

Научно-технический журнал

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Выпуск #2 (2026)



Энергетические системы и комплексы

Брылина О.Г., Исанбеков Р.Р. Автоматизированная конвейерная система сортировки

Заварухин В.А., Шашкин А.В. Пути поиска и решения вопросов работы фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности

Базыкин Д.А., Дахин С.В. Экспериментальное определение характеристик термоэлектрической генераторной установки при регулировании количественного соотношения потоков

Турбомашины и поршневые двигатели

Осинцев К.В. Обзор возможностей повышения доли использования автономных когенерационных комплексов на базе ГПУ в Челябинской области

0 журнале

Краткая информация

Журнал «Тепловые электрические станции» – ежеквартальный научно-технический рецензируемый журнал.

Журнал публикует материалы о современном состоянии науки и техники в области тепловой энергетики, теплотехники, турбомашиностроения и смежных областях. Освещает вопросы рационального и эффективного использования топливно-энергетических ресурсов, экологически чистых и безотходных технологий, возобновляемых источников энергии, теплофикации, решения наиболее важных научно-технических проблем в области энергетики. Журнал рассчитан на ученых и специалистов, работающих на электростанциях и предприятиях энергомашиностроительной промышленности, инженеров-исследователей, научно-педагогических работников и обучающихся по профильным направлениям.

Журнал находится в открытом доступе. За публикацию рукописей плата с авторов, включая студентов и аспирантов, не взимается. Авторский гонорар за издание статей не начисляется.

Журнал «Тепловые электрические станции» индексируется в РИНЦ.

История переименований

С 2013 г. по 2025 г. «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых».

С апреля 2025 г. переименован в «Тепловые электрические станции».

Разделы журнала

1. Энергетические системы и комплексы.
2. Турбомашины и поршневые двигатели.
3. Краткие сообщения. Успехи в области энергетики и турбомашиностроения.

Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(национальный исследовательский
университет)»

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Осинцев К.В., доктор техн. наук

Зам. главного редактора:

Пшениснов Н.А., канд. техн. наук

Члены редколлегии:

Кирпичникова И.М., доктор техн. наук

Соломин Е.В., доктор техн. наук

Возмилов А.Г., доктор техн. наук

Ганджа С.А., доктор техн. наук

Тягунов М.Г., доктор техн. наук

Горожанкин А.Н., доктор техн. наук

Задорожная Е.А., доктор техн. наук

Леванов И.Г., доктор техн. наук

Редакция

Технический редактор:

Левашова И. В.

Контакты

Адрес редакции:

454080, г. Челябинск, просп. В.И.

Ленина, д. 76

Телефоны:

+7 (351) 267-93-95

+7 (952) 527 67 24

E-mail:

thermalpowerplants@mail.ru

Веб-сайт:

<https://tes.susu.ru>

ISSN (эл. версии): 3033-5590

Научно-технический журнал ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Выпуск #2 (2026)

Содержание

Энергетические системы и комплексы

Брылина О.Г., Исанбеков Р.Р. Автоматизированная конвейерная система сортировки..... 2

Заварухин В.А., Шашкин А.В. Пути поиска и решения вопросов работы фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности..... 15

Базыкин Д.А., Дахин С.В. Экспериментальное определение характеристик термоэлектрической генераторной установки при регулировании количественного соотношения потоков 21

Турбомашины и поршневые двигатели

Осинцев К.В. Обзор возможностей повышения доли использования автономных когенерационных комплексов на базе ГПУ в Челябинской области..... 28

Энергетические системы и комплексы

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КОНВЕЙЕРНАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ

- **Брылина О.Г.**, канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия
- **Исанбеков Р.Р.**, ООО «Биянковский щебёночный завод», г. Миньяр, Челябинская область, Россия

THE AUTOMATED CONVEYOR BOX SORTING SYSTEM

- **Brylina O.G.**, Ph.D., South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia
- **Isanbekov R.R.**, Biyankovsky Sckebenochniy zavod LLC, Minyar, Chelyabinsk Region, Russia

