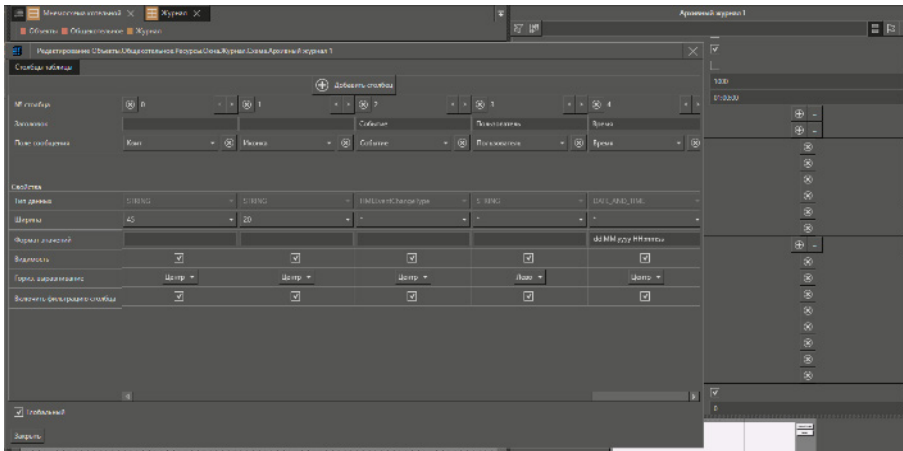


Рис. 10. Настройка колонок журнала

События	Идентификатор	Локализация
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему
Головолом	Операция Центрированной (двухсторонней)	Вход в систему
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему
Головолом	Операция Центрированной (двухсторонней)	Вход в систему
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему
Головолом	Операция Колоний	Вход в систему

Рис. 11. Вид журнала в запущенной программе

На предприятии МП «Калининградтеплосеть» системы управления рядом с РТС категорированы как объекты КИИ, поэтому выполнению требований по обеспечению информационной безопасности объектов КИИ на предприятии уделяется существенное внимание со стороны отдела автоматизированных систем управления. Для этой цели разработан план мероприятий по обеспечению информационной безопасности, который обеспечивает применение требований № 187-ФЗ к информационным системам и системам передачи информации [10].

В заключение можно сделать вывод, что для смягчения киберугроз промышленные объекты должны использовать многоуровневый подход к обеспечению безопасности, включающий сегментацию сети, строгий контроль доступа, регулярную оценку уязвимости и системы обнаружения вторжений. Программы непрерывного обучения и повышения осведомленности сотрудников о передовых методах кибербезопасности имеют решающее значение для сведения к минимуму человеческих ошибок, которые могут поставить под угрозу безопасность системы.

Кроме того, регулярное обновление и исправление систем SCADA, наряду с использованием новейших протоколов безопасности, играет важную роль для устранения уязвимостей системы и опережения потенциальных злоумышленников. Сотрудничество с авторитетными поставщиками и экспертами по безопасности может предоставить ценную информацию и рекомендации по внедрению и обслуживанию безопасных систем SCADA.

Список литературы

1. *Понятие SCADA-системы*. Студопедия. URL: https://studopedia.ru/26_10224_ponyatie-SCADA-sistemi.html (дата обращения: 22.03.2023).
2. *Ландшафт угроз для систем промышленной автоматизации*. Kaspersky ICS CERT. URL: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2023/03/06/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-statistics-for-h2-2022/> (дата обращения: 22.03.2023).
3. *Stuxnet*. Kaspersky daily. URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/stuxnet-victims-zero/6119/> (дата обращения: 12.07.2023).
4. *Industrial Cybersecurity*. SIEMENS. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/industrial-cybersecurity.html> (дата обращения: 05.07.2023).
5. *Теплоснабжение*. Wikipedia.org. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Теплоснабжение> (дата обращения: 06.07.2023).
6. *Лицензирование деятельности по эксплуатации взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектов I, II и III классов опасности*. Gosnadzor.ru. URL: https://www.gosnadzor.ru/service/list/licensing_vzryv_him/ (дата обращения: 05.07.2023).
7. *Лицензия на эксплуатацию котельной и тепловых сетей*. Юридическая компания «Деловой подход». URL: https://delpod.ru/licenziya_na_ekspluatsiyu_kotelnoj_i_teplovyix_setej.html (дата обращения: 06.07.2023).
8. *Схема теплоснабжения городского округа «город Калининград» до 2035 года*. URL: https://www.klgd.ru/activity/municipal_services/communal_service/vopros_communal/ОМ%20Глава%201%202020.pdf (дата обращения: 06.07.2023).

9. *Промышленный* Internet вещей и облачные технологии в современных SCADA-системах. ИнСА Т. URL: <https://masterscada.insat.ru/articles/?id=63456> (дата обращения: 11.07.2023).

10. *О безопасности* критической информационной инфраструктуры : федер. закон Рос. Федерации от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

11. *О промышленной* безопасности опасных производственных объектов : федер. закон Рос. Федерации от 21.07.1997 г. № 187-ФЗ (ред. от 11.06.2023). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Об авторах

Сергей Валерьевич Нестеров — канд. физ.-мат. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: serg0044@mail.ru

Артем Владимирович Федянин — руководитель группы автоматизации бизнес-процессов МП «Калининградтеплосети», Калининград, Россия.

E-mail: artem.fedyanin@kts39.ru

The authors

Sergei V. Nesterov, PhD, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: serg0044@mail.ru

Artem V. Fedyanin, Head of Business Process Automation Group of MP «Kaliningradtepliset», Kaliningrad, Russia.

E-mail: artem.fedyanin@kts39.ru

О. И. Нестерова, М. В. Тарачков

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ
ДЛЯ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
В ОКРУЖЕНИИ ЛЮДЕЙ**

Проанализирована разработка системы безопасности для работы мобильного робота в окружении людей с использованием технологий компьютерного зрения. Она предназначена для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами. Рассмотрены основные принципы машинного зрения для трекинга объектов и их применения в современных системах безопасности. Описаны алгоритмы обнаружения и отслеживания объектов на фотографии и видео. Также, при разработке системы, была поставлена задача по ограничению скорости движения робота при появлении человека в зоне его видимости. Для этого был описан процесс использования видеопотока, получаемый с камеры на голове робота, работающей в режиме реального времени. Для обнаружения человека в кадре используется алгоритм Histogram of Oriented Gradient, а для отслеживания его движения — трекер Kernelized Correlation Filters. Программное обеспечение реализовано при помощи платформы Robot Operating System 2. Использован язык программирования Python. Представлены результаты испытаний для проверки работоспособности системы безопасности, которая была внедрена в автономного колесного робота. Проанализированы возможные направления развития технологии, а также преимущества и недостатки комбинации выбранных алгоритмов.

The article analyzed the development of a security system for the operation of a mobile robot surrounded by people using computer vision technologies. It is designed for devices with limited computing resources. The paper also considered the basic principles of machine vision for tracking objects and their application in modern security systems. Algorithms for detecting and tracking objects in photography and video are described. Also, when developing the system, the task was set to limit the speed of the robot when a person appears in the zone of his visibility. For this, the process of using the video stream received from the camera on the head of the robot, which works in real time, was described. The Histogram of Oriented Gradient algorithm is used to detect a person in the frame, and the Kernelized Correlation Filters tracker is used to track his movement. The software is implemented using the Robot Operating System 2 platform. The Python programming language is used. The paper presents the results of

tests to test the operability of the security system that was implemented on an autonomous wheeled robot. The possible directions of technology development, as well as the advantages and disadvantages of the combination of the selected algorithms are analyzed.

Ключевые слова: компьютерное зрение, обработка изображений, машинное зрение, трекинг объектов, обнаружение объектов, KCF Tracker, HOG, ГЛБШ, ROS2, Raspberry Pi3

Keywords: computer vision, image processing, machine vision, object tracking, object detection, KCF Tracker, HOG, ROS2, Raspberry Pi3

На протяжении долгих лет люди применяли оптические приборы для улучшения своих сенсорных способностей, а также использовали их для создания качественных товаров или произведений искусств. Однако со временем инструменты, которые были предназначены для улучшения человеческого зрения, были заменены новыми высокотехнологичными устройствами, которые способны имитировать зрительное восприятие. Так появилось компьютерное зрение.

Компьютерное зрение — это междисциплинарная область, изучающая алгоритмы, благодаря которым компьютер может «видеть» и «понимать» окружающий мир, а также выполнять задачи, которые требуют зрительную информацию. Эта технология использует методы получения, обработки и анализа цифровых изображений, а также может извлекать многомерные данные для получения определенной информации [1]. Создание систем с использованием технологий компьютерного зрения может оказаться достаточно сложной задачей, поскольку для них не существует единого решения.

Одним из главных направлений в области компьютерного зрения являются различные системы ADAS. Advanced Driver Assistance System — усовершенствованные системы помощи водителю, которые представляют собой набор функций и технологий для безопасной эксплуатации транспортного средства. Компьютерное зрение в ADAS решает следующие задачи: обнаружение и классификация объектов, семантическая сегментация дорожных сцен. ADAS использует различные датчики, автомобильные видеокамеры и алгоритмы для обнаружения потенциальных опасностей и предупреждения водителя. Помимо того, системой возможно применение функции корректирующих мер, когда это необходимо [2].

В качестве примера использования компьютерного зрения на производстве с целью обеспечения безопасности сотрудников, можно привести совместную разработку компаний Komatsu Limited и NVIDIA Corporation. На данный момент Komatsu Limited является лидером по производству строительной, горнодобывающей и военной техники в Японии, а NVIDIA Corporation — ведущая американская технологическая компания, занимающиеся разработкой графических процессоров и систем на чипе. Несколько лет назад предприятия объявили о планах по интеграции вычислительной платформы NVIDIA Jetson AI в технику, используемую при раскопках, бурении, добыче полезных ископаемых и т. д. Оборудование будет оснащено круговым обзором, а искусствен-

ный интеллект на основе глубокого обучения будет отслеживать перемещения людей и оборудования, тем самым избегая опасных моментов и уменьшая количество травм у сотрудников [3].

Целью исследования является создание системы безопасности для разработанного в лаборатории «Интеллектуальная робототехника» БФУ им. И. Канта автономного колесного робота (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид автономного колесного робота

Робот функционирует на базе платформы Raspberry Pi3, поэтому создание системы ведется с учетом ограничений по производительности бортового компьютера. Также имеется камера, которая закреплена на голову робота.

Система безопасности должна решать задачу ограничения скорости движения робота при появлении человека в зоне видимости камеры для избежания столкновения. Кроме того, возможен вариант предупреждения человека звуковым сигналом.

Изначально планировалось использовать сверточные нейронные сети для обнаружения человека на видеопоследовательности. Однако испытания показали, что такой подход является слишком ресурсозатратным, обнаружение объекта занимает много времени, а кадровая частота видео снижается примерно до 3 кадров в секунду. Такие результаты являются недопустимыми для работы в режиме реального времени. Поэтому было решено использовать классические алгоритмы машинного обучения для трекинга человека.

Трекинг — это определение местоположения движущегося объекта (или нескольких объектов) во времени с помощью камеры. Для отслеживания объекта на видео алгоритмы трекинга анализируют последовательные видеок кадры и оценивает параметры движения, которые характеризуют положение объекта. Системы визуального наблюдения состоят из двух основных компонентов [4]:

— локализация — определение начальных координат целевого объекта;

— сопоставление данных — определение местоположения целевого объекта на текущем кадре с использованием начальных координат и предыдущих кадров видеопоследовательности.

Для локализации объектов был выбран алгоритм гистограмм направленных градиентов (далее — HOG). Идея, лежащая в его основе, состоит в том, чтобы извлечь характеристики изображения в вектор и передать полученные значения алгоритму классификации, например, методу опорных векторов (далее — SVM), который определит, присутствует ли на изображении объект или нет.

На первом, необязательном, шаге алгоритма HOG происходит обработка изображения, нормализуется его размер и цвет. В некоторых случаях это может повысить производительность, хоть и незначительно. Далее происходит вычисление горизонтальных и вертикальных градиентов путем свертки входного изображения: $[-1 \ 0 \ 1]$, $\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Свертка выполняется согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned} g_x &= d_x \times f(x, y), \\ g_y &= d_y \times f(x, y), \end{aligned}$$

где g_x и g_y — изображения после применения горизонтальной и вертикальной свертки соответственно, $f(x, y)$ — входное изображение, d_x и d_y — ядро свертки по x и y соответственно (рис. 2).

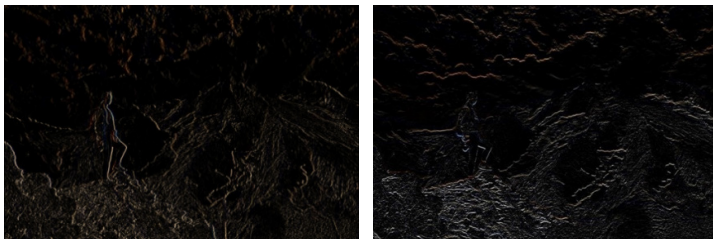


Рис. 2. Сверху — входное изображение [5],
снизу слева — абсолютные значения градиента по x ,
снизу справа — абсолютные значения градиента по y

Затем для каждого пикселя рассчитывается величина и направление градиента по следующим формулам:

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2},$$

$$\theta = \arctan \frac{g_y}{g_x}.$$

Для цветных изображений величина градиента в пикселе будет равняться максимальному значению по трем цветовым каналам, а направление — соответствующему направлению для максимального градиента (рис. 3).

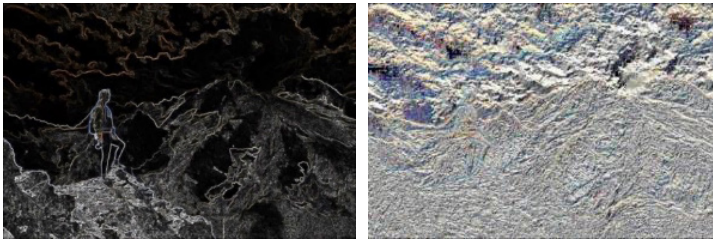


Рис. 3. Слева — визуализация величины градиента, справа — визуализация направления градиента

Стоит отметить, что значения направления градиентов могут находиться либо в пределах диапазона $[0^\circ, 180^\circ]$ («беззнаковый градиент»), либо $[0^\circ, 360^\circ]$ («знаковый градиент»). Как правило, предпочтительно использовать «беззнаковые градиенты», однако все зависит от решаемой задачи, где использование «знаковых градиентов» может повысить точность (рис. 4).

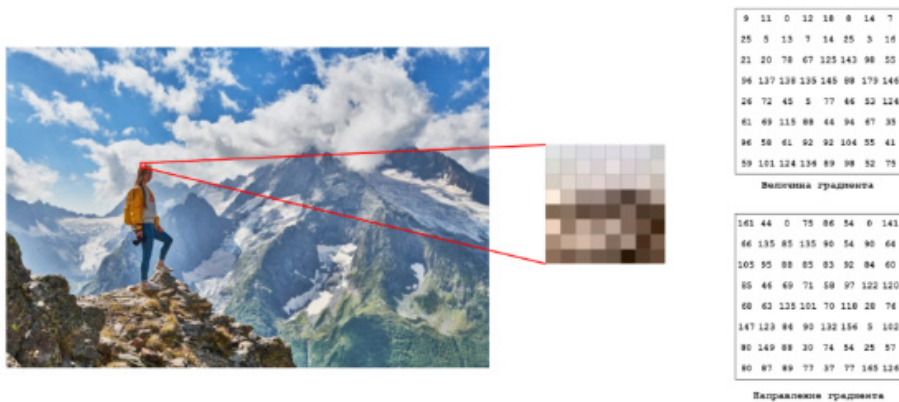


Рис. 4. Величина и направление градиента в ячейке 8×8

На следующем этапе алгоритма изображение делится на ячейки 8×8 пикселей и для каждой строится гистограмма ориентированных градиентов. Гистограммы состоят из 9 интервалов, каждый из которых имеет диапазон равный 20° (рис. 5).

Значение	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Интервал	0	20	40	60	80	100	120	140	160

Рис. 5. Представление 9-ти интервальной гистограммы

Для каждого пикселя из ячейки рассматривается значение направления градиента. Если оно равно значению одного из интервалов, то величина градиента рассматриваемого пикселя кумулятивно складывается со значением этого интервала. Если же значение лежит между двумя интервалами, то величина градиента пропорционально делится между двумя интервалами и кумулятивно складывается со значением интервала:

$$i = \left\lfloor \frac{\theta}{\Delta\theta} \right\rfloor,$$

$$j = i + 1,$$

$$V_i = g * \left(j - \frac{\theta}{\Delta\theta} \right),$$

$$V_j = g * \left(\frac{\theta}{\Delta\theta} - i \right),$$

где i и j — номера левого и правого интервала, V_i и V_j — величина градиента для левого и правого интервала, $\Delta\theta$ — диапазон интервала гистограммы (в данном случае $\Delta\theta = 20$).

Если значение направления градиента больше 160° , то, принимая во внимание, что в «беззнаковом градиенте» 180° эквивалентно 0° , величина градиента пропорционально делится между 160° и 0° (рис. 6).



Рис. 6. Метод расчета гистограммы

Для рассматриваемой ячейки гистограмма будет выглядеть следующим образом (рис. 7):

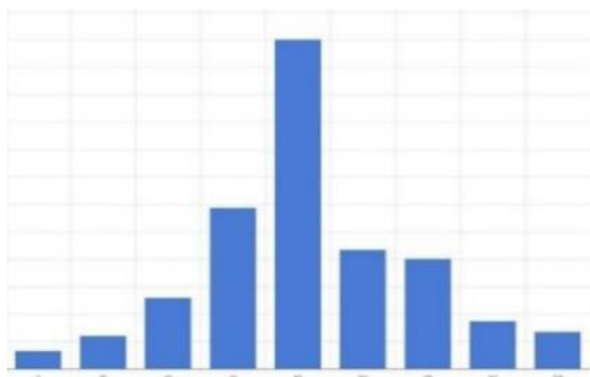


Рис. 7. HOG

Чтобы учитывать изменение освещения и контраста изображения, нужно нормализовать значения градиента. Для этого требуется сгруппировать ячейки 8×8 в более крупные блоки. Нормировочный множитель можно получить следующим способом:

$$\text{L2 - норма: } f = \frac{v}{\sqrt{\|v\|_2^2 + e^2}},$$

где v — ненормированный вектор, $\|v\|^2$ — его норма, e — некая малая константа.

Обычно блоки перекрываются, и каждая ячейка вносит свой вклад в результирующее значение вектора характеристик более одного раза. Хотя такое представление HOG является избыточным и занимает много места, оно повышает производительность дескриптора.

После того, как все блоки нормализованы, все полученные гистограммы объединяются в окончательный вектор характеристик, дескриптор HOG. Последний этап — классификация дескрипторов, например, с помощью метода SVM.

Алгоритм HOG широко применяется в различных областях промышленности, таких как системы наблюдения, беспилотные автомобили и робототехника. Он эффективен для обнаружения пешеходов и транспортных средств, устойчив к изменениям освещения и способен обнаруживать объекты с разным масштабом. А благодаря скорости работы алгоритма, его можно использовать в режиме реального времени [6; 7].

Для сопоставления данных был выбран алгоритм на основе корреляционного фильтра с ядром (далее — KCF) — популярный и эффективный метод отслеживания объектов в видеорядах, который представляет собой комбинацию двух классических алгоритмов: Boosting и MIL.

В качестве входных данных KCF получает координаты отслеживаемого объекта на первом кадре видеопоследовательности. Во время обработки последующих кадров, он использует алгоритм классификации

AdaBoost, который обучается в режиме реального времени на положительных и отрицательных данных. В качестве положительных данных используется начальное изображение отслеживаемого объекта и небольшой области вокруг него. Отрицательные данные состоят из частичных или смещенных изображений отслеживаемого объекта. Получив новый кадр видеопоследовательности, классификатор оценивает пиксели области обнаружения из предыдущего кадра, и новое положение объекта будет областью, где оценка имеет максимальное значение. Положительные и отрицательные данные имеют множество перекрывающихся областей. Корреляционная фильтрация, примененная к этим областям, позволяет с высокой точностью отслеживать перемещение объекта и прогнозировать его дальнейшее положение.

Алгоритм отслеживания KCF — это идеальный компромисс между точностью обнаружения и скоростью работы. Он может работать в режиме реального времени, показывая результаты на уровне или даже лучше, чем другие алгоритмы отслеживания. Он легко адаптируется к различным сценариям и может обрабатывать широкий спектр целевых объектов, включая жесткие и нежесткие объекты. Но самое главное, KCF имеет низкие требования к памяти, что делает его пригодным для реализации на устройствах с ограниченными ресурсами, таких как микроконтроллеры и мобильные телефоны [8].

Сочетание алгоритмов KCF и HOG — это идеальная комбинация для трекинга объектов на устройствах с ограниченными ресурсами, которая позволяет добиться оптимального компромисса между точностью отслеживания и скоростью работы.

Возможен вариант создать систему безопасности, используя только алгоритм обнаружения, и обрабатывать с его помощью каждый кадр видеопоследовательности. Однако такой подход менее эффективен. Обычно алгоритмы отслеживания работают быстрее, чем алгоритмы обнаружения, так как используют имеющуюся информацию об объекте (внешний вид, местоположение в предыдущем кадре, направление и скорость движения и др.) для определения его текущего местоположения. В то время как алгоритмы обнаружения каждый раз начинают поиск с нуля.

Но и совсем отказаться от него невозможно. С его помощью вычисляются начальные координаты объектов отслеживания. Кроме того, алгоритм отслеживания может потерять объект во время окклюзии или быстрого перемещения. Они часто накапливают ошибки и ограничительная рамка, обрамляющая объект отслеживания, медленно отклоняется от него [9].

Поэтому при создании эффективной системы трекинга алгоритм обнаружения обычно запускается на каждом n -ом кадре, в то время как алгоритм отслеживания используется в промежуточных $n - 1$ кадрах. В разрабатываемой системе безопасности алгоритм обнаружения объектов запускается каждую секунду.

Программа трекинга человека состоит из следующих этапов:

1. Считывается первый кадр видеопоследовательности, полученной с камеры робота.

2. Запускается алгоритм обнаружения объектов HOG, которому в качестве входных данных передается полученный кадр. Рассчитывается набор начальных координат.

3. Координаты передаются трекеру нескольких объектов KCF, где инициализируются объекты отслеживания.

4. В каждом новом кадре трекер обновляет координаты отслеживаемых объектов.

5. Каждую секунду запускается алгоритм HOG и рассчитываются актуальные координаты объектов.

6. В случае обнаружения нового объекта, его координаты также передаются в трекер, для инициализации.

7. Если в кадре был найден человек, посылается сигнал системе робота, отвечающей за ограничение скорости.

Программное обеспечение управляющего компьютера написано с использованием программной платформы Robot Operating System 2 (ROS2). Она позволяет организовать обмен сообщениями между программами (узлами) в пределах одного или нескольких компьютеров. Узлы написаны на языке программирования Python [10]. На рисунке 8 представлена структура программного комплекса.

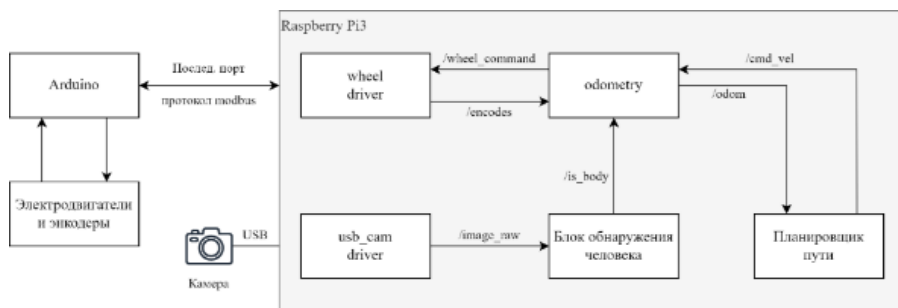


Рис. 8. Структура программного комплекса

Камера через USB-порт подключается к компьютеру Raspberry. Узел «Блок обнаружения человека» предназначен для обнаружения человека на видеокadre, исходные данные для которого поступают через топик /image_raw, и передачи сообщения из топика /is_body в узел «odometry». Узел «odometry» используется для расчета одометрии, исходные данные для которого поступают через топика /encodes и /is_body, и передачи управляющих команд из топика /wheel_command в узел «wheel driver», предназначенный для управления колесами и получения данных энкодеров.

После внедрения системы безопасности на колесного автономного робота, была протестирована ее работоспособность.

В первую очередь было проведено стендовое испытание. Его целью — определить, снижает ли робот скорость движения при появлении человека в зоне видимости камеры. Робот был поставлен на подпорки, чтобы колеса не касались пола и зависли в воздухе (рис. 9).