В статье рассматривается автоматизированная конвейерная система сортировки коробок, реализованная в виртуальной среде Factory IO v2.4.3 под управлением программируемого логического контроллера Siemens S7-1200 (CPU 1211C DC/DC/DC), запрограммированного в среде TIA Portal V17. Система осуществляет двухуровневую сортировку. На первом уровне изделия проходят через Vision Sensor и сортируются по цвету на три категории (Blue, Green, Grey) с применением Pivot Arm Sorter. На втором уровне изделия взвешиваются и распределяются по весовым категориям (лёгкие менее 5,2 кг, средние, тяжёлые более 9,8 кг) с отклонением на соответствующие конвейеры. Разработана структурная схема, панель управления и I/O маппинг системы в TIA Portal. Предложен алгоритм сортировки на языке LAD (Ladder Diagram). Протестирована и выполнена верификация разработанной системы. Материалы статьи могут быть полезны при проектировании систем топливоподачи на ТЭС, при модернизации автоматизированных конвейерных систем используемых при производстве элементов и устройств возобновляемой энергетики, в пищевой, фармацевтической и логистической промышленности.

Ключевые слова: автоматизированная конвейерная система сортировки, программируемый логический контроллер, Factory IO, TIA Portal, Vision Systems, система топливоподачи, элементы и устройства возобновляемой энергетики.

This article discusses the automated conveyor box sorting system implemented in the Factory IO v2.4.3 virtual environment and controlled by a Siemens S7-1200 programmable logic controller (CPU 1211C DC/DC/DC) programmed in TIA Portal V17. The system performs two-level sorting. On the first level, items pass through a Vision Sensor and are sorted by color into three categories (Blue, Green, Gray) using a Pivot Arm Sorter. On the second level, items are weighed and sorted into weight categories (light under 5.2 kg, medium, and heavy over 9.8 kg) and sent to the appropriate conveyors. A structural diagram, control panel, and I/O mapping for the system were developed in the TIA Portal. A sorting algorithm using the Ladder Diagram (LAD) language was proposed. The developed system was tested and verified. The article's materials can be useful for designing of fuel supply systems at thermal power plants, in the upgrading of automated

conveyor systems used in the production of renewable energy components and devices, and in the food, pharmaceutical, and logistics industries.

Key words: automated conveyor box sorting system, programmable logic controller, Factory IO, TIA Portal, Vision Systems, fuel supply system, renewable energy components and devices.

Введение

В современном промышленном производстве задачи автоматизации сортировки и классификации изделий занимают одно из ключевых мест. Они широко применяются в различных отраслях промышленности: пищевой, фармацевтической, машиностроительной, логистической и позволяют с высокой скоростью и точностью классифицировать продукцию по различным параметрам, например, массе, размеру, цвету, форме [1, 2].

В то же время конвейерные системы с программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) позволяют значительно повысить производительность, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить стабильное качество продукции [3, 4].

ПЛК представляет собой промышленный компьютер, предназначенный для управления технологическими процессами в режиме реального времени. Среди ведущих производителей ПЛК выделяются Siemens, Omron, Delta Electronics [5, 6, 7, 8].

Анализ литературных источников показал, что задача двухуровневой сортировки по весовому и цветовому признакам является актуальной и практически значимой [9]. Реализация подобной системы требует корректного построения алгоритма управления с применением последовательной логики, таймеров, счётчиков и блоков сравнения [10].

Целью данной работы является разработка и исследование алгоритма управления автоматизированной конвейерной системой сортировки коробок по весовым и цветовым категориям на базе ПЛК Siemens S7-1200 с использованием TIA Portal V17 и Factory IO v2.4.3.

Семейство Siemens SIMATIC S7-1200 является одним из наиболее востребованных в классе компактных ПЛК. Контроллер CPU 1211C DC/DC/DC обеспечивает высокое быстродействие, встроенный веб-сервер, поддержку протоколов PROFINET/Industrial Ethernet и широкие возможности расширения [5]. Программирование осуществляется в среде TIA Portal, поддержива-

ющей языки стандарта МЭК 61131-3: LAD, FBD, STL, SCL и GRAPH [11].

Для задач классификации по цвету применяются системы машинного зрения (Vision Systems).

Датчик видения (Vision Sensor) формирует цифровой идентификатор объекта, который передаётся в ПЛК для принятия решений о маршруте сортировки [12]. В данной работе Vision Sensor возвращает значение типа DINT: 1 для синих объектов, 4 — для зелёных, 7 — для прочих объектов типа Other.

Виртуальное моделирование производственных процессов с применением Factory IO позволяет отрабатывать алгоритмы управления без использования реального оборудования, что существенно сокращает затраты на разработку и позволяет проводить тестирование в безопасной среде [2]. Factory IO поддерживает прямую интеграцию с TIA Portal по протоколу S7.

Таким образом, для достижения поставленной цели планируется изучить теоретических основы автоматизированных систем сортировки и решить следующие задачи:

- выполнить обзор программных средств Factory IO и TIA Portal;
- разработать структурную схему и I/O маппинга системы;
- разработать алгоритм сортировки на языке LAD (Ladder Diagram);
- протестировать и выполнить верификацию разработанной системы.

Программное обеспечение

Siemens TIA Portal V17

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) - интегрированная инженерная среда компании Siemens, предназначенная для конфигурирования, программирования и диагностики всех компонентов системы автоматизации: ПЛК, панелей оператора, преобразователей частоты и промышленных сетей [5, 11].

Ключевые особенности TIA Portal V17:

- единая среда для программирования всех устройств Siemens;
- поддержка языков программирования по МЭК 61131-3 (LAD, FBD, STL, SCL, GRAPH);
- встроенный онлайн-мониторинг с отображением состояния переменных в режиме реального времени;
- удобный редактор тегов (Tag Table) с поддержкой различных типов данных;
- интегрированная система диагностики и отладки, а также среда SIMATIC WinCC [13] для разработки SCADA-панелей.

В данной работе использован язык LAD (Ladder Diagram - релейно-контактная схема), который является наиболее распространённым при разработке систем управления конвейерным оборудованием благодаря наглядности и соответствию принципам электрических схем.

Factory IO v2.4.3

Factory IO - программный симулятор производственных сцен, разработанный компанией Real Games. Приложение предоставляет библиотеку из более чем 100 компонентов промышленного оборудования: конвейеров, датчиков, приводов, манипуляторов, визуальных датчиков и панелей управления [2].

Достоинства Factory IO:

- трёхмерная визуализация производственного процесса в реальном времени;
- прямая интеграция с ПЛК Siemens через протокол S7 (порт 102);
- поддержка Modbus TCP, OPC UA и других протоколов;
- широкий набор датчиков: фотоэлектрические, весы, Vision Sensor.

Структурная схема и описание системы

Общий вид модели в Factory IO

На рисунке 1 представлен общий вид разработанной сцены в Factory IO v2.4.3. Система включает входной конвейер, цветовую секцию с Vision Sensor и тремя Pivot Arm Sorter (первый уровень сортировки), а также весовую секцию с развилкой на три направления (второй уровень сортировки).

На рисунке 2 показана цветовая секция крупным планом:

- основной конвейер (Color Conveyor 6m);
- три Pivot Arm Sorter (Other/Blue/Green);
- датчики цвета;
- короткие ленты выгрузки.



Рис. 1. Общий вид конвейерной системы в Factory IO



Рис. 2. Цветовая секция: Pivot Arm Sorter и датчики

Панель управления

Панель управления Factory IO (рисунок 3) отображает счётчики весовой сортировки:

- вес текущего изделия на весах
- количество изделий по каждому направлению (Left/Forward/Right).

На рисунке 4 представлена панель управления с индикаторами цветовой сортировки и счётчиками Other/Blue/Green.

Видны кнопки Start/Stop/Reset, переключатель Auto/Manual и аварийная кнопка Emergency Stop.