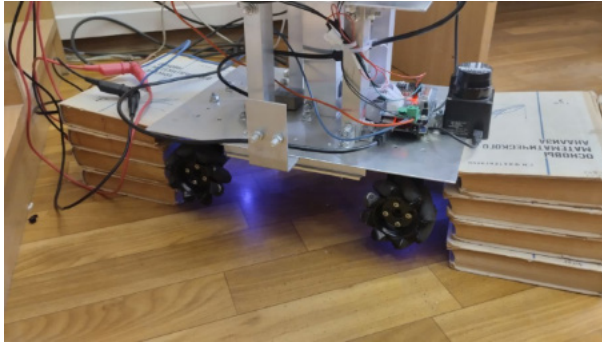


Рис. 9. Стендовые испытания

В начале испытания роботу была задана начальная скорость. После обнаружения человека на видеопоследовательности, скорость вращения колес снижалась в 10 раз. Среднее значение кадровой частоты во время испытаний равнялось примерно 20 кадрам в секунду.

Второе испытание было натурным. Его целью являлось определение максимального расстояния, на котором происходит обнаружение человека. Для проведения испытаний робота переместили в помещении с открытым пространством (рис. 10).



Рис. 10. Натурные испытания

Опытным путем было установлено, что обнаружение людей происходит на расстоянии до 30 м. С помощью полученных значений можно будет рассчитать оптимальную скорость движения робота, чтобы он успел затормозить при появлении человека в зоне видимости камеры робота.

Результаты работы системы безопасности сложно назвать идеальными, но они приемлемы в условиях работы с ограниченными ресурсами. Во время сильной окклюзии или в случаях, когда человек принимает нестандартную позу, отслеживание становится затруднительным. Но в целом с задачей отслеживания пешеходов система безопасности справляется успешно.

Список литературы

1. *Актуальность* промышленных роботов для автоматизации производств. URL: <https://ds-robotics.ru/articles/aktualnost-promyshlennyh-robotov-dlya-avtomatizacii-proizvodstv> (дата обращения: 26.03.2023).
2. *Нейронные* сети для нетривиальных задач в области компьютерного зрения. URL: <https://www.it-world.ru/it-news/tech/141386.html> (дата обращения: 21.05.2023).
3. *NVIDIA And Komatsu Partner on AI-Based Intelligent Equipment For Improved Safety And Efficiency.* URL: <https://www.forbes.com/sites/tiriasresearch/2017/12/12/nvidia-and-komatsu-partner-on-ai-based-intelligent-equipment/?sh=ee845d0665b0> (дата обращения: 27.05.2023).
4. *Object Tracking using OpenCV (C++/Python).* URL: <https://learnopencv.com/object-tracking-using-opencv-cpp-python> (дата обращения: 26.03.2023).
5. *Горный* туризм. URL: <https://pibig.info/92510-gornyj-turizm.html> (дата обращения: 26.03.2023).
6. *Кулинкович В. А.* Применение методики гистограмм направленных градиентов для классификации дактилоскопических изображений). URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/179301/1/53-60.pdf> (дата обращения: 12.05.2023).
7. *Histogram of oriented gradients.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Histogram_of_oriented_gradients (дата обращения: 25.05.2023).
8. *Henriques J., Caseiro R., Martins P., Batista J.* Henriques High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. URL: <https://arxiv.org/pdf/1404.7584.pdf> (дата обращения: 19.04.2023).
9. *Understanding Multiple Object Tracking using DeepSORT.* URL: <https://learnopencv.com/understanding-multiple-object-tracking-using-deepsort/> (дата обращения: 12.05.2023).
10. *OpenCV Object Tracking.* URL: <https://pyimagesearch.com/2018/07/30/opencv-object-tracking/> (дата обращения: 15.04.2023).

Об авторах

Ольга Ильинична Нестерова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: nesterova-99@list.ru

Михаил Владимирович Тарачков — аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: mishklgpmi@mail.ru

The authors

Olga I. Nesterova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: nesterova-99@list.ru

Mikhail V. Tarachkov, Graduate Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: mishklgpmi@mail.ru

В. А. Казбанов, М. С. Курицкий, А. Н. Алещенко¹

РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОЗАДАЧНОСТИ НА ОДНОЯДЕРНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ

Рассматривается проблема одновременности выполнения одноядерным микроконтроллером нескольких процессов в условиях ограниченных ресурсов и малой мощности самого контроллера. Исследуются схемы возможной реализации многозадачности на базе однокристалльных одноядерных микроконтроллеров, а также, как следствие, пути повышения эффективности работы подобных устройств. Описан программный метод по созданию многозадачности на базе прерываний с использованием библиотеки RTIC (Real-time Interrupt-driven Concurrency) высокоуровневого языка программирования Rust. Обращается внимание на то, что такое решение идеально подходит для программ с малым числом подзадач, ускоряет и упрощает работу программного кода. Предлагается аппаратный способ организации многозадачности, основанный на применении технологии DMA (Direct Memory Access). Отмечается, что такой метод способствует эффективной передаче большого потока данных за счет одновременной работы контроллера DMA и центрального процессорного устройства. Показано, что совмещение технологий DMA и RTIC позволяет решать более широкий круг задач на одноядерных микроконтроллерах. Данный подход позволяет задействовать весь потенциал этих устройств без применения дорогостоящих вычислительных систем и с наименьшими затратами времени.

The article discusses the problem of a simultaneous execution of multiple tasks by a single-core processor in a context of limited hardware resources and low computing power of the processor itself. The paper explores various implementations of multitasking possible on single-core microcontrollers, and, as a consequence, ways to increase the efficiency of such devices. The authors describe a software method for creating interrupt-based multitasking using the RTIC (Real-Time Interrupt-driven Concurrency) library for the high-level programming language named Rust. It is pointed out that such a solution is ideal for programs with small count of subtasks, because it speeds-up and simplifies the programming code. This article also suggests a hardware method based on the usage of DMA (Direct Memory Access) technology. Such method allows effective transfer of great amount of data due to simultaneous work of the DMA controller and the CPU. It is shown that a combination of both DMA and RTIC technologies makes it possible to solve a wider variety of tasks on single-core microcontrollers. This approach utilizes the entire potential of such devices without the need for expensive computing systems and with minimal time overhead.

Ключевые слова: многозадачность, микроконтроллеры, встраиваемые системы, прерывания, RTIC, DMA

Keywords: multitasking, microcontrollers, embedded systems, interrupts, RTIC, DMA

Введение

Современные микроконтроллеры помимо процессорного ядра содержат на одном кристалле большое количество различной периферии, что в совмещении с относительно высокими тактовыми частотами (вплоть до сотен мегагерц) позволяет эффективно и быстро выполнять специализированные задачи разного рода. Однако совмещение нескольких задач в условиях ограниченных ресурсов микроконтроллерного ядра оказывается весьма проблематичным, а иногда и вовсе невозможным без применения дополнительных внешних модулей или замены самого контроллера на более мощный и дорогостоящий. В некоторых же случаях приходится перекладывать часть задач на классический компьютер.

Одним из вариантов повышения вычислительной мощности системы является организация распределенных вычислений на базе нескольких процессорных устройств [1]. В настоящее время в различных областях науки и техники довольно широко применяются распределенные системы реального времени [2]. Однако организация таких параллельных алгоритмов представляет собой в целом непростую задачу, а в случае, например, функционирования систем навигации и ориентирования попросту невозможную в виду того, что в выработке навигационного решения участвуют все исходные данные одновременно [3]. Более того, зачастую организация многозадачности путем увеличения числа микроконтроллеров является попросту нецелесообразным решением ввиду увеличения как габаритов самой установки, так и ее стоимости и энергопотребления.

Таким образом, научный интерес представляет вопрос возможности реализации многозадачности именно на одном микроконтроллере с одним ядром. В некоторой форме эта операция оказывается действительно возможной и выполнимой.

Программная многозадачность

Итак, под многозадачностью понимается такой режим работы компьютера, при котором устройство может одновременно осуществлять некоторое количество текущих процессов (задач). Однако она вовсе не подразумевает параллельные вычисления, поскольку одноядерный процессор способен выполнять в текущий момент времени лишь одну задачу. Многозадачность осуществляется за счет организации чередования текущих процессов. То есть между задачами осуществляется постоянное переключение. Вначале выделяется определенный промежуток времени на выполнение небольшой части одной задачи, далее происходит переключение на другую, выполняется некоторая часть этой задачи, и так далее.

Как показывает история, реализация многозадачности в вычислительной технике не требует специальных аппаратных решений, достаточно лишь одного процессорного ядра с дальнейшей реализацией многозадачности на уровне операционной системы. Но здесь мы сталкиваемся с определенными трудностями ввиду того, что обычно у микроконтрол-

леров операционная система отсутствует. Можно, конечно, обратиться к аналогам — так называемым встраиваемым системам (от англ. «embedded systems»).

Встраиваемые компьютерные системы проектируются специально для решения задач управления внутри крупных систем и по сравнению с привычными операционными системами в персональных компьютерах затачиваются под выполнение ограниченного количества процессов. Они применяются в основном в микроконтроллерах различных устройств бытового и производственного уровня для контроля и управления процессами [4].

Однако вследствие ограниченности ресурсов, доступных встраиваемым системам, а также наличия определенных требований по энергоэффективности и малогабаритности, реализация полноценной операционной системы на базе одноядерных микроконтроллеров оказывается практически невозможной. Существуют, конечно, сильно упрощенные версии операционных ядер для встраиваемых систем (например, Linux), но и их применение не всегда уместно.

Таким образом, возникает необходимость в применении некоторой программной оболочки для основной программы микроконтроллера, которая будет реализовывать разделение участков программного кода на задачи с последующим контролем их выполнения. Она должна быть низкоуровневой, не полноценной операционной системой. Такого рода программная оболочка может быть реализована в виде подключаемой библиотеки кода. Пользовательский код должен сигнализировать ей о возможности приостановки текущей задачи с последующей передачей управления следующей задаче, в общем случае являющейся другим участком программного кода со своим стеком данных, который тоже необходимо сохранять при переключении между задачами.

В такой схеме, однако, прослеживается явный недостаток — запрос о передаче вычислительных ресурсов подает сама исполняемая задача. Для возможности перехвата управления со стороны (например, сигналом извне) исполняемый код должен регулярно проверять наличие таковых сигналов. Эти проверки требуют вставок кода между логически разграниченными участками задачи или «дорогостоящими» операциями и переключают всю ответственность за корректность и гранулярность переключения между задачами на разработчика, добавляя дополнительную интеллектуальную нагрузку и усложняя читаемость кода.

Для упрощения процедуры передачи управления подавляющее большинство вычислительных процессорных ядер использует технологию так называемых прерываний (от англ. «interrupts»).

Прерыванием называют команду, которая указывает процессору немедленно остановить действие текущего алгоритма (задачи) и перейти к выполнению других операций, имеющих программно больший приоритет. Прерывание является одной из нескольких базовых концепций в вычислительной технике.

Рассмотрим процесс обработки прерывания (рис. 1). Итак, программа в микроконтроллере представляет из себя некоторый циклический алгоритм, выполняющийся непрерывно. Когда процессору поступает команда прерывания, программа переходит к специально обозначенной

процедуре — обработчику прерываний ISR (от англ. «Interrupt Service Routine»). По завершении всех процессов обработчик прерываний передает управление прерванному коду.

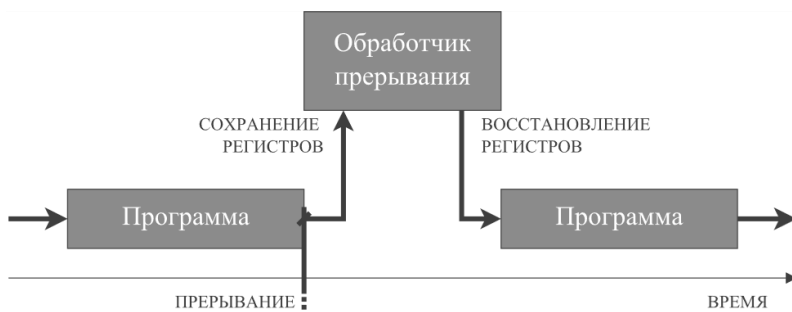


Рис. 1. Схематическое представление процесса обработки прерывания

Прерывание может произойти в любом месте программы. Обычно прерывания обусловлены внешними событиями, не зависящими от самой программы (отсчет таймера или сигнал от периферии), но иногда при отсутствии иных способов коммуникации могут находиться и внутри кода одной и той же программы для потокового управления.

Для реализации простейшего многозадачного алгоритма достаточно использовать один или несколько внутренних таймеров микроконтроллера, осуществляющих прерывание, вследствие чего будут выполняться некоторые небольшие подзадачи (рис. 2). В основном коде программы в этом случае будет прописываться периодичность прерываний, а таймер будет выступать в роли указателя для переключения на другую задачу (подзадачу). С увеличением количества таймеров будет увеличиваться и число возможных фактически одновременно выполняемых процессов.

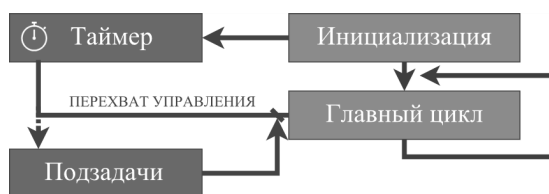


Рис. 2. Простейшая реализация многозадачности при помощи таймера

Применение прерываний позволяет значительно упростить и ускорить работу программного кода. Однако стоит отметить, что данный вариант с использованием внутренних таймеров подходит в первую очередь для программ с малым числом задач. Для координации большого количества задач необходимо вводить приоритеты, иначе контроль над корректным выполнением основной задачи может быть утерян. Также существует проблема корректного сохранения и восстановления стеки вызовов при применении прерываний в программе.

Описанный выше алгоритм по созданию многозадачности в реальном времени на основе прерываний очень удачно реализован на языке программирования Rust [5; 6], использующем библиотеку RTIC (от англ. «Real-time Interrupt-driven Concurrency») [7; 8] для семейства микроконтроллеров STM32 на базе ядер ARM Cortex-M [9]. Данная библиотека позволяет организовать безопасное управление задачами в пользовательском коде, применяя выбранные пользователем типы системных прерываний контроллера в качестве каналов для передачи управления между задачами. Задачи могут запускаться от событий (срабатывать в ответ на асинхронные воздействия) или вызываться по запросу программы [10]. Программные задачи здесь можно планировать на запуск в определенный момент в будущем, что эффективно позволяет использовать эту библиотеку для создания периодических задач [11]. Также RTIC поддерживает принцип приоритета задач, на котором как раз и возможно построение вытесняющей многозадачности.

Аппаратная многозадачность

Большинство операций центрального процессора в системах на основе микроконтроллеров связаны с перемещением данных. Во многих случаях это может значительно ограничить пропускную способность и скорость отклика системы. Например, прерывание может привести к тому, что процессор остановит то, что он в данный момент делает, чтобы обработать это прерывание. В маломощных приложениях это может значительно увеличить общее энергопотребление и привести к задержкам в работе микроконтроллера [12].

В информационных технологиях существует способ эффективной передачи данных между элементами микроконтроллера без участия центрального процессорного устройства (далее — ЦПУ). Это так называемая технология прямого доступа к памяти DMA (от англ. «Direct Memory Access») — функция компьютерных систем, которая позволяет аппаратным подсистемам получать доступ к основной системной памяти (ОЗУ) независимо от ЦПУ (рис. 3). Применение DMA позволяет снять нагрузку с процессорного ядра и сэкономить значительное количество тактового времени на процессах передачи данных между периферийными устройствами и (или) оперативной памятью микроконтроллера.



Рис. 3. Схематическая структура связи DMA, периферии и памяти в микроконтроллере

Таким образом, DMA предоставляет метод разгрузки операций перемещения данных с ЦПУ, обеспечивая параллелизм и, как результат, аппаратную многозадачность в системе за счет одновременной работы DMA и ЦПУ. Это, в свою очередь, снижает задержку прерывания, тем самым увеличивая скорость отклика системы и уменьшая энергопотребление [13; 14].

Отличным примером применения технологии DMA является передача большого количества данных из памяти микроконтроллера внешнему устройству по последовательному порту. Даже на максимально поддерживаемых скоростях (до 3 Мбит/с при использовании внешних модулей для последовательной передачи данных, например, FT232BL [15]) процедура передачи всего нескольких килобайт информации может занять до нескольких секунд. В критических системах такие значительные паузы в работе микроконтроллера просто недопустимы. Оптимизация системы с использованием контроллера DMA позволяет снять большую часть нагрузки с единственного ядра микроконтроллера, предоставляя возможность выполнять больше полезной работы с много меньшими задержками.

В качестве еще одного примера применения технологии DMA можно привести процесс непрерывного снятия показаний с аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в выделенную область оперативной памяти без участия центрального процессора. Также возможен и обратный процесс непрерывного генерирования сигнала при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) из его цифрового образа в оперативной памяти контроллера (например, в аудиосистемах или других генераторах сигналов).

Стоит отметить, что процесс передачи данных при помощи контроллера DMA в общем случае является потоковым и может длиться ограниченное время. Иными словами, процесс передачи данных по каналам DMA можно осуществлять по запросу для ограниченного набора данных, например, для передачи некоторой внутренней информации о состоянии системы или же буфера с накопленными измерениями. Путем совмещения технологий DMA и RTIC на микроконтроллерах можно решать гораздо более широкий круг задач, а также в некоторых случаях экономить на дорогостоящих вычислительных системах, реализуя их функционал частично или полностью при помощи микроконтроллера.

Заключение

Таким образом, несмотря на неприменимость многозадачности в ее классическом виде (то есть на базе параллельных вычислений) в процессе embedded-разработки все же можно реализовать разделение участков кода на подзадачи с возможностью задания их приоритета. Помимо этого, при наличии в микроконтроллере встроенных таймеров и аппаратной поддержки прерываний возможна даже планировка отложенных или регулярных задач. Кроме того, при наличии аппаратной поддержки технологии DMA возможна и оптимизация передачи большого потока данных между процессорным ядром, периферией и оперативной памятью. В некоторых случаях возможность организации разделения участков кода на

подзадачи позволяет снизить как временные, так и материальные затраты на покупку дорогих быстродействующих аналогов вычислительных устройств.

Подводя итог, можно сказать, что своего рода многозадачность на одноплатных микроконтроллерах все же реализуема, причем как программными, так и аппаратными методами.

Список литературы

1. *Тель Ж.* Введение в распределенные алгоритмы. М., 2009.
2. *Витиска Н. И., Гуляев Н. А., Данилов И. Г.* О проблемах и задачах обработки и организации графических данных при объемной визуализации на распределенных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 4 (206). С. 153—163.
3. *Шипов И. А.* Реализация распределенных вычислений на отечественных микропроцессорных устройствах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1 (225). С. 218—225.
4. *Сафронов А. Ю., Намиот Д. Е.* Среда разработки программного обеспечения для встраиваемых систем на основе JME // International Journal of Open Information Technologies. 2013. № 2.
5. *Rust: A language empowering everyone to build reliable and efficient software.* URL: <https://www.rust-lang.org/> (дата обращения: 13.03.2023).
6. *TISMO INSIGHTS: Analytical Instruments Empowered by Rust.* URL: <https://www.tismotech.com/insights/> (дата обращения: 13.03.2023).
7. *Real-Time Interrupt-driven Concurrency.* URL: <https://rtic.rs/1/book/en/> (дата обращения: 13.03.2023).
8. *Tjäder H.* RTIC — A Zero-Cost Abstraction for Memory Safe Concurrency / Luleå University of Technology, Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering. 2021.
9. *STM32 32-bit Arm Cortex MCUs.* URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (дата обращения: 13.03.2023).
10. *Real-time for the masses, step 1: Programming API and static priority SRP kernel primitives / J. Eriksson, F. Häggström, S. Aittamaa [et al.] // Industrial Embedded Systems (SIES), 2013 8th IEEE International Symposium.* 2013. P. 110—113.
11. *Abstract timers and their implementation onto the ARM Cortex-M family of MCUs / P. Lindgren, E. Fresk, M. Lindner [et al.] // ACM SIGBED Review.* 2016. № 13 (1). P. 48—53.
12. *Дашевский В. П., Будков В. Ю.* Спектроскопия задержек в системах реального времени // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. № 3 (15). С. 92—100.
13. *PISA-DMA: Processing-in-Memory Instruction Set Architecture Using DMA / W. J. Lee, C. H. Kim, Y. Paik, S. W. Kim // IEEE Access.* 2023. Vol. 11. P. 8622—8632.
14. *Direct Memory Access on PIC Microcontrollers.* URL: <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/core-independent-and-analog-peripherals/system-flexibility/direct-memory-access#> (дата обращения: 13.03.2023).
15. *USB Full Speed to Serial UART IC, LQFP-32.* URL: <https://ftdichip.com/products/ft232bl/> (дата обращения: 13.03.2023).

Об авторах

Виктор Алексеевич Казбанов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: mishklgpmi@mail.ru

Михаил Сергеевич Курицкий — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: MiKuritskii@stud.kantiana.ru, Mix-Mux@yandex.ru

Алексей Николаевич Алешенко — канд. техн. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

The authors

Viktor A. Kazbanov, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: kazbanov2000@yandex.ru

Michael S. Kuritskii, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: MiKuritskii@stud.kantiana.ru, Mix-Mux@yandex.ru

Dr Alexey N. Aleshchenko, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

Д. А. Казакова, И. В. Лищук

**СОЗДАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ
ДЛЯ КОНВЕРТИРОВАНИЯ ВАЛЮТЫ В КРИПТОАКТИВЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН**

Описывается алгоритм работы разрабатываемого приложения для конвертирования валюты в криптоактивы с применением блокчейн технологии. Собраны основные рекомендации для начинающих разработчиков, которые позволят определить первые шаги по созданию приложения. Приведены четкие сравнения языков программирования и сред разработки программного обеспечения. Подчеркивается важность проведения сравнительного анализа языков программирования и сред разработки на конкретном примере. Актуальность обоснована тем, что в настоящее время разработка приложений для систем Android пользуется большим спросом, в связи с популярностью этой операционной системы и ее повсеместным использованием.

This article describes the algorithm of the developed application for converting currency into crypto assets using blockchain technology. The article contains the main recommendations for beginner developers, which will help determine the first steps in creating an application. Clear comparisons of programming languages and software development environments are also given. This article emphasizes the importance of conducting a comparative analysis of programming languages and development environments on a specific example. The relevance of the article is also justified by the fact that at present the development of applications for Android systems is in great demand, due to the popularity of this operating system and its widespread use.

Ключевые слова: блокчейн, информационные технологии, мобильное приложение, внедрение, алгоритмы, вычислительные системы, цепочка блоков

Keywords: blockchain, information technology, mobile application, implementation, algorithms, computing systems, block chain

Криптовалюта является виртуальными деньгами. В настоящее время высоким спросом пользуется биткойн, но есть и различные альтернативные монеты (alternative coin).

Блокчейн — децентрализованное и зашифрованное хранилище информации, которое не принадлежит никому, хранится на нескольких устройствах и используется для функционирования криптовалют.

Криптовалюта, включая биткойн и альтернативные монеты, все еще остается привлекательной инвестицией, вопреки ее изменчивости. Несмотря на то, что колебания цен могут вызывать опасения, они также

могут предоставлять новые возможности для получения сверхприбыли. Криптовалюта — это будущее для финансового и ИТ сектора, поскольку долгосрочные перспективы биткойна и децентрализованных проектов растут. Крупные компании, такие как Microsoft, Visa, Paypal и Square, уже вкладываются в криптовалюту, что укрепляет ее позиции в финансовой индустрии. Эти проекты будут продолжать поддерживать рост криптовалюты.

Криптовалюта предоставляет возможность инвестирования, основанного на принципах прозрачности и децентрализации. Благодаря своей виртуальности, она позволяет осуществлять депозиты, опции, сделки и контракты без участия посредников, что обеспечивает надежность и безопасность [16]. Технология блокчейн, на которой основана криптовалюта, гарантирует ее независимость от централизованных структур и поддерживает ее рост в финансовой индустрии [17].

Defi продвигает прозрачность экосистемы, что в свою очередь препятствует централизованным структурам, работающим в блокчейне.

Для более глубокого понимания работы приложения, необходимо рассмотреть технологию блокчейн в деталях. Она представляет собой цифровую базу данных, которая состоит из зашифрованных блоков данных, соединенных между собой и защищенных сложными математическими задачами [13].

Решить математические задачи, связанные с соотношением одноразовых номеров и хэшей, чрезвычайно сложно, поскольку запись всех предыдущих действий в блокчейне является точной и недоступной для манипуляций [15].

Технология блокчейн обеспечивает равномерное распределение информации между различными децентрализованными узлами, что исключает возможность манипуляции или контроля со стороны какой-либо организации [12].

Структура системы, основанная на технологии блокчейн представлена на рисунке 1.

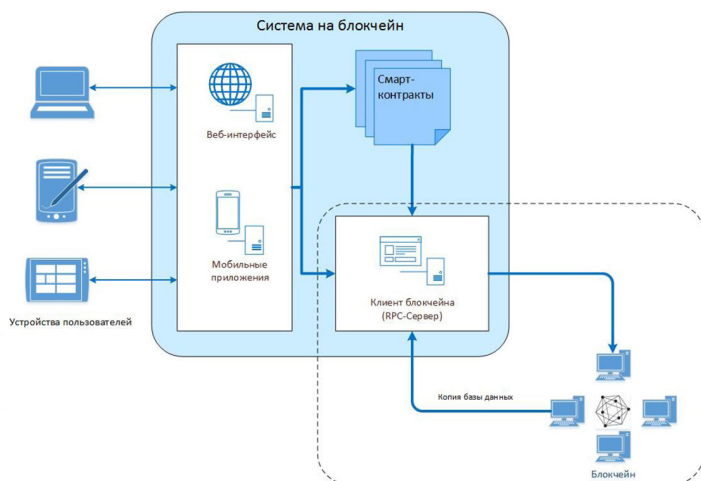


Рис. 1. Структура системы на блокчейн

Чтобы в полной мере понять работу системы на блокчейн, необходимо разобраться в сущности смарт-контрактов. Они представляют собой цифровые контракты, которые автоматически вступают в силу при выполнении определенных условий. Каждый контракт контролируется специальным кодом, который хранится в блокчейн-сети. Таким образом, все транзакции по контракту становятся неизменяемыми и отслеживаемыми. Смарт-контракты являются ключевым элементом платформы Ethereum, но также могут использоваться на других блокчейн-платформах, таких как Bitcoin, Cardano, EOS.IO и Tezos [7].

Торговля криптовалютой обычно проводится на биржевых площадках или сайтах, дающих возможность пользователям продавать, покупать и обменивать различные цифровые активы [10]. В связи с повсеместным ростом использования мобильных устройств, для развивающегося бизнеса огромное значение имеют мобильные приложения [4]. Они дают возможность справляться с большим спектром пользовательских задач [10]. В настоящее время разработка приложений для систем Android пользуется большим спросом, в связи с популярностью этой операционной системы и ее повсеместным использованием [6].

Создание мобильного приложения — это разработка программного обеспечения, предназначенного для использования на мобильных устройствах, в основном на операционных системах Android и iOS. Такие приложения доступны для загрузки из магазинов приложений или через веб-браузеры, а также могут быть предустановлены на устройство. Для их создания используются различные языки программирования, такие как Java, Python, C#, C++ и HTML5.

В наше время, разработка мобильных приложений стала одним из самых важных направлений в технологической сфере. Они используются повсеместно: от продажи товаров до совершения банковских операций и поддержки здравоохранения. Каждый год список сфер применения мобильных приложений увеличивается, и они становятся все более необходимыми для удобства и комфорта пользователей [6]. Приложения должны соответствовать их ожиданиям и быть удобными в использовании, что является отличным способом привлечения клиентов к компаниям. Разработка приложений для мобильных устройств — ключевой фактор для успешного развития компаний, которые должны учитывать потребности пользователей и партнеров, чтобы оставаться актуальными и успешными.

Однако создание мобильного приложения — это сложная задача, требующая преодоления множества ограничений и барьеров распространения. Если вы хотите сделать это успешно, то вам необходимо учитывать рекомендации по разработке мобильных приложений, чтобы облегчить этот процесс и добиться оригинальности и качества вашего продукта.

Многие команды, занимающиеся разработкой мобильных приложений, предпочитают создавать свои продукты для Android, ведь более 70 % мобильных устройств работают на этой операционной системе. Но это не единственная причина выбора Android. В Google Play гораздо меньше

ограничений, чем в App Store, что позволяет разработчикам более свободно воплощать свои идеи. Однако, стоит отметить, что приложения для iOS используются значительно меньшим количеством устройств, которые нуждаются в поддержке, что упрощает их оптимизацию. Кроме того, денежные потоки от пользователей iOS обычно выше. В данной статье описывается создание приложения именно для Android, но при выборе операционной системы стоит учитывать, что они могут использовать все перечисленные факторы.

При создании приложения для сотрудников компании необходимо учитывать, что они могут использовать различные платформы, поэтому следует разрабатывать кроссплатформенные приложения для Android и iOS. Однако если мобильное приложение создается для клиентов, преимущественно использующих iPhone, то следует уделить основное внимание разработке приложения для iOS. При этом необходимо учитывать культурные и географические факторы, чтобы узнать поведение пользователей и разработать эффективный план монетизации.

Чтобы создать мобильное приложение, необходимо придумать оригинальный проект, опыт, время и, прежде всего, веские причины. В ходе написания работы, были сформулированы 5 причин, которые могут мотивировать на создание приложения:

- улучшить узнаваемость и репутацию бренда;
- предложить своим клиентам определенные «специальные» функции;
- создать взаимодействия, адаптированные к потребностям вашего бизнеса;
- воспользоваться преимуществами повсеместного распространения мобильных телефонов;
- повысить скорость и качество взаимодействия для пользователей.

Создание мобильного приложения — это непростой и многотрудный процесс, который может занять от нескольких недель до нескольких месяцев. Все зависит от уровня сложности и функциональности приложения. Но чтобы начать разработку, необходимо четко определить цели и задачи, которые должно решать приложение. Это является первым и самым важным шагом в создании успешного мобильного приложения.

Помните, что ваши цели в конечном итоге будут определять весь процесс разработки. Если они не определены четко с самого начала, легко заблудиться, как только вы начнете создавать приложение.

Чтобы разработать приложение, в первую очередь нужно выбрать язык программирования и среду разработки.

Чтобы успешно выбрать язык программирования для определенной задачи, необходимо уделить внимание некоторым факторам: целевая платформа, гибкость языка программирования, его производительность, а также поддержка на различных устройствах [5].

В таблице 1 сравниваются языки программирования, используемые для создания приложений [3].

Таблица 1

**Сравнение языков программирования
для разработки мобильного приложения**

Критерий	Язык программирования			
	JAVA	C#	Python	C++
Опыт применения	+	+	+	+
Объектно-ориентированное программирование	+/-	+	+/-	+
Поддержка системы Android	+	+	+	+
Поддержка системы iOS	-	+	-	+
Доступность	+	+	+	+

Из таблицы 1, видно, что два языка программирования набрали одинаковое количество плюсов. Далее проведем их более подробное сравнение для осуществления качественного выбора.

На самом базовом уровне и C#, и C++ имеют схожий код. Однако C# гораздо новее. Он был представлен Microsoft в качестве конкурента Java в 2000 г. и является частью экосистемы ASP.NET. C++ — базовый язык для многих других, он был представлен еще в 1980-х гг.

Языки программирования C++ и C# относятся к объектно-ориентированным. Принято считать, что язык C++ для разработки приложений более непростой, чем C#. Два этих языка применяются не только в веб-приложениях, а также и в разработке приложений для стационарных компьютеров и ноутбуков. Исходя из проведенного исследования существующих и популярных приложений в настоящий момент, можно сделать вывод, что C# более часто применим, как и для мобильных приложений, так и для настольных.

В том случае, когда веб-приложение достаточно простое, не требующее множества различных конфигураций, значительная часть разработчиков отдаст свое предпочтение языку C#.

C# — язык программирования, основанный на C, что делает их синтаксис очень похожим. Он был создан для конкуренции с Java, но на практике больше похож на C++, чем на Java.

Одно из важных сходств между C# и C++ заключается в том, что они являются компилируемыми языками программирования. Перед запуском приложения на компьютере код необходимо преобразовать в бинарные файлы.

При более детальном сравнении двух языков программирования, выбор был сделан в пользу C#, так как он новее и предоставляет больше возможностей для разработки более востребованных приложений.

Существует множество интегрированных сред разработки (далее — IDE), созданных для различных языков программирования и операционных систем. Они являются важным инструментом для быстрого и удобного создания мобильных приложений [11]. В таблице 2 приведено сравнение популярных в настоящий момент сред разработки.

Сравнение различных IDE

Критерий	IDE					
	Visual Studio	Eclipse IDE	Appery.io	ShoutEm	Intellij IDEA	Android Studio
Опыт применения	+	+/-	-	-	-	+
Бесплатная версия в свободном доступе	+	+	+/-	-	+/-	+
Поддержка	+	+	-	-	+	+
Поддержка тестирования	+	+	+	-	+	+
Поддержка системы на Android	+	+	+	+	+	+

Из сравнительной таблицы 2, видно, что две IDE, Visual Studio и Android Studio набрали одинаковое количество плюсов, поэтому проведем более детальное их сравнение.

Несколько лет назад выбор IDE был ограничен, однако в настоящее время разработчики могут выбирать из большого количества инструментов, которые не только поддерживают различные языки программирования и фреймворки, но и предоставляют разнообразные инструменты для выполнения задач.

Visual Studio — это редактор, который предпочитает простоту сложности. Большинство функций доступны через строку поиска в верхней части интерфейса.

Android Studio — уже длительное время основной инструмент для создания приложений для Android.

Между этими двумя IDE существует множество функциональных различий. Visual Studio легче, чем Android Studio, поэтому, если вы работаете на устройстве с ограниченными ресурсами, вам может быть удобнее использовать Visual Studio.

Анализ языков программирования и сред разработки показывает, что для создания приложения для конвертирования валюты в криптоактивы, идеальным языком программирования и IDE будут C# и Visual Studio соответственно [9]. Язык программирования C# имеет современные и развивающиеся функции, а широкий спектр библиотек предоставляет возможности для создания качественных приложений.

Следующим шагом в разработке приложения, является разработка алгоритма его функционирования. Алгоритм для приложения по конвертированию валюты в криптоактивы представлен на рисунке 2.

Для использования приложения, которое мы разработали, пользователю необходимо пройти регистрацию и проверку документов. Только после успешной верификации, клиент получает доступ к полному функционалу. Эти меры необходимы для предотвращения мошенничества и кражи средств [2].

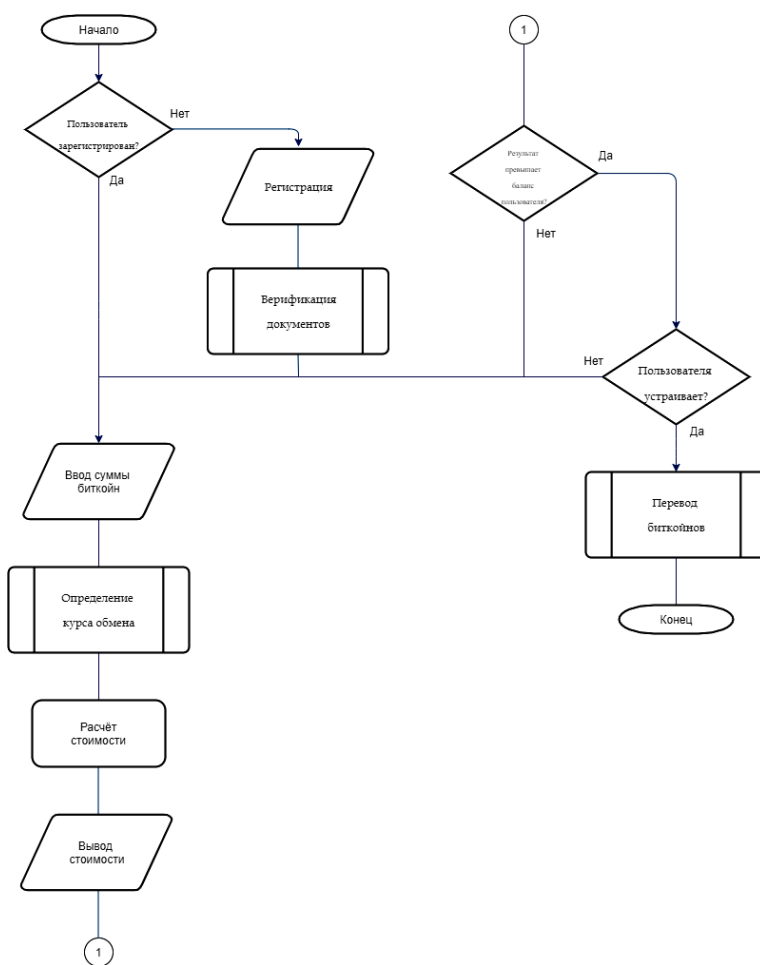


Рис. 2. Алгоритм функционирования разрабатываемого приложения [1]

Согласно разработанному алгоритму, клиент должен ввести необходимую сумму для вывода. Приложение автоматически рассчитывает обменный курс и итоговую цену покупки, отображая результат на экране пользователя [8]. Если у клиента недостаточно средств или цена не подходит по другим причинам, приложение предоставляет возможность повторного ввода суммы средств. Если же цена устраивает клиента, происходит перевод биткоинов.

Список литературы

1. *ГОСТ 19.701-90*. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. М., 2010.
2. *Колдаев В. Д.* Основы алгоритмизации и программирования : учеб. пособие / под ред. Л. Г. Гагариной. М., 2006, 2009.

3. *Кулькин Д. В.* Выбор языка программирования для разработки серверной части веб-приложения // Молодой ученый. 2021. № 41 (383). С. 9—12.
4. *Обмен криптовалют на фиат в 2022 году.* URL: <https://proinvestment.com/sturtocurrency-exchange/> (дата обращения: 01.12.2022).
5. *Аветисянц С.* Основные языки программирования для разработки мобильных приложений. URL <https://appcraft.pro/blog/yazyki-dlya-razrabotki-mobilnykh-prilozhenij/> (дата обращения: 01.12.2022).
6. *Ernst D., Kim L.* Global Production Networks, Knowledge Diffusion, and Local Capability Formation // Research Policy. 2002. Vol. 31, № 8–9. P. 1417—1429.
7. *Блокчейн: Начало.* История появления Самого первого блокчейна. URL: <https://freeton.house/ru/blokchejn-nachalo-istoriya-poyavleniya-samogo-pervogo-blokchejna/> (дата обращения: 08.12.2022).
8. *Блокчейн и его алгоритмы, разбираемся в реализации.* URL: <https://zen.yandex.ru/media/vishmat/blokchein-i-ego-algoritmy-razbiraemsia-v-realizacii-6058bde5c8a51571e851ec66> (дата обращения: 09.12.2022).
9. *Обзор механизмов управления в блокчейнах.* URL: <https://vc.ru/u/642470-teimur-muslim/221198-obzor-mehanizmov-upravleniya-v-blokcheynah> (дата обращения: 10.12.2022).
10. *Стрембицкая С. Б., Бабаян С. Г.* Криптовалюта в секторе финансовых услуг: новые возможности на примере блокчейна // European Scientific Conference : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. 2017. С. 146—148.
11. *Чугуева И. С., Плис К. С.* Перспективы развития технологии блокчейн в России // Неделя науки СПбПУ : материалы науч. конф. с междунар. участием. 2016. С. 116—118.
12. *Блокчейн: уровень и перспективы развития.* URL: <https://bitnovosti.com/2017/03/18/blockchain-state-of-the-art-and-prospective/comment-page-1/> (дата обращения: 11.12.2022).
13. *Бутерин В. Д.* О публичных и частных блокчейнах. URL: <http://coinlab.com/vitalik-buterin-o-publichnyh-i-chastnyh-blokcheynah/> (дата обращения: 09.11.2022).
14. *Какие бывают блокчейны и почему важно их различать.* URL: <http://www.coinfox.ru/novosti/obzory/5473-kakie-byvayut-blokcheyny-i-pochemu-vazhno-ikh-razlichat> (дата обращения: 03.12.2022).
15. *Публичный и частный блокчейн — преимущества и недостатки.* URL: <http://e-commerce.com.ua/2017/02/публичный-и-частный-блокчейн-преимущ/> (дата обращения: 05.12.2022).
16. *Сценарии использования закрытых блокчейнов. Мнения экспертов.* URL: <https://bits.media/news/stsenarii-ispolzovaniya-zakrytykh-blokcheynov-mneniya-ekspertov/> (дата обращения: 15.12.2022).
17. *Как использовать блокчейны.* URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Блокчейн \(Blockchain\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Блокчейн (Blockchain)) (дата обращения: 18.11.2022).

Об авторах

Дарья Александровна Казакова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: darya.kazakova.99@list.ru

Инна Владимировна Лищук — канд. пед. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: *ILishchuk@kantiana.ru*

The authors

Daria A. Kazakova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: *darya.kazakova.99@list.ru*

Inna V. Lishchuk, PhD, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: *ILishchuk@kantiana.ru*

А. В. Слепчатов, О. В. Толстель, Т. А. Солдатенко

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАНАЛИЗАЦИОННОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Представлен обзор и анализ импортозамещения системы автоматизации технологического процесса (АСУ ТП) канализационной насосной станции. Приведен подробный анализ существующего оборудования и ПО. Произведен подбор функционально достаточного отечественного контроллера. На основе его модели было определено используемое ПО, построены вспомогательные UML-диаграммы, с их помощью которых написан программный код контроллера. Осуществлено тестирование созданного ПО. Рассмотрена эксплуатирующаяся установка, выявлены недостатки объекта изучения, предложены варианты их устранения, а также подобран контроллер и подготовлена к написанию программа управления. Особое внимание уделяется таким аспектам, как неполадки в работе насосов, неэффективное использование энергии, недостаточная надежность и безопасность системы. Также изучены возможные варианты устранения выявленных недостатков. Производится анализ существующих решений на отечественном рынке. Рассматривается возможность импортозамещения, то есть замены импортных компонентов и технологий на отечественные аналоги с целью снижения зависимости от импорта. Анализируются различные параметры и характеристики контроллеров, а также их соответствие требованиям и особенностям системы. Изложена подготовка к написанию программы управления для обновленной системы АСУ ТП канализационной насосной станции. Рассматриваются основные этапы разработки программного обеспечения, необходимые технические и функциональные требования, а также возможные подходы к реализации и интеграции системы управления. В результате разработан проект АСУ ТП КНС, базирующийся на отечественном контроллере ОВЕН и доступном ПО CODESYS.

This article presents an overview and analysis of the process of import substitution of the process automation system (APCS) of a sewage pumping station. The relevance of the topic under study is due to the recent increasing demand for import substitution. The purpose of the study is the transfer of a previously implemented process control system project to a domestic controller and available automation software. The methodology of the work consisted in a detailed analysis of existing equipment and software, the selection of a functionally sufficient domestic controller, on the basis of its model, the definition of the software used, the construction of auxiliary UML diagrams, writing the controller program code with their help, testing the created software. The operating installation is considered, shortcomings of the object of study are identified, options for their elimination are proposed, and a controller is selected and a control program is prepared for writing. Particular attention is paid to such

aspects as malfunctioning pumps, inefficient use of energy, insufficient reliability and safety of the system. Possible options for eliminating the identified shortcomings are also considered. The analysis of existing solutions in the domestic market is carried out. The possibility of import substitution is being considered, that is, the replacement of imported components and technologies with domestic counterparts in order to reduce dependence on imports. Various parameters and characteristics of controllers are considered, as well as their compliance with the requirements and features of the system. The final part of the article is devoted to preparations for writing a control program for an updated process control system for a sewage pumping station. The main stages of software development, the necessary technical and functional requirements, as well as possible approaches to the implementation and integration of the control system are considered. As a result of the work done, all the tasks set were solved and the goal formulated at the beginning of the article was achieved — a project for the APCS of the KNS was developed, based on the domestic Aries controller and the available CODESYS software.

Ключевые слова: канализационная насосная станция, автоматизация, частотный преобразователь, программируемый логический контроллер, модернизация, импортозамещение

Keywords: pumping station, automation, frequency converter, programmable logic controller, modernization, import substitution

Статья посвящена рассмотрению процесса автоматизации канализационной насосной станции (далее — КНС), являющейся вспомогательной системой одной из промышленных тепловых электростанций (далее — ТЭС) Калининградской области [1]. Современные ТЭС стремятся к повышению эффективности работы и оптимизации производственных процессов. Одно из важных направлений для достижения этих целей — внедрение автоматизированных систем управления на станциях, включая их КНС.

Автоматизация в системе управления насосными станциями дает ряд преимуществ, таких как:

1. Повышение производительности и эффективности работы электростанции. Автоматизация позволяет оптимизировать процессы управления насосными станциями, ускоряя и упрощая их работу.

2. Снижение операционных расходов. Автоматизированные системы могут эффективно контролировать и регулировать работу насосов, минимизируя излишние затраты энергии и ресурсов.

3. Улучшение качества производства. Автоматизация позволяет точно контролировать параметры работы насосных станций, что способствует повышению качества производимой электроэнергии и снижению вероятности возникновения сбоев или аварий.

4. Усиление безопасности и снижение рисков. Автоматизированные системы предоставляют возможность удаленного контроля и мониторинга работы насосных станций, что помогает предотвратить возможные опасные ситуации и обеспечить безопасность персонала.

5. Оптимизация обслуживания и ремонта. Автоматизация позволяет производить диагностику и обнаружение неисправностей насосных станций, что упрощает планирование и проведение регулярного технического обслуживания и ремонта.

Внедрение автоматизированных систем управления насосными станциями на тепловых электростанциях помогает достичь более эффективной и надежной работы, сократить издержки и повысить общую производительность электростанции.

Целью данной работы является импортозамещение — создание нового проекта АСУ ТП КНС (основанного на ранее созданном проекте с иностранными комплектующими и ПО) с использованием отечественного контроллера и доступного ПО, поскольку ранее установленное оборудование в случае выхода из строя не сможет быть заменено на идентичное, а ПО перестанет обновляться. Также должны быть внесены доработки в уже функционирующую установку, чтобы повысить ее эффективность и устойчивость к возможным сбоям.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- изучить существующую систему АСУ ТП канализационной насосной станции, выявить ее недостатки и проблемы;

- провести анализ российских аналогов систем АСУ ТП и выбрать наиболее подходящий вариант;

- разработать требования к программному обеспечению нового программируемого логического контроллера;

- разработать алгоритмы управления канализационной насосной станцией;

- написать и отладить программное обеспечение для нового программируемого логического контроллера;

- протестировать и наладить новую систему управления на канализационной насосной станции.

- оценить эффективность новой системы управления;

- внести доработки в уже функционирующую установку, внедрить новый программируемый логический контроллер и перейти на новую систему управления.

Канализационная насосная станция представляет собой комплексное оборудование, предназначенное для перекачивания сточных вод из различных источников.

Процесс работы установки может быть описан следующим образом:

1. Сток поступает в колодец, где расположены датчики уровня. Они контролируют уровень сточных вод и определяют момент запуска насосов.

2. Когда уровень сточных вод достигает заданной отметки, насосы включаются автоматически и начинают перекачивать сток. В данной установке используется 3 насоса, которые работают поочередно, чтобы равномерно распределить нагрузку и продлить срок их службы.

3. При достижении верхнего датчика уровня включается аварийная индикация и информация об этом передается во внешнюю SCADA-систему.

Таким образом, технологический процесс работы канализационной насосной станции включает в себя автоматическое управление перекачкой сточных вод, контроль уровня воды и местную индикацию, а также передачу информации во внешнюю систему управления.

По результатам проведенного измерения пускового тока (рис. 1) было выявлено, что одним из недостатков текущей канализационной насосной станции является использование слишком мощных насосов и неправильно подобранных пускателей. Это приводит к избыточному потреблению электроэнергии, а также к ухудшению качества работы оборудования и снижению его срока службы.



Рис. 1. Измерение пускового тока

Для решения этой проблемы в рамках работы в систему добавлены новые приборы — частотные преобразователи, которые позволят регулировать мощность насосов в зависимости от объема канализационной воды. Это не только снизит потребление электроэнергии, но и улучшит качество работы установки, снизит нагрузку на ее элементы, а также продлит срок службы.

Исследование показало, что перегорание контактов пускателя является серьезной проблемой, которая приводит к остановкам в работе насосной станции и требует вмешательства ремонтного персонала. Эта поломка возникает из-за неправильно выбранного пускового оборудования, что приводит к повышенному трению контактов и их перегреву. Это вызывает не только потери времени на регулярную очистку контактов, но также повышает риск повреждения оборудования и уменьшает надежность работы насосной станции.

Одним из факторов, увеличивающих простой насосной станции, является время, затрачиваемое на передвижение ремонтного персонала до объекта.

Ниже, на рисунках 2 и 3, можно увидеть принципиальную схему ПЛК текущей установки [2] вместе со всеми входными и выходными дискретными выходами [3].