Рис. 3. Панель управления: счётчики весовой секции



Рис. 4. Панель управления: индикаторы и счётчики цветовой секции

Таблица 1 – I/O маппинг системы

Адрес	Наименование сигнала	Назначение
%I0.0	At scale entry	Датчик входа на весы
%I0.1	At scale	Датчик на весах
%I0.2	At scale exit	Датчик выхода с весов
%I1.1	Start	Кнопка «Пуск»
%I1.2	Reset	Кнопка «Сброс»
%I1.3	Stop	Кнопка «Стоп»
%I1.5	Emergency stop	Аварийный останов
%I1.6	Other Sensor 1	Датчик прочих изделий
%I1.7	Blue Sensor 2	Датчик синих изделий
%I2.0	Green Sensor 3	Датчик зелёных изделий
%ID30 (REAL)	Weight	Значение веса с весов
%ID34 (DINT)	Vision Sensor 1 (ID)	Идентификатор цвета
%Q0.0	Entry conveyor	Входной конвейер
%Q0.2	Send left	Отклонение влево (лёгкие)
%Q0.4	Send right	Отклонение вправо (тяжёлые)
%Q0.6	Send forward	Пропуск вперёд (средние)
%Q1.3	Color Conveyor (6m)	Конвейер цветовой секции
%Q2.2 / %Q2.3	Pivot Arm Sorter 1 Other	Поворот и лента для прочих
%Q2.5 / %Q2.6	Pivot Arm Sorter 2 Blue	Поворот и лента для синих
%Q3.0 / %Q3.1	Pivot Arm Sorter 3 Green	Поворот и лента для зелёных
%QD46	Other Count	Счётчик серых изделий
%QD50	Blue Count	Счётчик синих изделий
%QD54	Green Count	Счётчик зелёных изделий

I/O маппинг системы

На рисунке 5 представлена таблица соответствия сигналов Factory IO и адресов ПЛК, настроенная в интерфейсе симулятора.

В таблице 1 представлено полное соответствие физических адресов ПЛК и сигналов системы.

Алгоритм и программа управления

Цветовая сортировка (Networks 15–25)

Программа управления реализована в организационном блоке OB1 на языке LAD. Первый функциональный блок по логике исполнения (Networks 15–25) реализует цветовую сортировку — изделие сначала проходит через Vision Sensor и направляется на нужный Pivot Arm Sorter.

Network 15: при активном Work значение

At scale entry	%I0.0	%Q0.0	Entry conveyor
At scale	%I0.1	%Q0.1	Load scale
At scale exit	%I0.2	%Q0.2	Send left
At left entry	%I0.3	%Q0.3	Left conveyor
At exit left	%I0.4	%Q0.4	Send right
At forward entry	%I0.5	%Q0.5	Right conveyor
At exit front	%I0.6	%Q0.6	Send forward
At right entry	%I0.7	%Q0.7	Front conveyor
At exit right	%I1.0	%Q1.0	Start light
Start	%I1.1	%Q1.1	Reset light
Reset	%I1.2	%Q1.2	Stop light
Stop	%I1.3	%Q1.3	Color Conveyor (6m) 1
Auto	%I1.4	%Q1.4	Other Conveyor (2m) 2
Emergency stop	%I1.5	%Q1.5	Blue Conveyor (2m) 3
Other Sensor	%I1.6	%Q1.6	Green Conveyor (2m) 4
Blue Sensor	%I1.7	%Q1.7	Other indicator
Green Sensor	%I2.0	%Q2.0	Blue indicator
Blue sensor front	%I2.1	%Q2.1	Green indicator
Green sensor front	%I2.2	%Q2.2	Pivot Arm Sorter 1 Other Turn
Other sensor front	%I2.3	%Q2.3	Pivot Arm Sorter Other 1 Belt (+)
Weight	%ID30 (REAL)	%Q2.4	Pivot Arm Sorter Other 1 Belt (-)
Vision Sensor 1 (Value)	%ID34 (DINT)	%Q2.5	Pivot Arm Sorter 2 Blue Turn
		%Q2.6	Pivot Arm Sorter 2 Blue Belt (+)
		%Q2.7	Pivot Arm Sorter 2 Blue Belt (-)
		%Q3.0	Pivot Arm Sorter 3 Green Turn
		%Q3.1	Pivot Arm Sorter 3 Green Belt (+)
		%Q3.2	Pivot Arm Sorter 2 Blue Belt (-)
		(DINT) %QD30	Left count
		(DINT) %QD34	Forward count
		(DINT) %QD38	Right count
		(DINT) %QD42	Weight
		(DINT) %QD46	Other count
		(DINT) %QD50	Blue Count
		(DINT) %QD54	Green Count