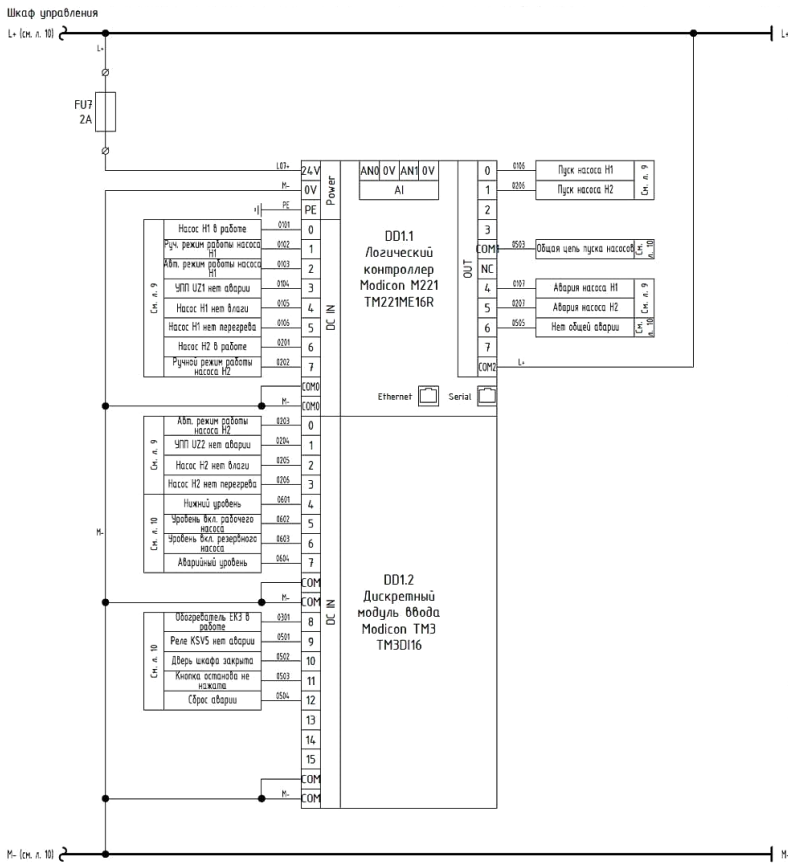


Рис. 2. Принципиальная схема контроллера

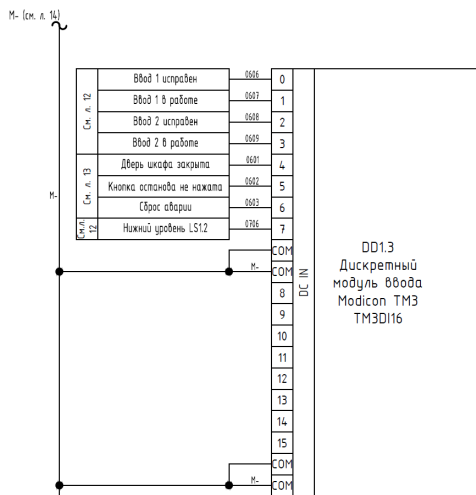


Рис. 3. Принципиальная схема модуля расширения

В соответствии с рабочей документацией получен следующий перечень оборудования, которое отражено в таблицах 1 и 2:

- 3 датчика уровня воды;
- 3 насоса;
- 3 датчика влажности, встроенных в насосы;
- 3 датчика контроля температуры, встроенные в насосы.

Таблица 1

Дискретные входные сигналы канализационной насосной станции

№	Количество	Примечание
1	3	Индикация пуска работы насоса
2	9	Контроль исправности насосов
3	6	Датчики уровня
4	2	Сигналы от кнопок
5	1	Датчик закрытия дверцы шкафа
6	3	Ручной режим работы насоса
7	3	Автоматический режим работы насоса
8	1	Обогреватель работает
9	4	Контроль состояния питания
<i>Всего</i>	32	Входные сигналы

Таблица 2

Дискретные выходные сигналы канализационной насосной станции

№	Количество	Примечание
1	3	Управление насосом
2	3	Оповещение об аварии насоса
3	1	Нет общей аварии
<i>Всего</i>	7	Выходные сигналы

В ходе анализа объекта была составлена диаграмма развертывания для визуализации физической связи между всеми узлами объекта и более полного представления системы. Она представлена на рисунке 4.

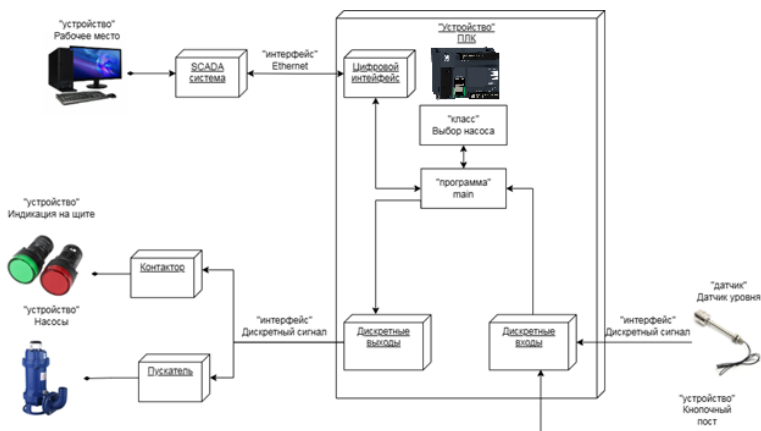


Рис. 4. Диаграмма развертывания

Для разрабатываемого проекта в рамках текущего исследования были выбраны частотные преобразователи производства Follin. Одной из причин выбора стало то, что они уже были закуплены для других проектов на производстве, а значит, они одобрены для закупок. Также опыт работы с этой моделью частотного преобразователя будет накоплен в ходе реализации на других проектах, что позволяет снизить риски возможных проблем в процессе работы насосной станции.

Были проведены измерения пускового тока для подбора необходимых характеристик частотного преобразователя, как показано на рисунке 5.



Рис. 5. Ток в установившемся режиме

В соответствии с техническими параметрами насоса подходит частотный преобразователь с заказным номером BD600-055G/075P-4, технические характеристики которого представлены ниже [4].

Технические характеристики серии BD600:

- заказной номер: BD600-055G/075P-4;
- вход: ЗРН 380V+ – 15 % 47Hz~63Hz;
- мощность: 55/75 кВт;
- входной ток: 113/157 А;
- выходной ток: 110/150 А;
- размеры (Ш × В × Г): 280 × 582 × 295.

Для успешного импортозамещения контроллера в системе необходимо вначале провести детальное изучение текущего ПЛК, включая его характеристики и функциональность, а также рассмотреть установленные модули расширения. Изначально в проекте используется контроллер Modicon M221 TM221ME16, который является основным контроллером системы.

ПЛК — это специализированный контроллер, используемый в промышленной автоматизации для управления различными процессами и системами и контроля над ними. ПЛК представляет собой компактное электронное устройство, оснащенное процессором, входами и выходами для подключения к внешним устройствам, таким как датчики, исполнительные механизмы и другие устройства.

Контроллер Modicon M221 TM221ME16 является компактным и мощным устройством, предназначенным для автоматизации различных процессов. Ему характерна высокая производительность и гибкость в настройке, что позволяет эффективно управлять насосной станцией. Контроллер оснащен различными портами и интерфейсами, обеспечивающими возможность взаимодействия с другими устройствами и системами.

Контроллер Modicon M221 TM221ME16 обладает следующими техническими характеристиками:

1. Количество входов и выходов:
 - встроенные дискретные входы: 16 (24 В постоянного тока);
 - встроенные дискретные выходы: 8 (транзисторные, 24 В постоянного тока);
 - расширяемость ввода-вывода: поддержка модулей расширения Modicon TM3 для дополнительных дискретных и аналоговых входов и выходов.
2. Коммуникационные возможности:
 - порты связи: 1 порт Ethernet, 1 порт USB (Mini-B), 1 порт серийной связи RS485;
 - поддержка протоколов связи: Modbus TCP, Modbus RTU, SNMP, FTP.
3. Питание и электрические характеристики:
 - питание: 24 В постоянного тока;
 - потребляемая мощность: 10 Вт (макс.).
4. Программное обеспечение:
 - поддерживаемая среда разработки: CODESYS [5].

Дискретный модуль Modicon TM3 TM3DI16 — это модуль цифрового ввода. Он является частью линейки модулей расширения ввода-вывода Modicon TM3 для контроллеров Modicon. Он имеет одну съемную винтовую клеммную колодку и может быть установлен на симметричную DIN-рейку диаметром 35 мм. Этот цифровой модуль ввода-вывода дополняет встроенные логические контроллеры ввода-вывода Modicon M221, M221 Book, M241 и M251. Также он оснащен съемной пружинной клеммой для электрического подключения с регулировкой шага входов на 3,81 мм. Его размеры составляют 23,6 мм (ширина) × 70 мм (глубина) × 90 мм (высота). Он весит 0,105 кг. Этот продукт сертифицирован CE и соответствует стандартам EN/IEC 61131-2, EN/IEC 61010-2-201. Разъем расширения шины используется для распределения данных и источника питания при сборке модулей Modicon TM3 с логическими контроллерами [6].

Ниже перечислены технические характеристики двух дискретных модулей ввода Modicon TM3:

- количество входов: 16 дискретных входов;
- тип входов: дискретные, с изолированным земляным соединением;
- напряжение питания: 24 В постоянного тока;
- диапазон входного напряжения: 24 В постоянного тока;
- ток входа: 7 мА при 24 В постоянного тока;
- задержка сигнала: 4 мс (макс.);
- количество используемых слотов: 2;

— клеммная колодка: винтовая клеммная колодка;

— класс защиты: IP20.

На российском рынке представлена линейка ПЛК от «ОВЕН».

ОВЕН ПЛК110[M02] — линейка программируемых моноблочных контроллеров с дискретными входами и выходами на борту для автоматизации средних систем.

Контроллер ОВЕН ПЛК110-60[M02] обладает следующими техническими характеристиками:

1. Количество входов и выходов:

— встроенные дискретные входы: 36 (4 быстродействующих);

— встроенные дискретные выходы: 24.

2. Коммуникационные возможности:

— порты связи: 2x RS-485, RS-232, RS-232-Debug, Ethernet 100 Base-T.

3. Питание и электрические характеристики:

— питание: 24 В постоянного тока;

— потребляемая мощность: 10 Вт (макс.).

4. Программное обеспечение:

— поддерживаемая среда разработки: CODESYS V2.3 [7].

Так как данный контроллер имеет большое количество дискретных входов и выходов, дополнительные модули вывода и ввода ему не потребуются, что сократит расходы для предприятия.

Следующим важным этапом для подготовки написания программного обеспечения явилось создание UML-диаграмм.

UML (Unified Modeling Language) — это язык, используемый для определения, представления, проектирования и документирования различных типов систем, включая программные, организационно-экономические, технические и другие системы. UML предоставляет стандартный набор диаграмм и нотаций для представления различных аспектов систем.

В ходе выполнения работы были составлены UML-диаграммы для проектирования программного обеспечения. Они позволяют лучше понять взаимодействие между компонентами системы, спецификацию интерфейсов, логику работы системы и другие аспекты ее проектирования.

Эти диаграммы могут быть использованы при написании программного обеспечения для автоматизации КНС. Они являются инструментом для более эффективного проектирования и разработки ПО автоматизации, снижают количество ошибок, которые могут возникнуть в процессе разработки.

Важно отметить, что использование UML-диаграмм — это стандартный подход в инженерии программного обеспечения, и знание этого инструмента является важной компетенцией для разработчиков. Создание этих диаграмм позволит более точно определить требования к системе, ее структуру и взаимодействие компонентов, что в конечном итоге повысит качество и эффективность разработки.

В рамках исследования объекта были составлены следующие UML-диаграммы:

— диаграмма вариантов использования (рис. 6);

— диаграмма классов (рис. 7);

— диаграмма развертывания (рис. 4).

Диаграммы вариантов использования служат для отображения взаимодействия между вариантами использования и актерами, отражая функциональные требования системы с точки зрения пользователей. Главная цель создания таких диаграмм — документирование функциональных требований в самом общем виде, поэтому они должны быть максимально простыми.

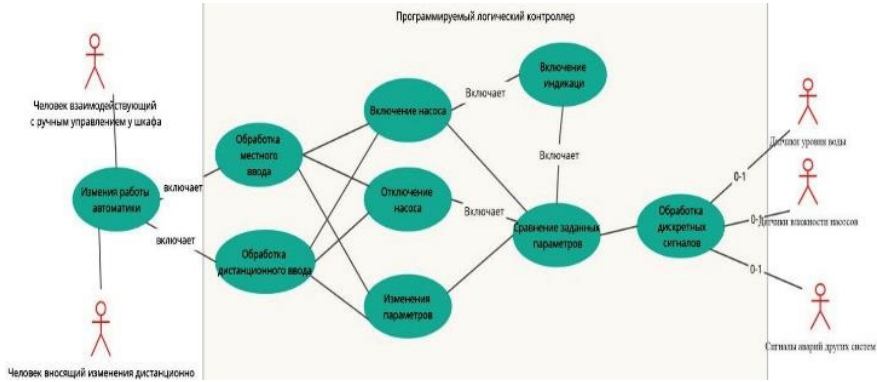


Рис. 6. Диаграмма вариантов использования для программы управления ПЛК

Диаграмма классов используется для визуализации статической структуры системы в терминах классов, характерных для объектно-ориентированного программирования. Хотя в CODESYS 2 отсутствует ООП, данная диаграмма пригодится при использовании CODESYS 3. Она выглядит как граф, где узлы представляют классификаторы (классы) и связи между ними определяют различные типы структурных отношений.

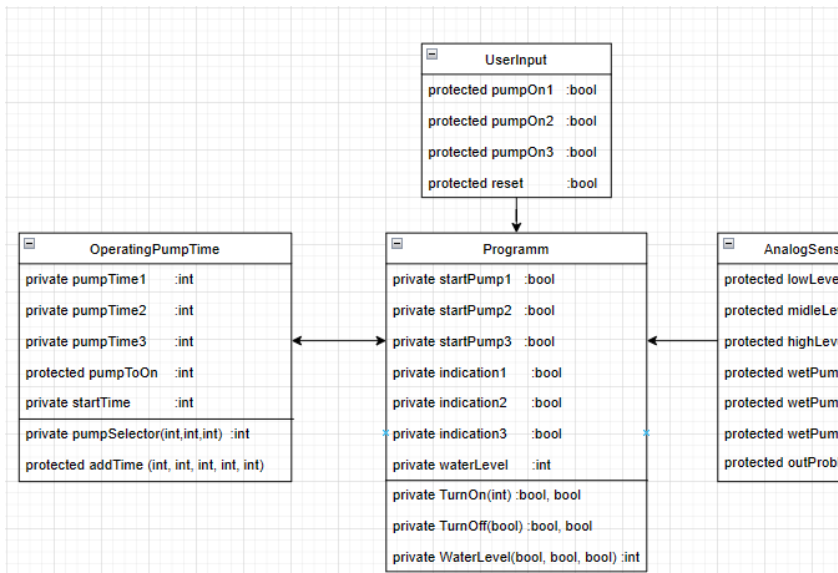


Рис. 7. Диаграмма классов для программы управления ПЛК

Программа управления разрабатывается для контроллера ОВЕН ПЛК110-60[M02], поэтому для начала был установлен таргет-файл для CODESYS взятый с официального сайта производителя контроллера [8].

Файл целевой платформы, или таргет-файл, является важной составной частью каждого проекта CODESYS. Он содержит информацию о ресурсах конкретного контроллера, обеспечивает его взаимодействие со средой программирования и позволяет использовать дополнительные функциональные возможности. Каждая модель контроллера ОВЕН имеет свой собственный таргет-файл, который должен быть установлен перед началом разработки проекта в CODESYS. Это необходимо для правильной настройки среды программирования и обеспечения совместимости с выбранным контроллером, чтобы разработчик мог эффективно работать с ним и использовать доступные функции для своего проекта [9].

После установки таргет-файла были введены все названия переменных дискретных входов и выходов для дальнейшего их использования в программе. Это можно увидеть на рисунке 8.

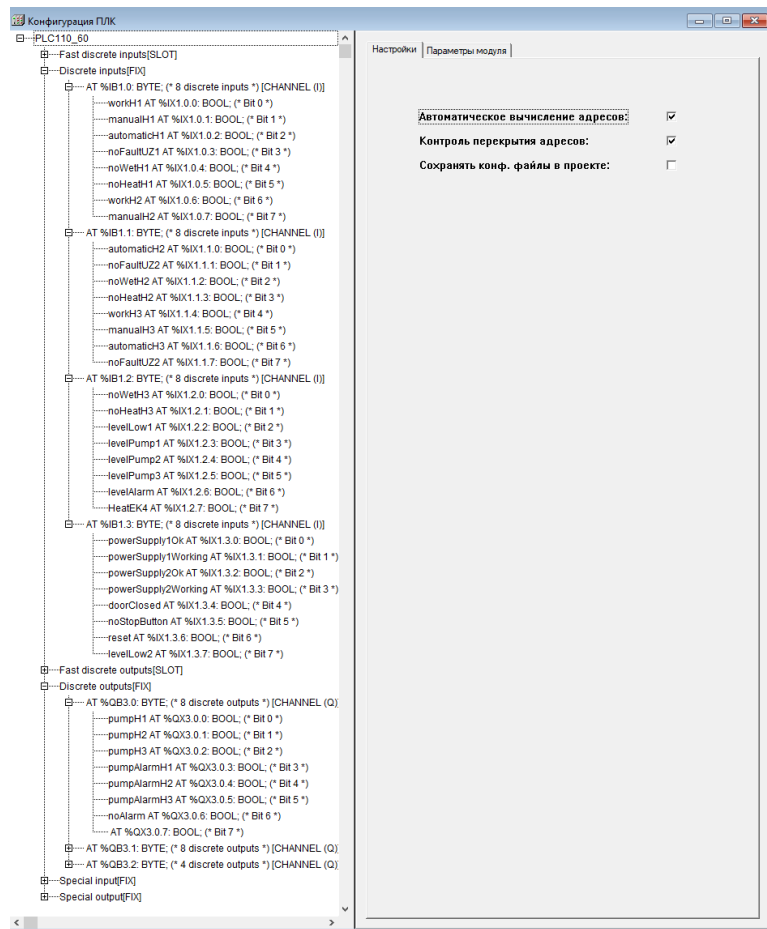


Рис. 8. Конфигурация ПЛК

Structured Text — текстовый язык программирования, он будет использоваться для написания программы управления.

Существует расширенный стандарт IEC 61131-3 [10], который вносит элементы объектно-ориентированного программирования путем расширения возможностей функциональных блоков. Эти расширения включают наследование, свойства, методы и интерфейсы. Кроме того, расширенный стандарт предусматривает введение новых типов данных, таких как указатели, объединения, строки с двумя байтами на символ, ссылки и др. [11].

Выводы

В результате проделанной работы решены все поставленные задачи и достигнута цель, сформулированная в начале статьи — разработан проект АСУ ТП КНС, базирующийся на отечественном контроллере OWEN и доступном ПО CODESYS.

Список литературы

1. *Прегольская ТЭС* Калининградской области. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Прегольская_ТЭС (дата обращения: 01.09.2023).
2. *Громаков Е. И.* Проектирование автоматизированных систем. Курсовое проектирование : учеб.-метод. пособие. Томск, 2009.
3. *ГОСТ 21.208-2013.* Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. Межгосударственный стандарт. Система проектной документации для строительства. Введ. 01.11.2014. М., 2013.
4. *Преобразователь частоты BD600.* URL: <http://techpribor-kaliningrad.ru/preobrazovatel-chastoty-seriya-bd600.html> (дата обращения: 01.09.2023).
5. *Логические контроллеры Modicon M221* : каталог. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/schneider-electric/24865> (дата обращения: 01.09.2023).
6. *Discrete input module, Modicon TM3, 16 inputs (screw) 24.* URL: <https://www.se.com/ww/en/product/TM3DI16/discrete-input-module-modicon-tm3-16-inputs-screw-24-vdc/> (дата обращения: 25.04.2023).
7. *Руководство по эксплуатации ПЛК110(M02).* URL: https://docs.owen.ru/product/plk110_m02/542/47191#topic-47191 (дата обращения: 25.04.2023)
8. *Сервисное ПО.* URL: https://owen.ru/product/codesys_v2/libraries (дата обращения: 25.04.2023).
9. *Руководство пользователя CODESYS V3.5.* Описание таргет-файлов. URL: https://ftp.owen.ru/CoDeSys3/11_Documentation/03_3.5.11.5/CDSv3.5_Targets_v2.2.pdf (дата обращения: 25.04.2023).
10. *IEC 61131-3.* URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEC_61131-3 (дата обращения: 27.10.2022).
11. *Structured Text.* URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Structured_Text (дата обращения: 27.10.2022).

Об авторах

Александр Владимирович Слепчатов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: 19slepchatov99@gmail.com

Олег Владимирович Толстель — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: tolstel.oleg@mail.ru

Татьяна Алексеевна Солдатенко — ассистент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: an_tanushka@mail.ru

The authors

Aleksandr V. Slepchatov, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: 19slepchatov99@gmail.com

Dr Oleg V. Tolstel', Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: tolstel.oleg@mail.ru

Tatiana Alekseevna Soldatenko, assistant, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: an_tanushka@mail.ru

А. В. Асташенок, А. С. Тепляков

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ ЦАЛЛИСА

Рассмотрены различные космологические модели Вселенной, заполненной голографической темной энергией Цаллиса. В качестве характерного масштаба выбран горизонт событий L_e , а плотность энергии предполагается пропорциональной $\sim L_e^{2\gamma-4}$, где γ — параметр неаддитивности. Исследована космологическая эволюция такой Вселенной на бране Рэндалл-Сандрума и из данных наблюдений определено ограничение на натяжение на бране. Далее проанализирована модель голографической темной энергии при наличии взаимодействия между темной энергией и материей, особое внимание обращено на возможность фантомизации и устранения сингулярностей будущего. Показано, что взаимодействие может изменять отношение плотности темной энергии к плотности материи. В некоторых случаях Вселенная эволюционирует по квазидеситтеровскому закону в будущем, однако при этом доля темной энергией стремится к $\Omega_{de} < 1$. Наконец, рассмотрена динамика Вселенной с голографической темной энергией на фоне модифицированной гравитации Ножири — Одинова. Подробно рассмотрена космологическая эволюция для случая, когда текущая динамика Вселенной совпадает с таковой в стандартной космологической модели. При некоторых значениях параметров скорость расширения Вселенной «осциллирует» вблизи зависимости, характерной для модели в эйнштейновской гравитации.

Various cosmological models of the Universe filled with the holographic dark energy of Tsallis are considered. The event horizon L_e is chosen as a characteristic scale, and the energy density is assumed to be proportional to $\sim L_e^{2\gamma-4}$ where γ is the nonadditivity parameter. The cosmological evolution of such a Universe on the Randall-Sandrum brane is investigated, and a constraint on the tension on the brane is determined from observational data. Further, the model of holographic dark energy is analyzed in the presence of interaction between dark energy and matter, special attention is paid to the possibility of phantomization and elimination of future singularities. It is shown that the interaction can change the ratio of the density of dark energy to the density of matter. In some cases, the Universe evolves according to the quasi-de Sitter law in the future, however, in this case, the fraction of dark energy tends to $\Omega_{de} < 1$. Finally, we consider the dynamics of the Universe with holographic dark energy against the background of modified Nozhiri-Odintsov gravity. The cosmological evolution is considered in detail for the case when the current dynamics of the Universe coincides with that in the

standard cosmological model. For some values of the parameters, the expansion rate of the Universe «oscillates» near the dependence characteristic of the model in Einsteinian gravity.

Ключевые слова: космология, темная энергия, голографическая энергия, модифицированная гравитация

Keywords: cosmology, dark energy, holographic energy, modified gravity

Введение

С момента открытия космологического ускорения в 1998 г. [1; 2] объяснение этого факта стало одной из самых интересных задач для теоретической физики и космологии. Обычно полагают, что существует так называемая темная энергия с отрицательным значением параметра состояния $w = p/\rho$. Согласно наиболее простому предположению темная энергия — это космологическая постоянная Эйнштейна или энергия вакуума ($w = -1$), а ее плотность составляет 70 % от общей плотности энергии во Вселенной [3—9].

Предполагается, что окончательное решение проблемы темной энергии будет достигнуто в рамках еще не созданной теории квантовой гравитации. Интересный подход к проблеме связан с голографическим принципом, согласно которому все физические величины внутри Вселенной, включая плотность темной энергии, могут быть описаны некоторыми величинами на границе пространства-времени [10—12]. В наиболее простом случае плотность темной энергии можно выразить через планковскую массу M_p и некоторый характерный масштаб длины L , а именно:

$$P_{de} = 3C^2 M_p L^{-2}. \quad (1)$$

В качестве L может выступать, например, размер горизонта событий или горизонта частиц:

$$L_e = a(t) \left(\int_t^\infty \frac{dt'}{a(t')} \right), \quad L_p = a(t) \left(\int_0^t \frac{dt'}{a(t')} \right). \quad (2)$$

Различные аспекты голографической темной энергии исследованы во многих статьях (см.: [13—22] и ссылки в данных источниках). Как показано, модели с хаббловским горизонтом не подходят для описания космологической эволюции нашей Вселенной. Основное направление исследований заключается в использовании размера горизонта событий в качестве масштаба ИК-«отсечки». Интересно отметить, что голографический принцип можно применить и к ранней Вселенной [23] с получением сценария инфляции. Космологический отскок в голографической модели был рассмотрен в [24].