Рис. 5. Таблица I/O маппинга в TIA Portal

Vision Sensor (%ID34, DINT) копируется в буферный регистр %MD200 («ColorMem») блоком MOVE. Network 16 (рисунок 6) выполняет определение цвета. Для каждой категории используется блок TP (таймер импульса, PT = T#7s) совместно с CMP == DWord:

- %MD200 == DWord 1 → TP (7c) → Blue sensor front (%I2.1) → SET %M0.0 (Mem_Blue);
- %MD200 == DWord 4 → Green indicator (%Q2.1) → SET %M0.1 (Mem_Green);
- %MD200 == DWord 7 → TP (7c) → Other sensor front (%I2.3) → SET %M0.2 (Mem_Other).

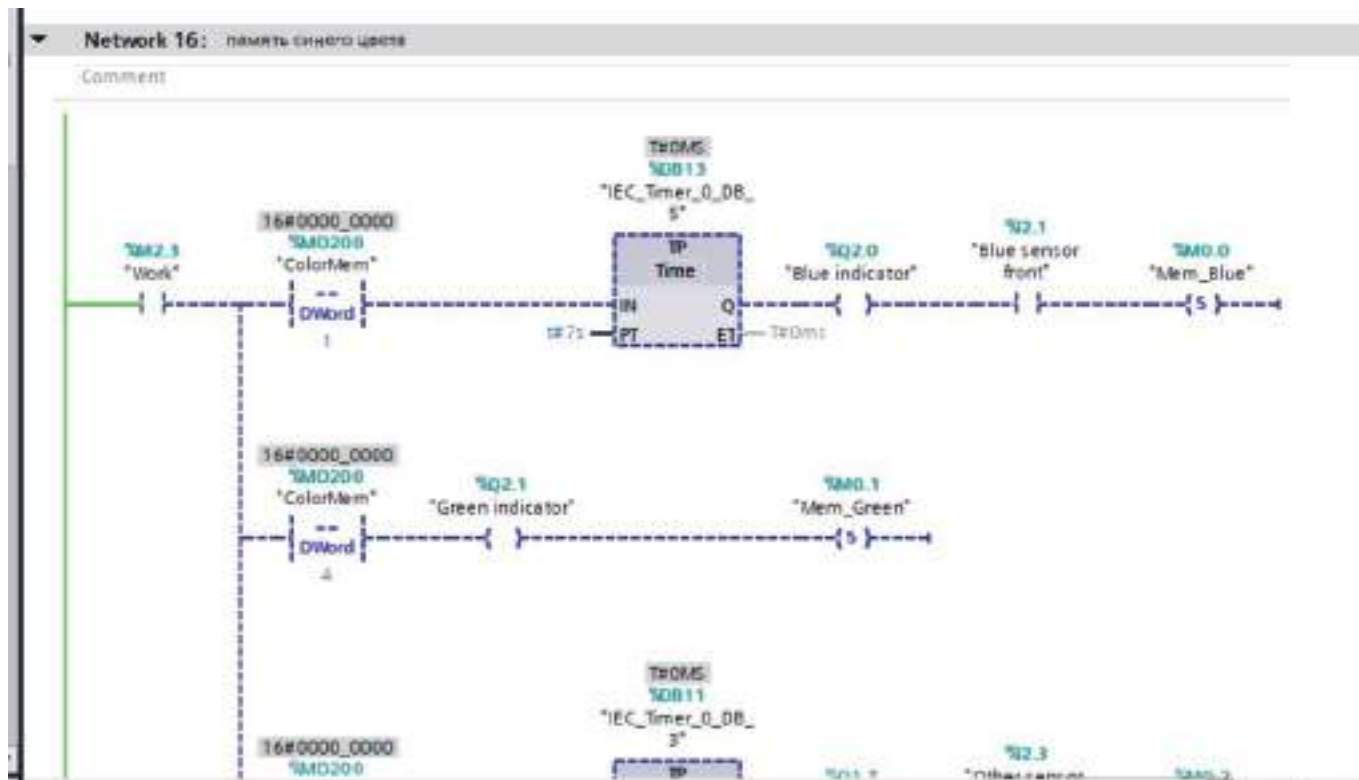


Рис. 6. Network 16: определение цвета, TP-таймеры