В 1988 г. К. Цаллис предложил обобщенное выражение для энтропии черной дыры S_{BH} [25]:

$$S_{BH} = \mu A^\gamma. \quad (3)$$

Здесь μ — неизвестная константа, γ — так называемый параметр неаддитивности, а A — площадь горизонта черной дыры. Очевидно, что известное выражение для энтропии Бекенштейна

$$S_{BH} = A/4$$

следует из уравнения (3), если положить $\gamma = 1$ и $\mu = 1/4$. Если предположить справедливость такого подхода для темной энергии, то ее плотность можно записать как [26]:

$$\rho_{de} = 3C^2 L^{2\gamma-4}. \quad (4)$$

Модель голографической темной энергии Цаллиса для вселенной Фридмана была недавно предложена для описания ускоренного расширения Вселенной [27]. Авторы рассмотрели обобщение голографической модели темной энергии Цаллиса [28].

В статье мы рассмотрим некоторые аспекты обобщенной модели голографической темной энергии на фоне дополнительных предположений о геометрии пространства-времени, взаимодействии темной энергии с материей и уравнениях гравитации. В следующем разделе представлена модель голографической темной энергии на бране Рэндалл — Сандрума. Показано, что такая модель может быть согласована с данными астрофизических наблюдений при различных значениях параметров неаддитивности и натяжения на бране. Далее мы исследуем модель темной энергии, которая взаимодействует с материей. В таких моделях, как оказалось, возможно пересечение фантомной линии ($w = -1$) и устранение финальной сингулярности большого разрыва благодаря взаимодействию. В заключительной части мы рассматриваем космологическую эволюцию Вселенной в модифицированной гравитации Ножири — Одинцова при наличии голографической темной энергии Цаллиса.

Модель голографической темной энергии на бране

Согласно модели Рэндалл — Сандрума, наша 4-мерная Вселенная (брана) расположена в 5-мерном пространстве-времени [29; 30]. Все поля Стандартной модели, кроме гравитации, локализованы на бране. Действие гравитационного поля может проявляться в дополнительном измерении. Космологические уравнения на бране меняют свой вид по сравнению со стандартной космологией Фридмана:

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \rho \left(1 + \frac{\rho}{2\lambda} \right), \quad (5)$$

где ρ — плотность энергии, a — масштабный фактор, λ — натяжение браны. Здесь и далее используется естественная система единиц ($8\pi G/3 = c = 1$). Зависимость плотности энергии ρ от масштабного фактора можно получить из уравнения:

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0, H = \frac{\dot{a}}{a}. \quad (6)$$

В космологии на бране размер горизонта событий стремится к $L_e \rightarrow L_0 \neq 0$ при $t \rightarrow \infty$. Поэтому плотность голографической энергии стремится к постоянному значению, и мы имеем фактически эффективную модель Λ CDM.

Рассмотрим голографическую модель темной энергии Цаллиса на бране Рэндалл — Сандрума для различных значений γ . Пусть $1 < \gamma < 2$. Сравним результаты со случаем «обычной» голографической темной энергии, для которой $\gamma = 1$. Использование наблюдательных данных позволяет оценить верхний предел на значение $\rho_0/2\lambda$. В качестве анализируемых данных взята зависимость между видимой звездной величиной и красным смещением для далеких сверхновых типа Ia, совокупность значений параметра Хаббла для некоторых красных смещений и данные по барионному акустическому параметру. В широком диапазоне параметров эти данные описываются с удовлетворительной точностью, но лишь взятые по отдельности. Для относительно малых натяжений на бране нет таких значений параметров модели, при которых можно удовлетворить все данные наблюдений. Наконец, мы рассмотрели модель, в которой помимо классического голографического вклада в $\sim L_e^{-2}$ темную энергию появляется член H^2 .

Для простоты положим, что пространственно плоская Вселенная заполнена только холодным веществом и темной энергией (вклад излучения и других компонентов считаем пренебрежимо малым), то есть

$$p = p_{de} + p_m.$$

Для плотности темной энергии примем выражение (4) с $L = L_e$. Исследуем данную космологическую модель для некоторых значений отношения между текущей плотностью энергии ρ_0 и натяжением браны $\delta = \rho_0/2\lambda$. Выразим плотность ρ_0 через параметр Хаббла H_0 :

$$\rho_0 = H_0^2 (1 + \delta)^{-1}.$$

Можно ввести безразмерные единицы для параметра Хаббла, плотности и натяжения на бране:

$$H \rightarrow H_0 H, \rho \rightarrow \rho_0 \lambda \rightarrow \lambda H_0^2.$$

Тогда первое уравнение Фридмана на бране можно переписать в безразмерном виде:

$$H^2 = (1 + \delta)^{-1} (\rho_{de} + \rho_m) (1 + \delta (\rho_{de} + \rho_m)). \quad (7)$$

Здесь тильды опущены. В качестве переменных параметров рассматриваются $\Omega_{de} = \rho_{de}/\rho_0$ и константа C . Доля плотности вещества равна, очевидно, $1 - \Omega_{de}$, а безразмерная плотность вещества может быть записана как

$$\rho_m = \frac{1 - \Omega_{de}}{a^3}.$$

Для текущего момента времени можно положить $a(0) = 1$ без ограничения общности. Дифференцирование по времени L_e/a дает уравнение

$$\frac{d(L_e/a)}{dt} = -\frac{1}{a(t)}. \quad (8)$$

Уравнения (7), (8) образуют систему дифференциальных уравнений первого порядка относительно $a(t)$ и $L_e(t)/a(t)$. Для начального условия $L_e(0)$ необходимо определить такое значение, при котором безразмерная плотность темной энергии равна Ω_{de} , поэтому

$$L_e(0) = \left(\frac{C^2}{\Omega_{de}} \right)^{\frac{1}{4-2\gamma}}.$$

Приемлемые модели должны с хорошей точностью описывать астрофизические данные. Для оценки правдоподобия космологической модели используется стандартный статистический подход с вычислением критерия χ^2 и определением допустимых диапазонов параметров модели. В наше рассмотрение включены следующие данные астрофизических наблюдений:

1. Зависимость между звездной величиной и красным смещением для сверхновых типа Ia. Теоретическое значение видимой звездной величины μ_t для звезды с красным смещением z можно рассчитать по формуле:

$$\mu_{th} = 5 \log \left[\frac{d_L(z)}{M_{pc}} \right] + 25. \quad (9)$$

Фотометрическое расстояние d_L для пространственно плоской Вселенной равно

$$d_L = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}. \quad (10)$$

Здесь $E(z) = H(z)/H_0$ — безразмерный параметр Хаббла. Для χ_{SN}^2 имеем простое выражение:

$$\chi_{SN}^2 = \sum_i \frac{(\mu_{obs}(z_i) - \mu_t(z_i))^2}{\sigma_i^2}. \quad (11)$$

Здесь σ_i — значение среднеквадратичной ошибки для этого измерения. Мы используем данные о 580 сверхновых типа Ia, приведенные в [31]. Параметр μ_0 не зависит от данных наблюдений, следовательно, надо произвести усреднение по возможным значениям μ_0 . Но минимизация по параметру μ_0 может быть произведена путем разложения χ_{SN}^2 в ряд по μ_0 :

$$\chi_{SN}^2 = A - 2\mu_0 B + \mu_0^2 C. \quad (12)$$

Здесь

$$A = \sum_i \frac{(\mu_{obs}(z_i) - \mu_{th}(z_i; \mu_0 = 0))^2}{\sigma_i^2}, \quad B = \sum_i \frac{(\mu_{obs}(z_i) - \mu_{th}(z_i))}{\sigma_i^2}, \quad C = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}.$$

Значение параметра хи-квадрат в (12) имеет минимум при $\mu_0 = B/C$, равный

$$\chi_{SN}^2 = A - B^2/C.$$

Можно искать минимум χ_{SN}^2 вместо χ_{SN}^2 .

2. Барийные акустические осцилляции (далее — БАО). Важное значение для описания БАО имеет так называемый акустический параметр $A(z)$. Теоретическое значение $A(z)$ определяется выражением

$$A_t(z) = \frac{D_v(z) H_0 \sqrt{\Omega_{mo}}}{z}, \quad (13)$$

где $D_v(z)$ — параметр длины, определяемый соотношением

$$D_v(z) = \left\{ (1+z)^2 d_A^2(z) \frac{cz}{H(z)} \right\}^{1/3}. \quad (14)$$

Здесь $d_A(z)$ — расстояние по угловому диаметру:

$$d_A(z) = \frac{y(z)}{H_0(1+z)}, \quad y(z) = \int_0^z \frac{dz}{E(z)}. \quad (15)$$

Параметр $A_t(z)$ можно выразить через безразмерные величины:

$$A_t(z) = \sqrt{\Omega_{mo}} \left(\frac{y^2(z)}{z^2 E(z)} \right). \quad (16)$$

Значение χ_A^2 вычисляется следующим образом:

$$\chi_A^2 = \Delta A^T (C_A)^{-1} \Delta A, \quad (17)$$

где ΔA — вектор с компонентами $\Delta A_i = A_t(z) - A_{obs}(z_i)$, $(C_A)^{-1}$ — матрица, обратная к ковариационной матрице 3×3 , элементы которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наблюдаемые значения акустического параметра для различных красных смещений

z	$A(z)$	σ
0,44	0,474	0,034
0,60	0,442	0,020
0,73	0,424	0,021

Составлено на основе данных: [32].

3. Значения параметра Хаббла для некоторых значений красных смещений по данным наблюдений.

Эволюция параметра Хаббла в настоящее время достаточно хорошо изучена. Его можно определить из соотношения

$$dt = -\frac{1}{H} \frac{dz}{1+z}. \quad (18)$$

Определение dz/dt позволяет измерить $H(z)$. Эти измерения возможны благодаря данным о возрасте галактик, определенным по моделям звездного населения. Теоретическая зависимость параметра Хаббла от красного смещения может быть определена как

$$H(z) = H_0 E(z), \quad E(z) = (\rho(z)/\rho_0)^{1/2}. \quad (19)$$

Для браны Рэндалл — Сандрума необходимо изменить это выражение:

$$H(z) = H_0 E(z)(1 + \delta E(z))^{1/2} (1 + \delta)^{-1/2}. \quad (20)$$

Значение χ_H^2 равно

$$\chi_H^2 = \sum_i \frac{(H_{obs}(z_i) - H_t(z_i))^2}{\sigma_i^2}. \quad (21)$$

Необходимо выполнить усреднение по возможным значениям текущего значения постоянной Хаббла H_0 . Как и в случае вычисления χ_{SN}^2 , имеем

$$\chi_H^2 = A_1 - 2B_1 H_0 + H_0^2 C_1, \\ A_1 = \sum_i \frac{H_{obs}(z_i)^2}{\sigma_i^2}, \quad B_1 = \sum_i \frac{E(z_i) H_{obs}(z_i)}{\sigma_i^2}, \quad C_1 = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}$$

Величина χ_H^2 имеет минимум при

$$H_0^2 = B_1 / C_1, \\ \chi_H^2 = A_1 - B_1^2 / C_1.$$

Как и в случае анализа данных по свехновым звездам, можно искать минимум χ_H^2 вместо χ_{SN}^2 .

Значения $H(z)$ для некоторых z взяты из [33] и представлены в таблице 2.

Мы определили допустимые доверительные интервалы для значений параметров C и Ω_{de} (68 % — 1δ и 95 % — 2δ) при некоторых фиксированных значениях δ и γ ($\gamma \neq 2$). Для двухпараметрических моделей 1δ и 2δ интервалы соответствует χ^2 , для которого $\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi_{min}^2 < 2,3 \cdot \Delta\chi^2 < 6,17$ соответственно. Результаты наших расчетов для некоторого δ и $\gamma = 1,5$ приведены на рисунке 1. Для $\gamma = 1,5$ и $1,75$ была получена аналогичная картина.

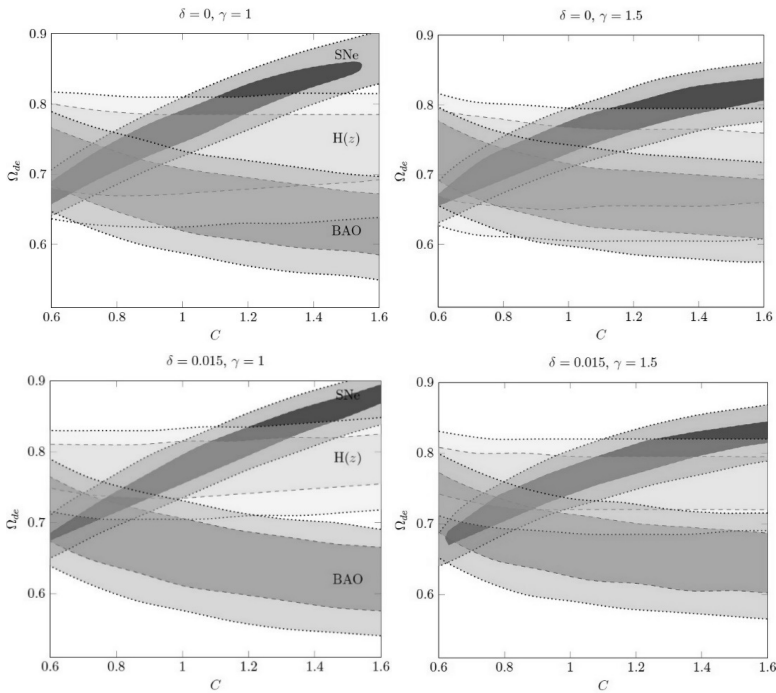


Рис. 1. 1σ (штриховые линии) и 2σ (пунктирные линии) доверительные области на плоскости $C - \Omega_{de}$ для модели голографической темной энергии (4) в космологии Фридмана ($\delta = 0$) и для браны Рэндалл-Сандрума ($\delta = 0,015$)

Отметим, что при $\delta \sim 0,02$ доверительные области для трех типов рассматриваемых данных не пересекаются между собой. Поэтому можно считать, что $\delta < 0,2$. Анализ показывает, что это ограничение практически не зависит от значения γ .

Таблица 2

Зависимость параметра Хаббла H (км/с/Мпк) от красного смещения z

z	$H(z)$	σ_H	z	$H(z)$	σ_H
0,070	69	19,6	0,270	77	14
0,090	69	12	0,280	88,8	36,6
0,120	68,6	26,2	0,350	76,3	5,6
0,170	83	8	0,352	83	14
0,179	75	4	0,400	95	17
0,199	75	5	0,440	82,6	7,8
0,200	72,9	29,6	0,480	97	62
0,593	104	13	0,900	117	23
0,600	87,9	6,1	1,037	154	20
0,680	92	8	1,300	168	17
0,730	97,3	7	1,430	177	18
0,781	105	12	1,530	140	14
0,875	125	17	1,750	202	40
0,880	90	40	2,300	224	8

Модель голографической темной энергии Цаллиса, взаимодействующей с материей

Представляет интерес рассмотрение возможного взаимодействия между материей и голографической темной энергией. Если темная энергия и вещество взаимодействуют друг с другом, уравнения неразрывности для соответствующих компонент принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_m + 2H\rho_m &= Q, \\ \dot{\rho}_{de} + 3H(\rho_{de} + p_{de}) &= -Q. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь в правых частях уравнений появляется некоторая функция Q , которая в общем случае может зависеть от времени и плотностей компонент. Полная плотность энергии $\rho = \rho_{de} + \rho_m$ удовлетворяет обычному уравнению неразрывности. Численно решая космологические уравнения, можно выразить плотность вещества ρ_m и получить выражение для давления темной энергии p_{de} :

$$p_{de} = -\frac{\dot{\rho}_{de}}{3H} - \rho_{de} - \frac{Q}{3H}. \quad (24)$$

Параметр уравнения состояния темной энергии равен

$$w_{de} = \frac{p_{de}}{\rho_{de}} = -\frac{\dot{\rho}_{de}}{3H\rho_{de}} - 1 - \frac{Q}{3H\rho_{de}}. \quad (25)$$

Мы также проанализируем эволюцию долей плотности материи и темной энергии Ω_m и Ω_{de} в будущем:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{3H^2}. \quad (26)$$

Рассмотрим опять случай голографической темной энергии с $L = L_e$ и примем для Q простое выражение вида

$$Q = 3d^2H\rho_{de}, \quad d = \text{const}. \quad (27)$$

В расчетах примем $\Omega_{de} = 0,7$ в качестве начального значения. Численные расчеты показывают, что при некоторых значениях γ , C^2 и константы взаимодействия d^2 параметр $w_{de} = -1$ может проходить через -1 (фантомизация).

Известно, что при $C = 1$, $\gamma = 1$ и отсутствии взаимодействия материи с темной энергией расширение Вселенной происходит по закону де Ситтера на больших временах. Тот же сценарий имеет место и для $\gamma < 1$, но после некоторого переходного периода происходит фантомизация, значение параметра состояния становится минимальным, а затем увеличивается и стремится к -1 снизу. При $\gamma > 1$ параметр Хаббла приближается к 0 при $t \rightarrow \infty$ и расширение асимптотически останавливается.

При тех же значениях C $\gamma > 1$, но при $d^2 > 0$ значение параметра состояния w_{de} может пересекать фантомную линию $w_{de} = -1$ (рис. 2). Значение минимума зависит от d^2 . После минимума значение w_{de} возрастает, а параметр Хаббла стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$. Для некоторого d^2 фантомная

разделительная линия $w = -1$ может снова пересечься. Параметр Хаббла $H \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, поэтому имеем фантомную энергию без ускоренного расширения.

Космологическая эволюция для $\gamma = 1$ и $\gamma < 1$ аналогична. Параметр состояния w_{de} стремится к $w_0 < -1$ (при $\gamma = 1$ эта асимптотика достигается быстрее), но дальнейшая эволюция не содержит особенностей, которые можно было бы ожидать для фантомной энергии. Параметр Хаббла стремится к постоянному значению, то есть расширение Вселенной происходит в квазидеситтеровском режиме.

Увеличение d^2 приводит к уменьшению минимального значения w_{de} и асимптотических значений w_0 при $\gamma \leq 1$.

Далее рассмотрим случай $C < 1$. При $\gamma = 1$ космологическая эволюция Вселенной такая же, как и в случае фантомного поля с постоянным параметром уравнения состояния, и в будущем возникает сингулярность Большого разрыва. При $\gamma < 1$ Вселенная асимптотически расширяется по закону де Ситтера. Для $\gamma > 1$ возможны два варианта. Если $1 < \gamma < \gamma_0$, где γ_0 — некоторый предел для данного C , то значение w_{de} проходит через -1 и стремится к $-\infty$. Вселенная заканчивает свое существование в сингулярности Большого разрыва. Для $\gamma > \gamma_0$ в будущем снова имеем квазидеситтеровское расширение.

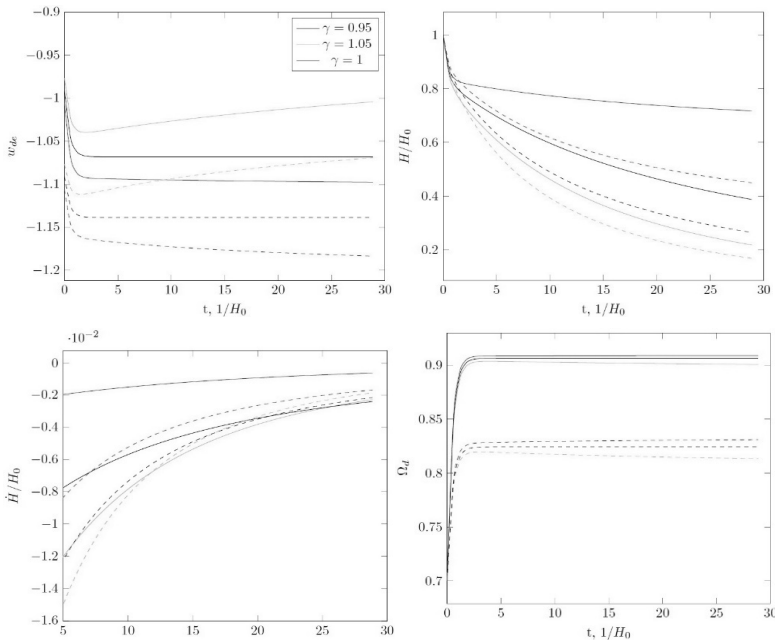


Рис. 2. Эффективный параметр состояния для голографической темной энергии w_{de} , параметр Хаббла H и производная параметра Хаббла \dot{H} и доля темной энергии Ω_{de} для $C = 1$, $d^2 = 0,1$ (сплошные линии) и $d^2 = 0,2$ (штриховые линии). Для $\gamma = 1,05$ и $d^2 = 0,1$ значение w_{de} дважды пересекает фантомную линию $w = -1$. Асимптотические значения w_{de} при $\gamma = 1$ и $\gamma = 0,95$ меньше -1 , но сингулярностей в будущем нет и Вселенная расширяется по закону де Ситтера при $t \rightarrow \infty$. Время указано в единицах $1/H_0$

Взаимодействие приводит к появлению тех же особенностей, что и при $C = 1$ (рис. 3). Асимптотическое значение параметра состояния при $\gamma = 1$ больше по сравнению со случаем без взаимодействия. Однако в будущем возникает сингулярность Большого разрыва. При $\gamma < 1$ взаимодействие приводит к асимптотическому расширению де Ситтера с $\dot{H} \rightarrow 0$ на больших временах, но с $w_{de} < -1$. Аналогичная ситуация возникает и для $\gamma > 1$, хотя $w_{de} \rightarrow \infty$.

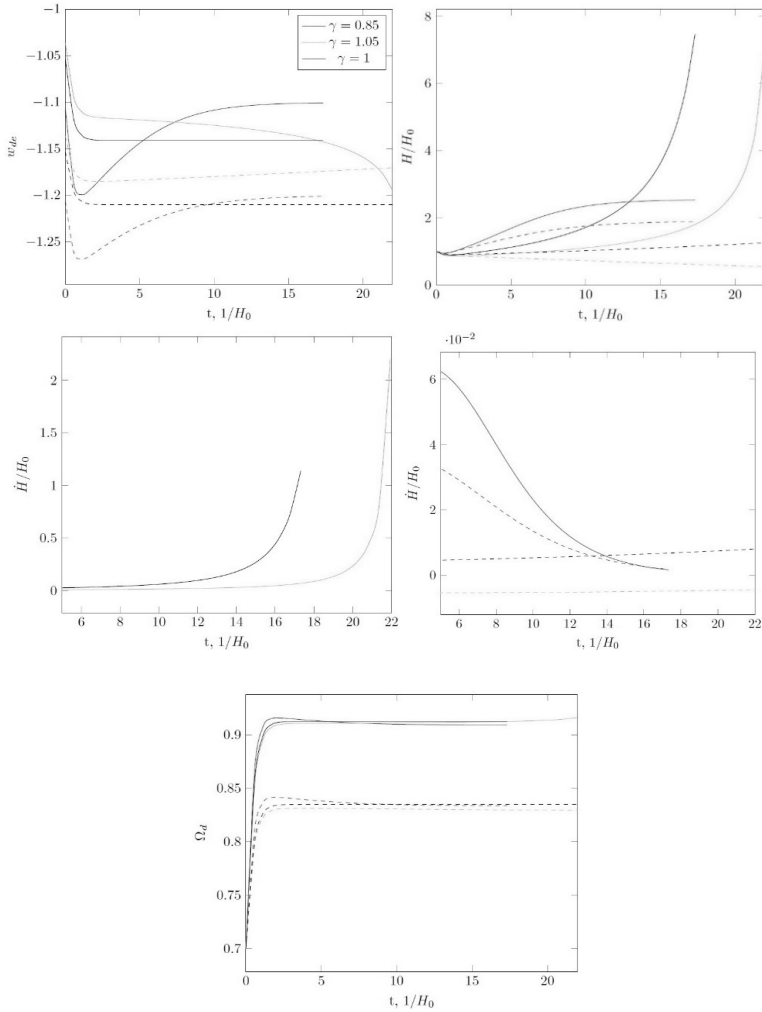


Рис. 3. Эффективный параметр состояния для голографической темной энергии w_{de} , параметр Хаббла H и производная параметра Хаббла \dot{H} и доля темной энергии Ω_{de} для $C = 0,9$, $d^2 = 0,1$ (сплошные линии) и $d^2 = 0,2$ (штриховые линии). Для $\gamma = 1,05$ при $d^2 = 0,2$ нет большой разрывной особенности, которая имеет место при $d^2 = 0,1$ и без взаимодействия

Увеличение d^2 устраняет сингулярность большого разрыва для $\gamma > 1$, но не для $\gamma = 1$. Дальнейший анализ показывает, что существует критическое значение d^2 , при превышении которого сингулярность Большого

разрыва не возникает при $\gamma > 1$, а производная параметра Хаббла стремится к 0 при $t \rightarrow \infty$. При $d^2 < d_{crit}^2$ значение параметра Хаббла сначала уменьшается, а затем начинает расти.

Наконец, обратимся к случаю $C > 1$. Без взаимодействия при $\gamma = 1$ параметр состояния асимптотически стремится к значению, большему -1 . При $\gamma > 1$ значение параметра состояния достигает минимума $w_{min} > -1$ и затем начинает расти. При $\gamma < 1$ существуют две возможности, а именно: значение w_{de} медленно уменьшается, стремясь к -1 при $t \rightarrow \infty$ или после минимума $w_{de} \rightarrow -1$ снизу. Параметр Хаббла со временем уменьшается, сингулярностей в будущем нет. Только при $\gamma < 1$ возможно асимптотическое расширение по деситтеровскому закону.

Взаимодействие при $\gamma = 1$ приводит к тому, что асимптотическое значение параметра w_{de} на больших периодах может быть меньше -1 , но параметр Хаббла уменьшается, медленно стремясь к нулю. Интересно отметить, что при $\gamma > 1$ может происходить двойное пересечение фантомной разделительной линии. Параметр Хаббла уменьшается и $H \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Модель голографической темной энергии в модифицированной гравитации Ножири — Одинцова

В заключение рассмотрим космологическую эволюцию Вселенной, заполненной голографической темной энергией Цаллиса, в модифицированной гравитации. Для $f(R)$ -гравитации действие для гравитационного поля записывается в следующем виде:

$$S_g = \frac{1}{2} \int f(R) \sqrt{-g} d^4x, \quad (28)$$

где $f(R)$ — это дважды дифференцируемая функция скалярной кривизны R . Для пространственно плоской метрики ФЛРУ космологические уравнения, получающиеся варьированием действия, запишутся так:

$$H^2 = \frac{1}{3f'(R)} \left(\rho + \frac{Rf'(R) - f(R)}{2} - 3H\dot{R}f''(R) \right), \quad (29)$$

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0. \quad (30)$$

Скалярная кривизна для рассматриваемой метрики выражается следующим образом:

$$R = 6(\dot{H} + 2H^2). \quad (31)$$

Для иллюстрации рассмотрим гравитационную модель, полученную путем объединения моделей, предложенных Старобинским и Кэрроллом, Дувури, Тродденом и Тёрнером (CDTT) [34; 35], которые впервые были изучены в [36] (см. также [37]):

$$f(R) = R + \lambda R^2 - \sigma \frac{\mu}{R}, \quad (32)$$

где λ и μ — положительные константы и $\sigma = \pm 1$. При $\mu = 0$ получаем обычную модель Старобинского. Ниже мы будем называть эту модель гравитацией Ножири — Одинцова.

Для удобства перейдем к переменной z вместо переменной времени:

$$z = a_0/a - 1.$$

Для времен в прошлом z , очевидно, имеет смысл красного смещения. Производная по времени d/dt связана с производной d/dz следующим соотношением:

$$\frac{d}{dt} = -H(z+1)\frac{d}{dz}. \quad (33)$$

Первая и вторая производные функции $f(R)$ по аргументу равны

$$f'(R) = 1 + 2\lambda R + \sigma \frac{\mu}{R^2}, f''(R) = 2\lambda - \sigma \frac{2\mu}{R^3}. \quad (34)$$

Подставляя выражения (32), (34) в уравнение (29) и переходя к переменной z , получаем уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 H}{dz^2} = & -\frac{f'(R)}{6H(z+1)^2 f''(R)} + \frac{1}{18H^3(z+1)^2 f''(R)} \left(\rho + \frac{Rf'(R) - f(R)}{2} \right) + \\ & + \frac{1}{H(z+1)} \left(\left(\frac{dH}{dz} \right)^2 (z+1) - 3H \frac{dH}{dz} \right). \end{aligned}$$

Для интегрирования уравнений, описывающих космологическую эволюцию в модифицированной гравитации, необходимо задать не только начальный масштабный фактор и параметр Хаббла (уравнения Эйнштейна-Фридмана имеют второй порядок по производным a), но и вторую производную масштабного фактор a по времени при $t=0$. Это эквивалентно начальному условию, наложенному на \dot{H} при $t=0$. В приведенном ниже анализе (для $\lambda \neq 0$) мы предполагаем, что $\ddot{a}(0)$ имеет то же значение, что и в модели Λ CDM с $\Omega_{\Lambda} = 0,72$, которое определяется из уравнения для \dot{H} в космологии Фридмана:

$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + p).$$

В качестве начального условия для плотности можно взять значения $\rho(0) = \rho_d(0) + \rho_m(0) + 3H_0^2$. Учитывая, что $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$ и $p_m = 0$, мы получаем для $\Omega_\Lambda = 0,72$, что $\dot{H}(0) = -0,42H_0^2$. В терминах переменной z это условие означает, что $dH/dz = 0,42H_0$ при $z=0$. При $\lambda = \mu = 0$ $\dot{H}(0)$ определяется параметрами C и Ω_Λ . Если $\gamma = 1$, то текущий параметр уравнения состояния $w = p_{de}/\rho_{de}$ равен

$$w = -\frac{1}{3} - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{\Omega_{de}}}{C},$$

и поэтому

$$\dot{H}(0) = -\frac{1}{2} \left(1 - \Omega_{de} + \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\sqrt{\Omega_{de}}}{C} \right) \Omega_{de} \right)$$

и немного отличается от значения $-0,42H_0^2$ в космологии Λ CDM. Разберем случай, когда в выражении (32) $\mu = 0$. При $\lambda \neq 0$ значение параметра Хаббла H в будущем начинает осциллировать вокруг той зависимости, которая наблюдается для голографической модели темной энергии в ОТО. Амплитуда этих колебаний увеличивается со временем и становится тем больше, чем больше величина λ . Примечателен также анализ производной по времени параметра Хаббла \dot{H} . В ОТО \dot{H} стремится к постоянному значению, что соответствует тому, что $\dot{H} \rightarrow 0$, а производная стремится к нулю снизу. А при $\lambda \neq 0$ функция $\frac{dH}{dt}$ колеблется вокруг нуля на больших временах. Такие же осцилляции в будущем наблюдаются для скалярной кривизны R . В прошлом космологическая эволюция при $\lambda \neq 0$ также отличается от таковой в ОТО: параметр Хаббла и $|\dot{H}|$ со временем возрастают не так сильно. Интересно отметить, что соотношение между H^2 и \dot{H} меняется так, что величина скалярной кривизны колеблется около нуля в прошлом для модифицированной гравитации. В случае космологии Фридмана R сильно возрастает и стремится к ∞ , что соответствует сингулярности Большого взрыва.

Если $\mu > 0$, то полученные зависимости мало отличаются от случая $\mu = 0$. При $\mu = 10^{-3}$ амплитуда колебаний H становится меньше по сравнению с R^2 -гравитацией. Основная особенность заключается в том, что в будущем появляются особенности, соответствующие нулю второй производной f'' . При $\sigma = -1$ амплитуда колебаний параметра Хаббла, наоборот, увеличивается. При увеличении значения μ амплитуда колебаний параметра Хаббла уменьшается при $\sigma = +1$ и увеличивается при $\sigma = -1$.

Анализ показывает, что эти модели могут быть согласованы с данными наблюдений. Мы сравнили Λ CDM-модель и голографическую модель темной энергии с $\lambda \neq 0$ и $\mu \neq 0$, используя данные наблюдений по сверхновым типа Ia и зависимости $H(z)$. Анализ модели голографической темной энергии Цаллиса в гравитации Ножири — Одинцова показывает некоторые интересные моменты. Во-первых, данные наблюдений говорят в пользу значения $\gamma = 1$ (каноническая модель голографической темной энергии). Во-вторых, данные по зависимости $H(z)$ лучше описываются моделью с голографической темной энергией по сравнению с моделью Λ CDM. Например, если $\lambda = 10^{-3}$, $\mu = 10^{-3}$, $\sigma = 1$, то мы имеем следующие оптимальные значения H_0 и минимальные значения χ^2_H для различных $\dot{H}(0)$:

$$17,097 (H_0 = 67,89 \text{ км/с/Мпс}) \text{ при } \Omega_{de} = 0,717, \dot{H}(0) = -0,21H_0^2;$$

$$16,955 (H_0 = 67,84 \text{ км/с/Мпс}) \text{ при } \Omega_{de} = 0,713, \dot{H}(0) = -0,42H_0^2;$$

$$16,799 (H_0 = 67,13 \text{ км/с/Мпс}) \text{ при } \Omega_{de} = 0,705, \dot{H}(0) = -0,84H_0^2.$$

Но для этих параметров данные по сверхновым Ia описываются хуже: при заданном $\dot{H}(0)$ существует значительное расхождение между оптимальным значением Ω из двух наборов данных. Однако для некоторых Ω и $\dot{H}(0)$ мы получили, что данные по сверхновым и параметру Хаббла в целом аппроксимируются с той же точностью, что и для модели Λ CDM. В частности, для $\dot{H}(0) = -0,84H_0^2$ имеем, что минимальное зна-

чение $\chi_{SN}^2 + \chi_H^2$ равно 572,6723 для $\Omega_{de} = 0,745$. Это соответствует модели Λ CDM с $\Omega_{\Lambda} = 0,732$. Поэтому можно сделать вывод, что модель голографической темной энергии Цаллиса в рамках гравитации Ножири — Одинцова можно рассматривать как вполне реалистичную модель космологического ускорения.

Выводы

Исследована модель голографической темной энергии Цаллиса на бране Рэндалла — Сандрума в сравнении с космологией Фридмана и моделью Λ CDM. Предполагается, что плотность темной энергии $\sim L_e^{2\gamma-4}$. Используя данные наблюдений, такие, как зависимость «звездная величина — красное смещение» для сверхновых типа Ia, зависимость параметра Хаббла $H(z)$, значения акустического параметра на некоторых красных смещениях, можно найти допустимые области для параметров моделей (Ω_{de} и C). Из анализа наблюдательных данных мы получили ограничение на отношение между текущей плотностью энергии во Вселенной и натяжением браны. Этот предел слабо зависит от γ .

Также была рассмотрена модель темной энергии Цаллиса в предположении, что присутствует взаимодействие между темной энергией и материей. Взаимодействие в некоторых случаях резко меняет поведение отношения ρ_{de}/ρ_m . Для случая $C = 1$ и подходящего d^2 мы имеем квазиде-ситтеровскую эволюцию в будущем, но доля темной энергии стремится к $\Omega_{de} < 1$. Более того, этот предел может быть близок к текущему значению и поэтому нет ничего удивительного в том, что $\rho_{de}/\rho_m \sim O(1)$. Таким образом решается известная проблема «совпадений». Только в прошлом $\rho_m > \rho_{de}$. Даже для сценария с сингулярностью Большого разрыва в будущем взаимодействие может привести к тому, что для большей части космологической эволюции $\rho_{de}/\rho_m \sim O(1)$ ($d^2 = 0,2$). Та же картина повторяется и для имитирующей квинтэссенцию голографической темной энергии со взаимодействием при $C > 1$.

В заключение мы изучили голографическую модель темной энергии Цаллиса на фоне модифицированной гравитации Ножири — Одинцова. Уравнения, описывающие космологическую эволюцию в этом случае, содержат третью производную масштабного фактора по времени. Поэтому для их решения необходимо наложить начальное условие на вторую производную a (эквивалентное условию на $\dot{H}(0)$). Подробно изучена эволюция Вселенной для случая, когда $\dot{H}(0)$ совпадает со значением в стандартной космологической модели с $\Omega_{\Lambda} = 0,72$. Решения имеют интересную особенность, а именно параметр Хаббла «осциллирует» вблизи зависимости, характерной для модели в ОТО (рис. 4). Амплитуда этих колебаний растет со временем в будущем. При $\mu \neq 0$ возникает сингулярность, соответствующая нулю второй производной $f(R)$ (рис. 5). Наш анализ показал, что такие модели могут с достаточной точностью описывать данные наблюдений, особенно при $\gamma = 1$ и больших значениях \dot{H} по сравнению с Λ CDM-космологией. Также следует отметить, что данные зависимости $H(z)$ лучше описываются в модели с голографической темной энергией на модифицированном гравитационном фоне.

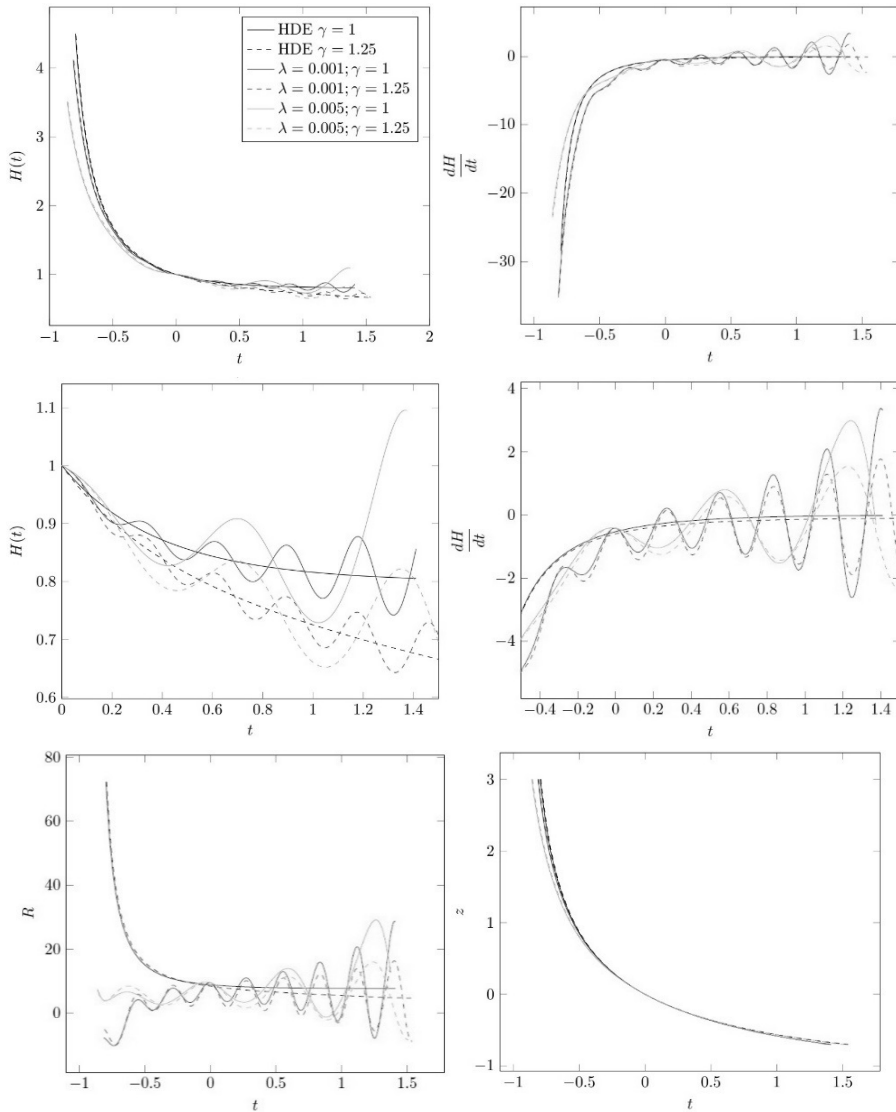


Рис. 4. Зависимость параметра Хаббла H и производной параметра Хаббла \dot{H} от времени в прошлом и будущем (верхняя панель) для $\mu = 0$, $C = 1$ и $\Omega = 0,72$. Параметр Хаббла измеряется в единицах H_0 , а время — в единицах $1/H_0$. Таким образом, производная от H дается в единицах H_0^2 . В средней части зависимости H и \dot{H} даны для меньшего интервала времени для наглядности. В нижней части показаны зависимость скалярной кривизны R от времени и связь между параметром $z = 1/a - 1$ и временем (справа)

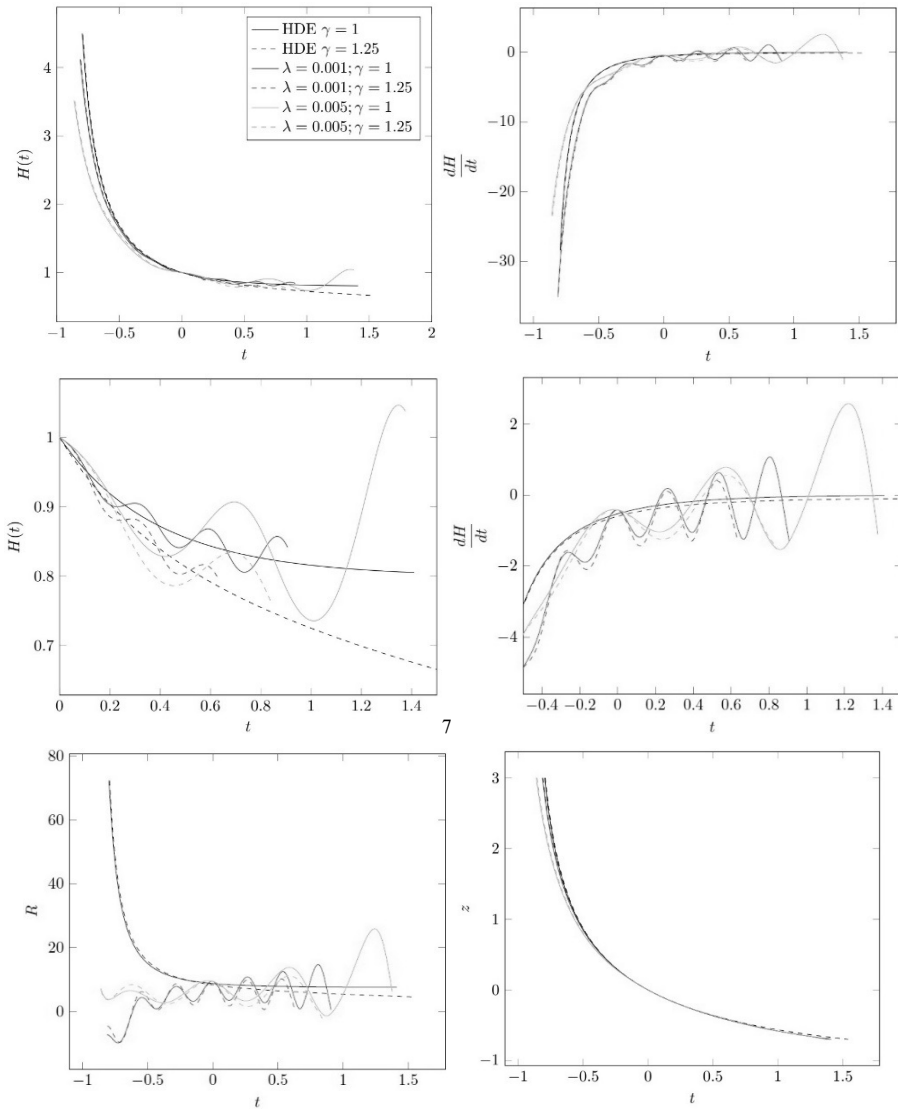


Рис. 5. Зависимость параметра Хаббла H и производной параметра Хаббла \dot{H} от времени в прошлом и будущем (верхняя панель) для $\mu = 0,001$, $C = 1$, $\Omega = 0,72$, $\sigma = 1$.

Из полученных результатов можно заключить, что модель голографической темной энергии Цаллиса выглядит весьма перспективной для объяснения загадки темной энергии и может приводить к довольно интересным эффектам в космологической эволюции.

Работа А. С. Теплякова поддержана в рамках государственной программы «Приоритет-2030», реализуемой в Балтийском федеральном университете им. И. Канта.

Список литературы

1. *Observational* evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant / A. G. Riess, A. Filippenko, P. Challis [et al.] // *Astron. J.* 1998. № 116 (1009).
2. Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae / S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber [et al.] // *Astrophys. J.* 1999. № 517 (565).
3. *Peebles P. J. E., Ratra B.* The cosmological constant and dark energy // *Rev. Mod. Phys.* 2003. № 75 (559).
4. *Padmanabhan T.* Cosmological constant: the weight of the vacuum // *Phys. Rep.* 2003. № 380 (235).
5. *Copeland E. J., Sami M., Tsujikawa S.* Dynamics of dark energy // *Int. J. Mod. Phys.* 2006. 15 (1753).
6. *Frieman J., Turner M., Huterer D.* Dark Energy and the Accelerating Universe // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2008. № 46 (385).
7. *Caldwell R. R., Kamionkowski M.* Dark energy // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2009. № 59 (397).
8. *Silvestri A., Trodden M.* Approaches to understanding cosmic acceleration // *Rept. Prog. Phys.* 2009. № 72 (096901).
9. *Li M., Li X.-D., Wang S., Wang Y.* Dark Energy: A Brief Review // *Frontiers of Physics.* 2013. № 8 (828).
10. *Bekenstein J. D.* Black holes and entropy // *Phys. Rev.* 1973. № 7 (2333).
11. *Hawking S. W.* Particle Creation by Black Holes // *Commun. Math. Phys.* 1975. № 43 (199).
12. *'t Hooft G.* Dimensional reduction in quantum gravity. URL: <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9310026> (дата обращения: 01.10.2023).
13. *Cohen A. G., Kaplan D. B., Nelson A. E.* Effective field theory, black holes, and the cosmological constant // *Phys. Rev. Lett.* 1999. № 182 (4971).
14. *Horava P., Minic D.* Probable values of the cosmological constant in a holographic theory // *Phys. Rev. Lett.* 2000. № 185 (1610).
15. *Hsu S. D. H.* Entropy bounds and dark energy // *Phys. Lett.* 2004. № 594 (13).
16. *Li M.* A model of holographic dark energy // *Phys. Lett.* 2004. № 603 (1).
17. *Shen J.-Y., Wang B., Abdalla E., Su R.-K.* Holographic dark energy with varying gravitational constant // *Phys. Lett.* 2005. № 609 (200).
18. *Sheykhi A.* Thermodynamics of interacting holographic dark energy with varying gravitational constant // *Phys. Lett.* 2009. № 680 (113).
19. *Sheykhi A., Bagheri A., Yazdanpanah M. M. et al.* Interacting new agegraphic tachyon model in non-flat universe // *Gen. Rel. Grav.* 2012. № 44 (623).
20. *Wang B., Abdalla E., Atrio-Barandelak F., Pavon D.* Dark Matter and Dark Energy Interactions: Theoretical Challenges, Cosmological Implications and Observational Signatures // *Rep. Prog. Phys.* 2016. № 179 (096901).
21. *Myung Y. S.* Instability of holographic dark energy models // *Phys. Lett.* 2007. № 652 (223).
22. *Wang S. Li M., Li X.-D., Zhang X.* Holographic Dark Energy Models: A Comparison from the Latest Observational Data // *Physics Reports.* 2017. № 696 (1).
23. *Nojiri S., Odintsov S. D., Saridakis E. N.* Holographic inflation // *Phys. Lett.* 2019. № 797 (134829).
24. *Nojiri S., Odintsov S. D., Saridakis E. N.* Holographic bounce // *Nucl. Phys.* 2019. № 949 (114890).

25. *Tsallis C.* Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // *J. Stat. Phys.* 1988. № 152 (479).
26. *Tsallis C., Cirto L. J. L.* Black hole thermodynamical entropy // *Eur. Phys. J.* 2013. № 73 (2487).
27. *Tavayef M., Sheykhi A., Bamba K., Moradpour H.* Tsallis Holographic Dark Energy // *Phys. Lett.* 2018. № 781 (195).
28. *Nojiri S., Odintsov S. D., Faraoni V.* Tsallis and Renyi entropies in modified gravity theories // *Eur. Phys.* 2019. № 79 (242).
29. *Randall L., Sundrum R.* A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension // *Phys. Rev. Lett.* 1999. № 83 (3370).
30. *Randall L., Sundrum R.* An Alternative to Compactification // *Phys. Rev. Lett.* 1999. № 83 (4690).
31. *Amanullah R., Lidman C., Rubin D. et al.* Spectra and Light Curves of Six Type Ia Supernovae at $0.511 < z < 1.12$ and the Union2 Compilation // *Astrophys. J.* 2010. № 716 (712).
32. *Blake C., Kazin E., Beutler F. et al.* The WiggleZ Dark Energy Survey: mapping the distance-redshift relation with baryon acoustic oscillations // *MNRAS.* 2011. № 418 (1707).
33. *Chen Y., Kumar S., Ratra B.* Determining the Hubble constant from Hubble parameter measurements // *Astrophys. J.* 2017. № 835 (86).
34. *Kausar H. R.* Interacting dark energy models in the scenario of varying gravitational constant // *MNRAS.* 2014. № 439 (1536).
35. *Sharif M., Yousaf Z.* Dynamics of interacting dark energy models in the scenario of varying gravitational constant // *Astrophys. Space Sci.* 2014. № 354 (431).
36. *Nojiri S., Odintsov S. D.* Modified gravity with negative and positive powers of the curvature: Unification of the inflation and of the cosmic acceleration // *Phys. Rev.* 2003. № 68 (123512).
37. *Nojiri S., Odintsov S. D.* Singular cosmological evolution using canonical and phantom scalar fields // *Eur. Phys. J.* 2017. № 77 (528).

Об авторах

Артём Валерьевич Асташенок — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: aastashenok@kantiana.ru

Александр Сергеевич Тепляков — аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: atepliakov@kantiana.ru

The authors

Dr Artem V. Astashenok, Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: aastashenok@kantiana.ru

Tepliakov Alexander Sergeevich, Post-graduate student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: atepliakov@kantiana.ru

А. В. Шоть, Т. А. Солдатенко

**ВНЕДРЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА
«1С:PDM УПРАВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫМИ ДАННЫМИ 4 (PLM)»
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ПРЕДПРИЯТИЯ**

СФЕРЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Исследован процесс внедрения программного продукта «1С:PDM Управление инженерными данными 4 (PLM)» на примере предприятия сферы ООО «БЮРО-ЭКСПРЕСС», основная деятельность которого — техническая поддержка печатного документооборота. Были рассмотрены бизнес-процессы организации, инженерно-техническая документация, а также проанализирован жизненный цикл изделия. Основным эффектом от внедрения программного продукта заключается в сокращении затрат предприятия при организации сервисного обслуживания, а именно увеличение количества обслуживаемых единиц техники на одного инженера без расширения штата сотрудников. Сам процесс внедрения был разделен на этапы: установка с запуском и настройкой первичной нормативно-справочной информации, отладка состава изделия, организация управления электронным архивом, технологическая подготовка производства, регулирование управления задачами сотрудников. Были достигнуты следующие результаты: налажен контроль за обновлением и использованием различной документации, организовано описание того, «как изготавливается» изделие с помощью разработки расцеховочных маршрутов изготовления и технологических процессов изделия.

This article examines the process of implementing the software product «1С:PDM Engineering Data Management 4 (PLM)» on the example of a service company limited liability company «BUREAU-EXPRESS», whose main activity is technical support of printed document management. The work considered the business processes of the organization, engineering and technical documentation, and also analyzed the product life cycle. The main effect of the introduction of the software product is to reduce the costs of the enterprise in the organization of maintenance, namely, an increase in the number of serviced units of equipment per engineer, without expanding the staff. The implementation process itself was divided into stages: installation with the launch and configuration of primary regulatory and reference information, debugging of the product composition, organization of electronic archive management, technological preparation of production, regula-

tion of employee task management. As a result of the conducted research **Ключевые слова:** IC, IC:PDM, IC:PLM, управление инженерными данными, управление жизненным циклом изделия.

Ключевые слова: IC, IC:PDM, IC:PLM, управление инженерными данными, управление жизненным циклом изделия

Keywords: IC, IC:PDM, IC:PLM, engineering data management, product lifecycle management

ООО «БЮРО-ЭКСПРЕСС» занимается установкой печатного оборудования в большей части по договорам аренды, которые включают в себя полное сервисное обслуживание с заменой всех запчастей и доставкой расходных материалов. В основном компания работает с оборудованием марок «Triumph-Adler» и «Kyselga», скорость ремонта которых обеспечивается заменой основных блоков и узлов таких как блок фотофиксации изображения, блок проявки изображения, блок переноса заряда, блок термозакрепления изображения. Сами блоки состоят из десятков, а то и сотен мелких комплектующих, деталей, которые имеют разный жизненный цикл.

В период изменения рыночных условий, нарушения логистических цепочек от производителя до конечного потребителя, отказа некоторых поставщиков от сотрудничества с Россией на первое место выходит ремонт и восстановление имеющихся блоков и узлов, а это значит:

- поиск новых поставщиков запчастей;
- увеличение номенклатуры товаров, а следовательно, и складских запасов;
- систематизация данных о продукции с учетом жизненного цикла каждой детали.

Таким образом, на предприятии появилась необходимость более эффективного управления инженерными данными о продукции, чтобы продлить ресурс каждому блоку и узлу печатного оборудования.

Автоматизация процесса производства путем внедрения системы управления инженерными данными становится стандартизированным инструментом для всех предприятий [1]. Это позволит компании организовать наблюдение за процессом производства и даст возможность отслеживать параметры, влияющие на качественные характеристики изделия.

Внедрение программного продукта без изучения бизнес-процессов предприятия не имеет смысла из-за возможного переноса в электронный вид имеющихся неисправленных организационных ошибок. Поэтому первым этапом внедрения стало изучение производственного процесса организации. Пример схемы последовательности действий восстановления работоспособности изделия показано на рисунке 1, схема процесса сборки изделия ГК-3100Х3 показана на рисунке 2. Изображены процессы ремонта изделия, производства, восстановления, порядка действий при выборе очередности, учет складского движения.

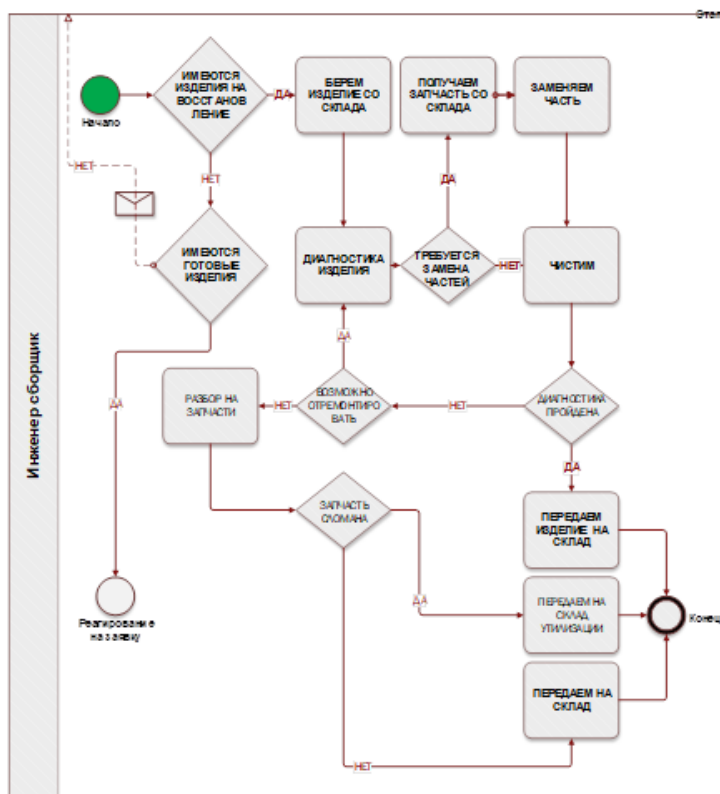


Рис. 1. Схема восстановления изделия



Рис. 2. Схема сборки FK3100X3

Были изменены такие бизнес-процессы, как прием заявки на ремонт копировальной техники, назначение ответственного инженера, задание на изготовление, идентификация, диагностика, заказ комплектующих для ремонта техники, списание неисправной детали. Разработана схема учета эксплуатационных данных: счетчик работы до производства, счетчик работы до поломки. Счетчик — это количество копий на дату действий.

Также были изучены каталоги запчастей для копировальных аппаратов [2]. Пример Kyocera ECOSYS FS4100DN представлен ниже (рис. 3).

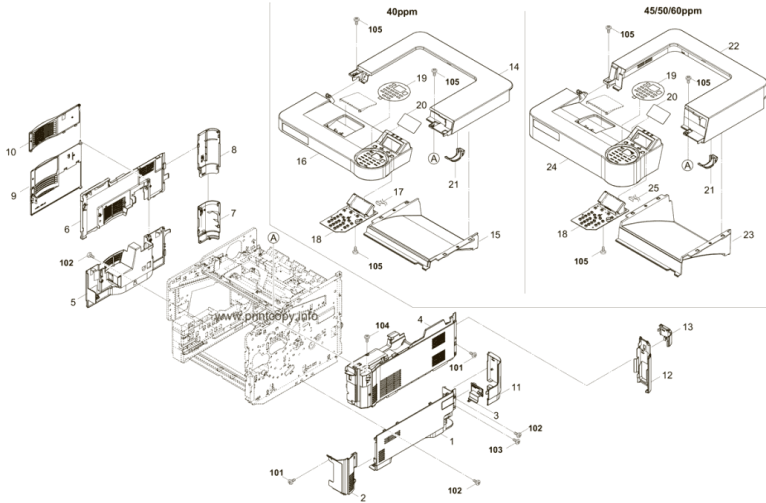


Рис. 3. Секция доступ к узлам FS4100

Следующим этапом идет работа по установке конфигурации «1С:PDM 4 (PLM) на сервере компании. Для этого произведено добавление списка пользователей в системе, выполнена настройка основных объектов, внесена базовая нормативно-справочная информация, в программу заведены виды изделий в соответствии с ГОСТ 2.101-2016 ЕСКД [3] (рис. 4).

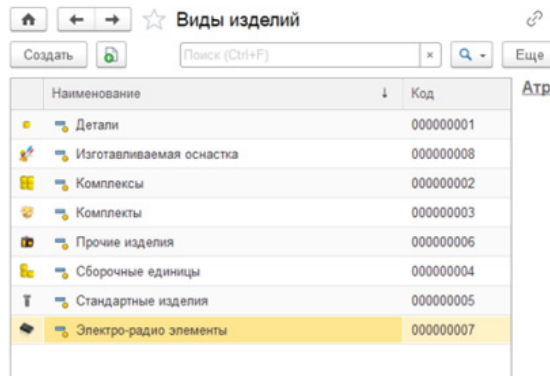


Рис. 4. Виды изделий

Перечень настроек видов нормативов представлен на рисунке 5.

Элемент технологии	Метод обработки	Вид норматива	Единица измерения
Техпереходы		Тв	мин
Техпереходы		То	мин
Операции		Тз	мин
Операции		Тп	мин
Операции		Тшт	мин

Рисунок 5. Виды нормативов

Для соединения с 1С:ERP или 1С:MES доступны встроенные инструменты по передаче в информационные системы инженерных данных, сформированных в «1С:PDM Управление инженерными данными 4 (PLM)» [4]. А также были предустановлены виды нормативов Тшт, Тп и Тз для элементов технологической подготовки «Операция», а именно указана единица измерения в минутах, так как эти параметры стоят в планах обмена между системами 1С.

Жизненный цикл изделия (продукции) — это период времени от момента разработки до вывода из эксплуатации [5].

Параметр «Стадия жизненного цикла» показывает статус изделия или документации. Для документации установлены стадии (рис. 6):

- в разработке — документ создан впервые;
- в архиве — данные переданы в архив, ими можно пользоваться;
- на изменении — проводятся работы по изменению;
- на согласовании — процесс согласования;
- неиспользуемый — документ снят с производства.

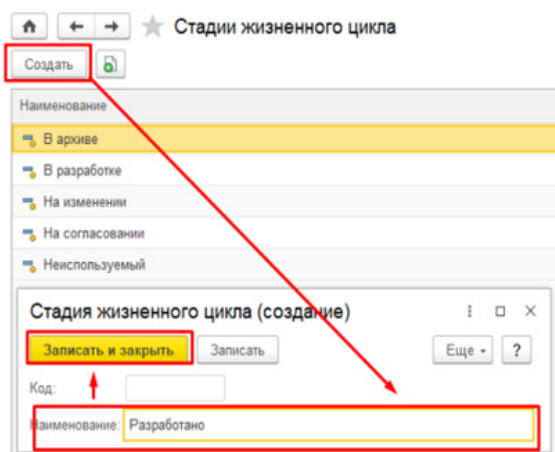


Рис. 6. Стадии жизненного цикла

Для документации установлены следующие стадии жизненного цикла изделия [6]: разработка, производство, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, утилизация.

Были настроены виды документов, изделий, заготовок, роли и исполнители задач, печатные формы, группы доступа, виды нормативов, параметры нумерации операций, состояния согласования, сетевые настройки для обмена электронными письмами, загружен классификатор единиц измерения подбором через ОКЕИ [7], указан принцип хранения файлов в томах на дисках, заполнены профессии рабочих через справочник ОКПДТР, создан перечень инструкций по охране труда, заполнен справочник «Рабочие центры».

Следующий шаг — наполнение первичными данными. Номенклатура вносится двумя способами: ручным (рис. 7) и с помощью доработки с подключением к единой базе данных (рис. 8).

☆ Штангенциркуль (Номенклатура)

Основное | [Присоединенные файлы](#) | [Характеристики номенклатуры](#)

Записать и закрыть | Записать | Импорт изображения | Еще - ?

Код: 0000000005

Наименование: Штангенциркуль

Наименование для печати: Штангенциркуль

Группа: Оснастка

Артикул: 1000981964

Вид номенклатуры: Измерительные инструменты

Тип номенклатуры: Товар

Использование характеристик: Не используются

Единица хранения: шт

Единица для отчетов: шт

Упаковки:

Вид воспроизводства: Покупка

Описание: Штангенциркуль из инструментальной стали.

Комментарий: Инструмент используется для измерений при выполнении контрольных операций.

Рис. 7. Номенклатура «Штангенциркуль»

← → ☆ Добавление номенклатуры

флеш | Найти | Отборы | Еще -

Все категории

Компьютеры и связь | Потребительские товары | Продукты питания | Медицина | Строительство и ремонт | Транспорт | Сельское хозяйство | Природные ресурсы и материалы для производства | Оборудование | Услуги | Прочие товары

Создать номенклатуру | Открыть карточку

1С.Номенклатура	Единица измер...	Производитель	Загружена
Флеш-накопители USB/Флеш-накопители USB 3.0/Флеш-накопитель 3...	шт		
одеколон ozon for men fresh	шт		
Флеш-накопитель 16Gb SmartBuy USB 2.0 Pocket series Black	шт		✓
Флешка (флэш) SmartBuy USB flash drive 64GB Crown (белый)	шт		
Флеш диск SSD Silicon Power 120GB SATA 3 2.5 Slim S55	шт		
торг "флеш-персик"	шт	ИП Саулкин Сергей...	
USB Флешка (накопитель) 64GB SmartBuy Crown, USB 3.0, (черная)	шт		
Флеш накопитель 16Gb SmartBuy USB 2.0 LARA цвет: Black	шт		

Рис. 8. Добавление номенклатуры

Для упрощения создания номенклатуры в системе разработан бизнес-процесс «Верификация» и функция «Номенклатурный подбор». После успешной предварительной работы идет организация управления электронным архивом. В архиве контролируются следующие документы: технический бюллетень, сервисная инструкция, парт-лист, пользовательская инструкция. Сервисная и пользовательская инструкции необходимы для тиражирования, парт-лист носит больше справочный характер. Но при внедрении новой технологии приоритет поставлен на технический бюллетень, так как документирование найденных решений позволит сократить время работы технического отдела. В техническом бюллетене отражается суть проблемы, почему она возникла и как ее исправить (рис. 9) [8].

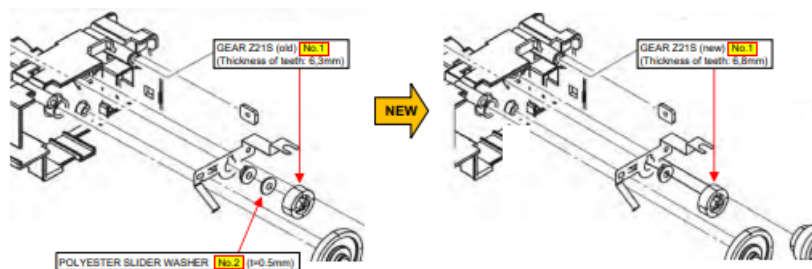
Техническая бюллетень

UTAX / TA P-3521 MFP
UTAX / TA P-3527w MFP
UTAX / TA P-4020 MFP
UTAX / TA P-4025w MFP
UTAX / TA P-4026iwMFP

TB-04S	2S0-H142M	Date: 12.02.2023
---------------	-----------	------------------

Примечание при замене деталей (измените толщину зубчатого колеса Z21S)
 P-3521MFP, P-3527wMFP, P-4020MFP, P-4025wMFP, P-4026wMFP
 P-3522DW, P-4020DN, P-4020DW

Тема:
 Чтобы улучшить работу по сборке, увеличьте толщину зубьев шестерни Z21S (№1) и не используйте шайбу. Основываясь на этом изменении, необходимо учитывать его при замене деталей. Обратитесь к разделу "Измерение поля" на следующей странице.



НОМЕРА							
No.	Old Part No.	New Part No.	Название				
				Old	New	Old	New
1	302RV28130	302RV28131	GEAR Z21S	1	1	X	0*1
2	C2804100	-----	POLYESTER SLIDER WASHER 4.1X10X0,5T	1	0	X	-

Рис. 9. Технический бюллетень TB-04S

После утверждения данная информация хранится в единственном печатном экземпляре. Выдача, возврат, заявки на печать, списание инструкций проводится через управление электронным архивом.

Была произведена настройка отчета «Выданные документы» для контроля движения документации. Есть возможность посмотреть количество имеющихся выданных и возвращенных экземпляров (рис. 10).

Карточка учета	Заявлено	Выдано	Осталось выдать	Возвращено
Документ				
Абонент				
A10.120.701	2	1	1	1
A10.120.701 Чертеж детали	2	1	1	1
Петров А.А.	2	1	1	1
A10.120.701_3D	2	2		
A10.120.701_3D 3D-Модель детали	2	2		
Производство	2	2		
A10.120.710-34_3D	1	1		
A10.120.710-34_3D 3D-Модель сборки	1	1		
Иванов И.И.	1	1		
A10.120.710-34_С6	1	1		
A10.120.710-34 Сборочный чертеж	1	1		
Иванов И.И.	1	1		
A10.120.711	3	3		3
A10.120.711 Чертеж детали	3	3		3
Иванов И.И.	3	3		3
A10.120.711_3D	3	3		3
A10.120.711_3D-Модель детали	3	3		3
Иванов И.И.	3	3		3
A10.120.712	1	1		1
A10.120.712 Чертеж детали	1	1		1
Иванов И.И.	1	1		1
A10.120.712_3D	2	1	1	1
A10.120.712_3D модель детали	2	1	1	1
Иванов И.И.	2	1	1	1
Итого	17	14	3	10

Рис. 10. Отчет «Выданные документы»

Технологическая подготовка производства началась с регистрации изделий (подразумевается процесс создания элемента, при котором ему задается обозначение и наименование изделия), которые делятся на такие виды [9]:

- детали;
- сборочные единицы;
- комплексы;
- комплекты;
- стандартные изделия;
- электро-радиоэлементы;
- прочие изделия;
- изготавливаемая оснастка.

Каждый из вышеперечисленных видов изделий разделяется на различные подчиненные составы. Базовый вариант состава показан на рисунке 11 и является основным инструментом при работе с изделием.

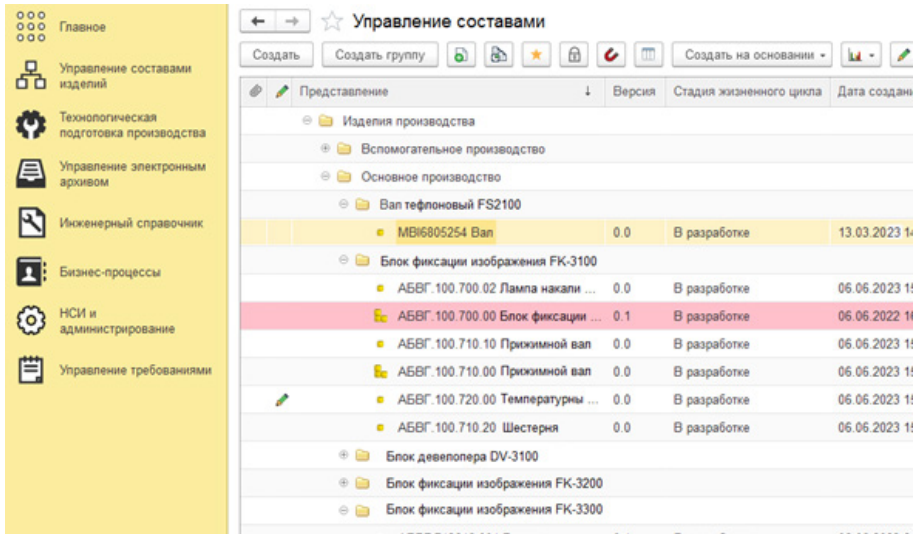


Рис. 11. Управление составами

Каждое изделие имеет свой состав, который представляет из себя электронную структуру изделия (далее — ЭСИ). При этом, каждый элемент ЭСИ включает описание деталей, сборки, документов, которые относятся к каждой отдельно взятой части изделия. ЭСИ содержит полный перечень всех составляющих его изделий.

Следующим этапом идет настройка технологического процесса с указанием расцеховочных маршрутов путем формирования маршрутной технологии через элемент «Маршрут» в интерфейсе «Технологическое дерево» (рис. 12).

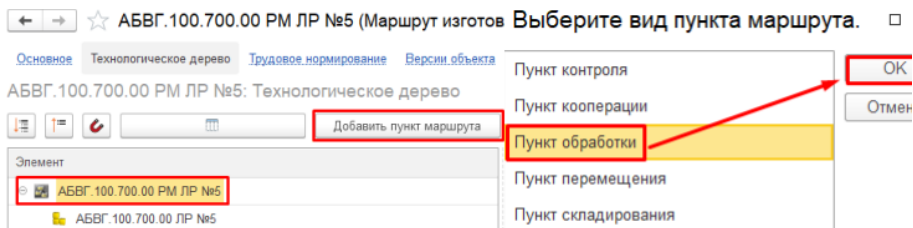


Рис. 12. Добавление маршрута в изготовление 5

В результате формируется маршрут с указанием изготавливаемого изделия и основных материалов, участвующих в процессе. В технологическом дереве были добавлены процессы, операции, переходы по маршрутам, комплектование, а также альтернативные технологические процессы и расцеховочные маршруты изготовления изделия для того, чтобы находить более дешевые или быстрые варианты производства.

Это позволит использовать нормирование труда с включением основного времени, в течение которого непосредственно осуществляется технологический процесс, и вспомогательного времени, затрачиваемого на действия, непосредственно обеспечивающие выполнение основной работы [10].

Последним этапом внедрения программного продукта был процесс согласования выбора технологии для перевода в другой статус и заполнения перечня согласующих лиц. Статус «на согласовании» принимается автоматически при запуске процесса. При успешном прохождении технология примет тот статус, который был указан в процессе согласования. Все задачи настроены на отображение на начальной странице ответственного сотрудника компании (рис. 13).

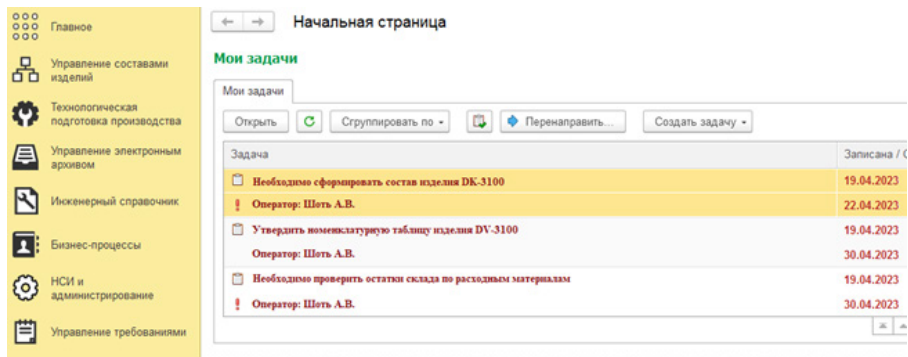


Рис. 13. Начальная страница согласования

В результате был внедрен программный продукт «1С:PDM Управление инженерными данными 4 (PLM)». Это добавило дополнительные обязанности сотрудникам компании, которые были внесены в трудовой договор. Для оценки положительного эффекта от внедрения были определены критерии оценки эффективности и зафиксированы показатели по ним в разные периоды времени. Средние и округленные для понимания результаты указаны в таблице.

Таблица

Критерии оценки эффективности

№	Наименование критерия	Показатели до внедрения	Показатели после внедрения
1	Производство изделия с заменой комплектующих в среднем	60 минут	60 минут
2	Замена изделия у клиента с прохождением контроля	15 минут	15 минут
3	Замена изделия у клиента с непрохождением контроля	42 минуты	15 минут
4	Время, затраченное на повторный вызов с заменой изделия	72 минуты	0 минут
5	Количества брака на 10 изделий	2	0

Окончание табл.

№	Наименование критерия	Показатели до внедрения	Показатели после внедрения
6	Максимальное время ожидания наличия запчастей в ситуации резкого истощения склада и привлечения партнера	192 минуты	0 минут
7	Средние показания разницы распределения количества заявок между инженерами (заявки, выполненные инженером-сборщиком / заявки, выполненные инженером по ремонту)	30 % / 70 %	50 % / 50 %

Исходя из полученных данных без учета времени работы в системе, видно, что время работы с проблемными деталями, повторными вызовами и ожиданием готовой продукции стало минимальным.

Итоговым результатом работы является внедрение программного продукта «1С: PDM Управление инженерными данными 4 (PLM)» на предприятии ООО «БЮРО-ЭКСПРЕСС» в режим эксплуатации.

Список литературы

1. *Автоматизация* производства: навстречу будущему. URL: <https://katanamrp.com/blog/manufacturing-process-automation> (дата обращения: 22.05.2023).
2. *Каталог* запчастей Kyocera ECOSYS FS4100DN. URL: <https://printcopy.info/?mod=pc&brand=Kyocera&model=ECOSYS+FS4100DN> (дата обращения: 22.05.2023).
3. *ГОСТ 2.101-2016*. Единая система конструкторской документации. М., 2018.
4. *1С:PDM* Управление инженерными данными 4 (PLM). URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/plm/features> (дата обращения: 22.05.2023).
5. *ГОСТ Р 56136-2014*. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. М., 2015.
6. *Жизненный цикл* изделия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Жизненный_цикл_изделия (дата обращения: 22.05.2023).
7. *Классификатор* единиц измерения в 1С (ОКЕИ). URL: <https://wiseadvice-it.ru/o-kompanii/blog/articles/klassifikator-edinic-izmereniya-v-1s-okei/> (дата обращения: 22.05.2023).
8. *Справочник* документации Triumph-adle. URL: <https://www.triumph-adler.com/ta-en-de/customer-service/download-centre> (дата обращения: 3.06.2023).
9. *1С: Предприятие 8*. Конфигурация «PDM Управление инженерными данными 4 (PLM)». Руководство пользователя. URL: <https://its.1c.ru/db/pdm4plm4> (дата обращения: 03.06.2023).
10. *Основы* технического нормирования труда. URL: <https://sergeeva-i.narod.ru/orp/page335.htm> (дата обращения: 22.05.2023).

Об авторах

Татьяна Алексеевна Солдатенко — ассистент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: an_tanushka@mail.ru

Антон Владимирович Шоть — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: shot1999@bk.ru

The authors

Tatiana Alekseevna Soldatenko, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: an_tanushka@mail.ru

Anton Vladimirovich Shot, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: shot1999@bk.ru

Е. А. Васильева

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАСАТЕЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
К РЕШЕНИЮ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ТИПА**

Получены уточненные оценки скорости сходимости метода касательного разложения, относящегося к классу методов неполного блочного разложения, к решению эллиптических задач. В частности, рассмотрено стационарное анизотропное уравнение диффузии, аналитически получены оптимальные параметры касательного разложения в зависимости от коэффициентов дифференциального уравнения, а также количественные и качественные оценки для нормы итерационного оператора, которые подтверждены результатами численных экспериментов.

This article discusses the tangential decomposition method [1], which is iterative and belongs to the class of incomplete block decomposition methods. Such systems of equations, in particular, arise when discretizing various elliptic problems. In this work, the optimal values of the tangent expansion parameter were analytically obtained depending on the coefficients of the differential equation and the methods of its discretization, as well as quantitative and qualitative estimates for the norm of the iterative operator. The Dirichlet and Neumann problems for the Poisson equation, as well as the stationary anisotropic diffusion equation, were considered. The theoretical values of the convergence rate were confirmed by the results of numerical experiments.

Ключевые слова: касательное разложение, неполное блочное разложение, предобуславливатель, эллиптическое уравнение, анизотропное уравнение диффузии

Keywords: tangential decomposition, incomplete block decomposition, preconditioner, elliptic equation, anisotropic problem

Введение

Анизотропия коэффициентов эллиптического оператора или — что эквивалентно — элементов дискретизационной сетки оказывает значительное влияние на скорость сходимости итерационных методов для решения линейных задач, возникающих из разностных схем [2]. Такие ситуации часто встречаются в гидрогеологических приложениях, например при моделировании потенциальных потоков подземных вод.

Одним из методов, позволяющих решить анизотропную задачу диффузии, является впервые предложенный в [1] метод касательного разложения. Он относится к классу методов неполных блочных разложений [3—9], а его скорость сходимости слабо зависит от размера сетки (см., напр., [1; 7]). Также к его достоинствам следует отнести тот факт, что он

робастный. Метод касательного разложения можно использовать как в качестве самостоятельного метода на сетках среднего размера (например, в многосеточном методе), так и в качестве предобуславливателя в методе сопряженных градиентов.

Определение. Рассмотрим систему линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{M}\mathbf{u} = \mathbf{f}$$

с блочно-диагональной матрицей

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & -\mathbf{L} & 0 & \dots & 0 \\ -\mathbf{L} & \mathbf{D} & -\mathbf{L} & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{D} & -\mathbf{L} \\ 0 & \dots & 0 & -\mathbf{L} & \mathbf{D} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

вектором неизвестных

$$\mathbf{u} = \text{blockdiag}\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n\}$$

и правой частью

$$\mathbf{f} = \text{blockdiag}\{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_n\}, \quad \mathbf{D}, \mathbf{L}, \mathbf{u}_j, \mathbf{f}_j \in \mathbb{R}^{m \times m}, \quad j = 1 \dots n.$$

Тогда касательное разложение для матрицы \mathbf{M} , отвечающее параметру λ^* , можно определить следующим образом:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{L} + \tilde{\mathbf{T}}) \tilde{\mathbf{T}}^{-1} (\mathbf{L}^T + \tilde{\mathbf{T}}) + \mathbf{N},$$

где $\mathbf{L} = \text{blocktridiag}\{-\mathbf{L}_j, 0, 0\}$, $\tilde{\mathbf{T}} = \text{blockdiag}\{\tilde{\mathbf{T}}_j\}$, а $\mathbf{N} = \text{blockdiag}\{\mathbf{N}_j\}$ — матрица остатка:

$$\tilde{\mathbf{T}}_1 = \mathbf{D}, \quad \tilde{\mathbf{T}}_j = \mathbf{D} + (\mu_{j-1}^*)^2 \tilde{\mathbf{T}}_{j-1} - 2\mu_{j-1}^* \mathbf{L}, \quad j > 1, \quad (2)$$

и параметры

$$\mu_1^* = \lambda^*, \quad \mu_j^* = \lambda^* / (1 - \lambda^* \mu_{j-1}^*), \quad j > 1. \quad (3)$$

Параметр λ^* называется параметром касательного разложения и для каждой задачи определяется индивидуально.

Ранее в [9] и [11] были получены оценки скорости сходимости метода касательного разложения для класса модельных задач. В данной статье, опираясь на результаты этих исследований, мы получим количественные и качественные скорости сходимости для задачи Дирихле для уравнения Пуассона при дискретизации на билинейных элементах и при использовании разностных схем повышенного порядка точности; для задачи Дирихле для стационарного анизотропного уравнения диффузии.

$$\varepsilon u_{xx} + u_{yy} = f, \quad \varepsilon = \text{const}, \quad (4)$$

а также для краевых задач для уравнения Пуассона когда на части границы рассматриваемой области заданы условия Неймана. Для уравнения (4) эти оценки будут получены с учетом зависимости от значений коэффициента уравнения ε .

Также для всех вышеупомянутых задач будут указаны оптимальные значения параметра касательного разложения λ^* , причем для анизотропной задачи значения λ^* , полученные в данной работе, позволяют получить высокую скорость сходимости для любого ε , в отличие от универсального способа выбора λ^* , предложенного ранее в [9] и [11], когда высокая скорость сходимости достигалась только для значений ε , близких к единице.

Точные оценки для нормы итерационного оператора для модельных задач

Обозначим через

$$\mathbf{K} = (\mathbf{L} + \tilde{\mathbf{T}}) \tilde{\mathbf{T}}^{-1} (\mathbf{L}^T + \tilde{\mathbf{T}})$$

матрицу касательного разложения. Тогда матрица

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}$$

является итерационной матрицей касательного разложения. Оценка для нормы итерационного оператора $\|\mathbf{S}\|_{\mathbf{K}}$ даст нам скорость сходимости. В [11] было показано, что для модельной задачи

$$\mathbf{M}\mathbf{u} = \mathbf{f}$$

с матрицей вида (1) справедлива следующая оценка:

$$\|\mathbf{S}\|_{\mathbf{K}} \leq \max_{v_{\min} \leq v \leq v_{\max}} \frac{Q_{v^*}(v)}{1 + Q_{v^*}(v)}, \quad (5)$$

где функция $Q_{v^*}(v)$ имеет вид

$$Q_{v^*}(v) = \begin{cases} \frac{(v - v^*)^2}{4\sqrt{v^*}(v^* + v)(\sqrt{v^*} + 1)((1 - \delta) + \delta v)}, & \text{при } v > 1, \\ \frac{(v - v^*)^2}{4\sqrt{v^*}(v^* + v)(\sqrt{v^*} + 1)(\delta + (1 - \delta)v)}, & \text{при } 0 < v \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{\min} = (1 - 2\lambda_{\max}) / (1 + 2\lambda_{\max}), \quad v_{\max} = (1 - 2\lambda_{\min}) / (1 + 2\lambda_{\min})$$

а λ_{\min} и λ_{\max} — соответственно наибольшее и наименьшее собственные значения матрицы $\mathbf{C} = \mathbf{L}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{D} \mathbf{L}^{-\frac{1}{2}}$, $\delta = \sin^2 \frac{\pi}{2m}$, m — количество блоков, а параметры λ^* и v^* связаны соотношением

$$\lambda^* = \frac{1 - v^*}{2(1 + v^*)}.$$

Также было показано, что задачу вычисления значения параметра λ^* и соответствующей ему оценки для нормы оператора перехода можно свести к численному решению уравнения

$$Q_v^*(v_{\min}) = Q_v^*(v_{\max}). \quad (7)$$

Оно, в свою очередь, для случая $0 < v_{\min}, v_{\max} \leq 1$ сводится к уравнению относительно $z = \sqrt{v^*}$:

$$z^5 + (\tau + \xi)z^4 + 2\xi z^3 + 2d z^2 + (\vartheta - \xi c)z + \xi d = 0, \quad (8)$$

где $\xi = \delta/(1 - \delta)$, $\tau = v_{\min} + v_{\max}$.

Тогда квадрат решения данного уравнения лежащего на интервале $(\sqrt{v_{\min}}, \sqrt{v_{\max}})$ даст нам оптимальный параметр v^* . Оценку для нормы итерационного оператора найдем из уравнения (7), подставив в него уже известный параметр v^* :

$$\|S\|_k \leq 1 - 4(v_{\min} + \delta)^{\frac{1}{3}}. \quad (9)$$

Помимо стандартного пятиточечного шаблона дискретизации (шаблон А) существуют и другие способы дискретизации уравнения Пуассона, а именно дискретизация на билинейных элементах (шаблон В) и схемы повышенного порядка точности (шаблоны С и D).

$$\begin{array}{cccc} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} & \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -4 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 12 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & -4 & -1 \\ -4 & 20 & -4 \\ -1 & -4 & -1 \end{bmatrix} \\ \text{(A)} & \text{(B)} & \text{(C)} & \text{(D)} \end{array}$$

При использовании билинейных элементов блоки матрицы системы уравнений $\mathbf{M}\mathbf{u} = \mathbf{f}$ будут иметь вид $\mathbf{D} = \text{tridiag}\{-1, 8, -1\}$, $\mathbf{L} = \text{tridiag}\{1, 1, 1\}$, а при использовании схем повышенного порядка точности для шаблона С — $\mathbf{D} = \text{tridiag}\{-2, 12, -2\}$, $\mathbf{L} = \text{tridiag}\{1, 2, 1\}$ и для шаблона D — $\mathbf{D} = \text{tridiag}\{-4, 20, -4\}$, $\mathbf{L} = \text{tridiag}\{1, 4, 1\}$.

Приближенную оценку для нормы оператора перехода касательного разложения для матрицы \mathbf{M} , полученной дискретизацией по шаблону С, если размерность блоков m и количество блоков n равны, воспользовавшись (9), можно записать в виде

$$\|S\|_k \leq 1 - 2 \left(\frac{3\pi^2}{n^2} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Остальные способы дискретизации дадут нам скорость сходимости того же порядка. Конкретные значения оценок скорости для этих задач представлены в таблицах 1—3. Также там приведены оптимальные значения параметра касательного разложения. Отметим, что мы не отобрали отдельно численные и теоретические оценки для нормы оператора перехода, потому что они совпадают с высокой степенью точности.

Таблица 1

Дискретизация по шаблону С

n	16	32	64	128	256	512	1024
ω^*	2,8	3,4	4,3	5,5	6,9	8,7	10,9
η	0,3326	0,5076	0,6530	0,7647	0,8445	0,8990	0,9352

Таблица 2

Дискретизация по шаблону D

n	16	32	64	128	256	512	1024
ω^*	2,7	3,4	4,3	5,4	6,9	8,7	10,9
η	0,3167	0,4975	0,6474	0,7619	0,8433	0,8985	0,9349

Таблица 3

Дискретизация на билинейных элементах

n	16	32	64	128	256	512	1024
ω^*	3,1	3,9	4,9	6,2	7,8	9,8	12,4
η	0,4012	0,5766	0,7109	0,8085	0,8755	0,9200	0,9490

Рассмотрим смешанные краевые задачи для уравнения Пуассона в единичном квадрате. Если условия второго рода поставлены на левой или правой границах квадрата, то будем обозначать их (l) и (n) соответственно. А краевую задачу с условиями Неймана на левой и правой сторонах квадрата одновременно — через (ln) . Считаем, что на остальных сторонах квадрата заданы граничные условия первого рода.

Блоки \mathbf{D} и \mathbf{L} матрицы соответствующей системы уравнений \mathbf{M} для задач (l) , (n) и (ln) имеют вид

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \Delta_{11} & -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 4 & -1 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & -1 & 4 & -1 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & \Delta_{nn} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \Lambda_{nn} \end{pmatrix},$$

а элементы Δ_{11} , Δ_{nn} , Λ_{11} , Λ_{nn} , равны

$$\begin{aligned} (l): \quad & \Delta_{11} = 2, \quad \Delta_{nn} = 4, \quad \Lambda_{11} = 2, \quad \Lambda_{nn} = 1; \\ (n): \quad & \Delta_{11} = 4, \quad \Delta_{nn} = 2, \quad \Lambda_{11} = 1, \quad \Lambda_{nn} = 2; \\ (ln): \quad & \Delta_{11} = 2, \quad \Delta_{nn} = 2, \quad \Lambda_{11} = 2, \quad \Lambda_{nn} = 2. \end{aligned}$$

В этом случае собственные значения матрицы $\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{L}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{D} \mathbf{L}^{\frac{1}{2}}$ для задач (l) и (n) равны

$$\lambda_i \approx 1 / \left(2 + 4 \sin^2 \frac{(2i-1)\pi}{4n} \right),$$

а для задачи (ln) :

$$\lambda_i \approx 1 / \left(2 + 4 \sin^2 \frac{(i-1)\pi}{2(n-1)} \right).$$

Тогда воспользовавшись оценкой (9), получим следующие оценки для нормы оператора перехода касательного разложения для задач (л) и (н):

$$\|S\|_K \leq 1 - 4 \sqrt[3]{\frac{\pi^2}{(n+1)^2} + \frac{4\pi^2}{\pi^2 + 8n^2}},$$

и для задачи (лн):

$$\|S\|_K \leq 1 - 4 \sqrt[3]{\frac{\pi^2}{4(n+1)^2}}$$

соответственно.

Численные значения скорости сходимости касательного разложения для задач (л), (н) и (лн) для различного количества узлов сетки приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Оценки для нормы оператора перехода и оптимальные параметры касательных разложений для задач (л) и (н)

<i>n</i>	16	32	64	128	256	512	1024
ω^*	2,6	2,8	3,6	4,6	5,8	7,3	9,2
η	0,3598	0,5467	0,6868	0,7911	0,8635	0,9120	0,9435

Таблица 5

Оценки для нормы оператора перехода и оптимальные параметры касательных разложений для задачи (лн)

<i>n</i>	16	32	64	128	256	512	1024
ω^*	2,1	2,6	3,3	4,2	5,4	6,8	8,6
η	0,4006	0,5780	0,7091	0,8061	0,8733	0,9184	0,9479

Найдем оптимальные значения параметра v^* касательного разложения для задачи Дирихле для анизотропного уравнения диффузии (4) с однородными граничными условиями в зависимости от коэффициентов этого уравнения, и отвечающие им количественные и качественные оценки нормы оператора перехода касательного разложения $\|S\|_K$. Заметим, что к аналогичной задаче приводится задача с коэффициентом ε при u_{yy} .

После дискретизации при помощи пятиточечного шаблона мы получим систему линейных уравнений с матрицей вида (1), а матрица C будет иметь вид

$$C = \text{diag} \{-\varepsilon, 2 + 2\varepsilon - \varepsilon\}.$$

Ее собственные значения матрицы известны и равны

$$\lambda \approx 1 / \left(2 + 4\varepsilon \sin^2 \frac{\pi\omega}{2n} \right), \tag{10}$$

откуда

$$\lambda_{\min} \approx 1 / \left(2 + 4\varepsilon \cos^2 \frac{\pi}{2n} \right), \quad \lambda_{\max} \approx 1 / \left(2 + 4\varepsilon \sin^2 \frac{\pi}{2n} \right),$$

и если количество блоков m и размерности блоков n равны, то

$$v_{\min} = \frac{\varepsilon \sin^2 \frac{\pi}{2n}}{1 + \varepsilon \sin^2 \frac{\pi}{2n}} \approx \frac{\varepsilon \xi}{1 + \varepsilon \xi}, \quad v_{\max} = \frac{\varepsilon \cos^2 \frac{\pi}{2n}}{1 + \varepsilon \cos^2 \frac{\pi}{2n}} \approx \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}, \quad \xi = \tan^2 \frac{\pi}{2n}. \quad (11)$$

Так как для любого ε справедливо неравенство $0 < v_{\min} < v_{\max} < 1$, то оптимальный параметр касательного разложения можно найти из уравнения (8).

Как было сказано ранее, если $\varepsilon \approx 1$, то можно использовать оценку (9). Тогда норма итерационного оператора удовлетворяет оценке

$$\|S\|_k \leq 1 - (4\pi)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\varepsilon + 1}{n^2} \right)^{\frac{1}{3}},$$

а оптимальный параметр равен

$$\omega^* \approx \left(\frac{2n(\varepsilon + 1)}{\pi \sqrt{\varepsilon}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Если $\varepsilon \gg 1$, то v_{\min} и v_{\max} близки к единице, поэтому оценка будет другой. Мы можем получить качественную оценку скорости сходимости касательного разложения при помощи выделения в (8) главных членов, используя, например, правило «параллелограмма Ньютона» [10]:

$$Q_{v^*}(v) \approx \frac{(v - v^*)^2}{16(1 + \xi)}.$$

Тогда выбрав в качестве оптимального параметра $v = (v_{\min} + v_{\max})/2$, мы получим $Q_{v^*}(v_{\min}) \approx \frac{(v_{\max} - v_{\min})^2}{64(1 + \xi)}$. Откуда

$$\frac{Q_{v^*}(v)}{1 + Q_{v^*}(v)} \approx \frac{\varepsilon^2(1 - \xi)^2}{64(1 + \xi)(1 + \varepsilon)^2(1 + \varepsilon\xi)^2}.$$

В этом случае оценка для нормы матрицы перехода касательного разложения имеет вид

$$\|S\|_k \leq \frac{1}{64(1 + \varepsilon\xi)^2}.$$

Из этой оценки видно, что чем больше ε , тем выше скорость сходимости.

Рассмотрим теперь случай $\varepsilon \ll 1$. Ранее для нормы оператора перехода касательного разложения модельных задач существовала только оценка (9), из которой следовало, что скорость сходимости касательного разложения снижается с уменьшением ε , что противоречит численным результатам. Покажем, что можно получить качественную оценку скорости сходимости аналогично тому, как это сделано в предыдущем пункте, выделяя в (8) главные члены и учитывая, что ε и v_{\min} малы:

$$Q_{v^*}(v) \approx \frac{(v - v^*)^2}{4v^*(v + \xi)}.$$

Будем искать оптимальный параметр касательного разложения v^* в виде $v^* = \frac{\varepsilon a}{1 + \varepsilon a}$. Подставляя его в (7) и пренебрегая членом $\varepsilon \xi$ в силу (11) получим уравнение

$$(\xi - a)^2 (\varepsilon + \xi) = \xi^2 (1 - a)^2.$$

Тогда

$$a = \frac{\xi \sqrt{\varepsilon + \xi} + \sqrt{\xi}}{\sqrt{\varepsilon + \xi} + \sqrt{\xi}} \approx \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \varepsilon / \xi}},$$

откуда

$$v^* \approx \frac{\varepsilon}{2}, \quad \omega^* \approx \frac{2n\sqrt{a}}{\pi}, \quad \|S\|_k \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 8\xi}.$$

Следовательно, при $\varepsilon \rightarrow 0$ и при $\varepsilon \rightarrow +\infty$ норма итерационной матрицы стремится к нулю (см., напр., табл. 1), а метод касательного разложения практически превращается из итерационного в прямой.

В таблице 6 представлены значения параметра ω^* , отвечающего параметру λ^* из (10), и скорости сходимости касательного разложения η для анизотропной задачи (4) в единичном квадрате $(0,1) \times (0,1)$ с однородными граничными условиями Дирихле для различных значений коэффициента уравнения ε . Значения теоретической оценки нормы итерационного оператора $\eta_{\text{теор}}$ получены численным решением уравнения (7). Через $\eta_{\text{числ}}$ обозначена средняя за 30 итераций скорость сходимости касательного разложения при использовании тех же значений параметра ω^* , что и для $\eta_{\text{теор}}$. Шаг сетки $h = 1/n$ для всех вычислений был выбран равным $h = h_x = h_y = 1/256$. Касательное разложение было построено в соответствии с (2) с параметрами μ_i из (3).

Таблица 6

ε	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4
ω^*	101,8	66,0	36,2	16,5	6,8	3,9	2,7	2,0	1,6
$\eta_{\text{теор}}$	0,183	0,502	0,755	0,849	0,841	0,737	0,519	0,227	0,033
$\eta_{\text{числ}}$	0,116	0,471	0,743	0,842	0,829	0,725	0,516	0,237	0,036

Из таблицы видно, что значения теоретических и численных оценок скорости сходимости, вычисленные при одинаковых значениях параметра ω^* , совпадают с высокой степенью точности. Это подтверждают и многочисленные численные эксперименты для сеток других размеров.

Заключение

В данной статье были получены аналитические количественные и качественные оценки скорости касательного разложения для ряда модельных задач эллиптического типа, а также аналитически решена задача нахождения оптимальных значений его параметра, причем для анизотропного уравнения диффузии ее решение приведено в зависимости

от коэффициентов дифференциального уравнения. Вывод о том, что скорость сходимости тем выше, чем сильнее отличается от единицы коэффициент анизотропного уравнения диффузии сделанный на их основе, был подтвержден результатами численных исследований.

Список литературы

1. *Buzdin A.* Tangential decomposition // *Computing*. 1998. № 61. P. 257—276.
2. *Hackbusch W.* The frequency decomposition multi-grid method. Part I: Application to anisotropic equations // *Numer. Math.* 1989. № 56. P. 229—245. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01409786>.
3. *Wittum G.* Filternde Zerlegungen. Schnelle Löser für grosse Gleichungssysteme // *Teubner Skripten zur Numerik*. Band 1. Stuttgart, 1992.
4. *Ильин В. П.* Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М., 1995.
5. *Buzdin A., Wittum G.* Two-Frequency Decomposition // *Numer. Math.* 2004. № 97. P. 269—295.
6. *Wagner C.* Frequenzfilternde Zerlegungen für unsymmetrische Matrizen und Matrizen mit stark variierenden Koeffizienten. Stuttgart, 1995.
7. *Wagner C.* Tangential frequency filtering decompositions for symmetric matrices // *Numer. Math.* 1997. № 78. P. 119—142.
8. *Wagner C.* Frequency filtering decompositions for unsymmetric matrices. // *Numer. Math.* 1997. № 78. P. 143—163.
9. *Буздин А. А., Васильева Е. А.* Уточненная оценка нормы итерационного оператора касательного разложения // *Известия КГТУ*. 2015. № 36. С. 186—193.
10. *Erlichson H.* Newton's Polygon Model and the Second Order Fallacy // *Centaurus*. 2007. Vol. 35. P. 243—258.
11. *Васильева Е. А.* Оптимальные параметры и уточненные оценки скорости сходимости касательного разложения // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2022. № 1. С. 77—89.

Об авторах

Екатерина Алексеева Васильева — доц., канд. физ.-мат. наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.
E-mail: Ekaterina.A.Vasilyeva@mail.ru

The author

Dr. Ekaterina A. Vasilyeva, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.
E-mail: Ekaterina.A.Vasilyeva@mail.ru

Научное издание

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск 2

Под редакцией А. Д. Быковой

Редактор *О. И. Бессчастнова*

Компьютерная верстка *Е. В. Денисенко*

Подписано в печать 02.07.2024 г.

Формат 70×108 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 12,1

Тираж 300 экз. (1-й завод 35 экз.).

Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, 14