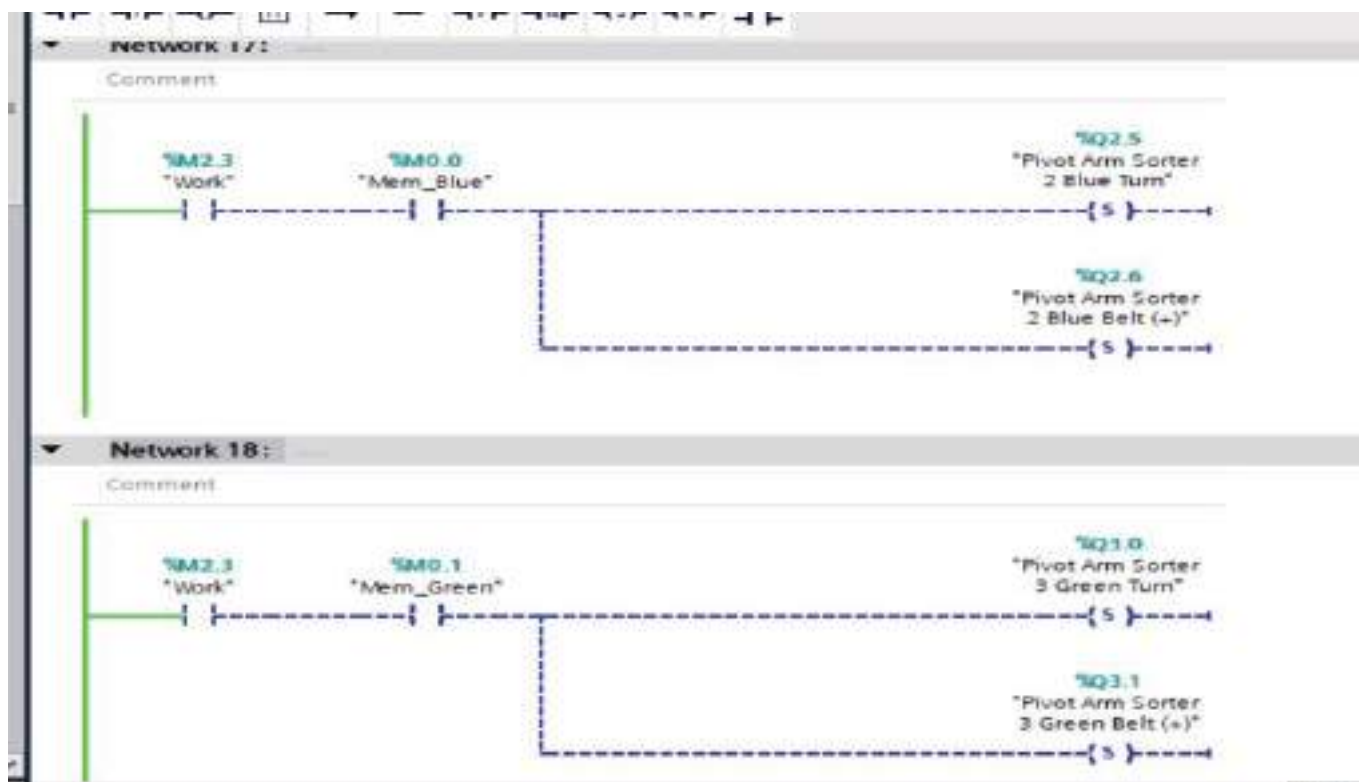


Рис. 7. N17/N18: SET Pivot Blue и Green

Networks 17–19 (рисунок 7) реализуют активацию Pivot Arm Sorter. При Work + маркер памяти цвета формируются команды SET для поворота (Turn) и ленты (Belt+): N17 — Blue (Q2.5, Q2.6), N18 — Green (Q3.0, Q3.1), N19 — Other (Q2.2, Q2.3). Networks 20–22 выполняют RESET марке-

ров и выходов при прохождении изделия через датчик или при нажатии Reset (%I1.2).

Networks 23–25 (рисунок 9) реализуют счётчики CTU DInt для цветовой секции. Подсчёт выполняется по переднему фронту сигналов датчиков. Результаты записываются в %QD50 (Blue),

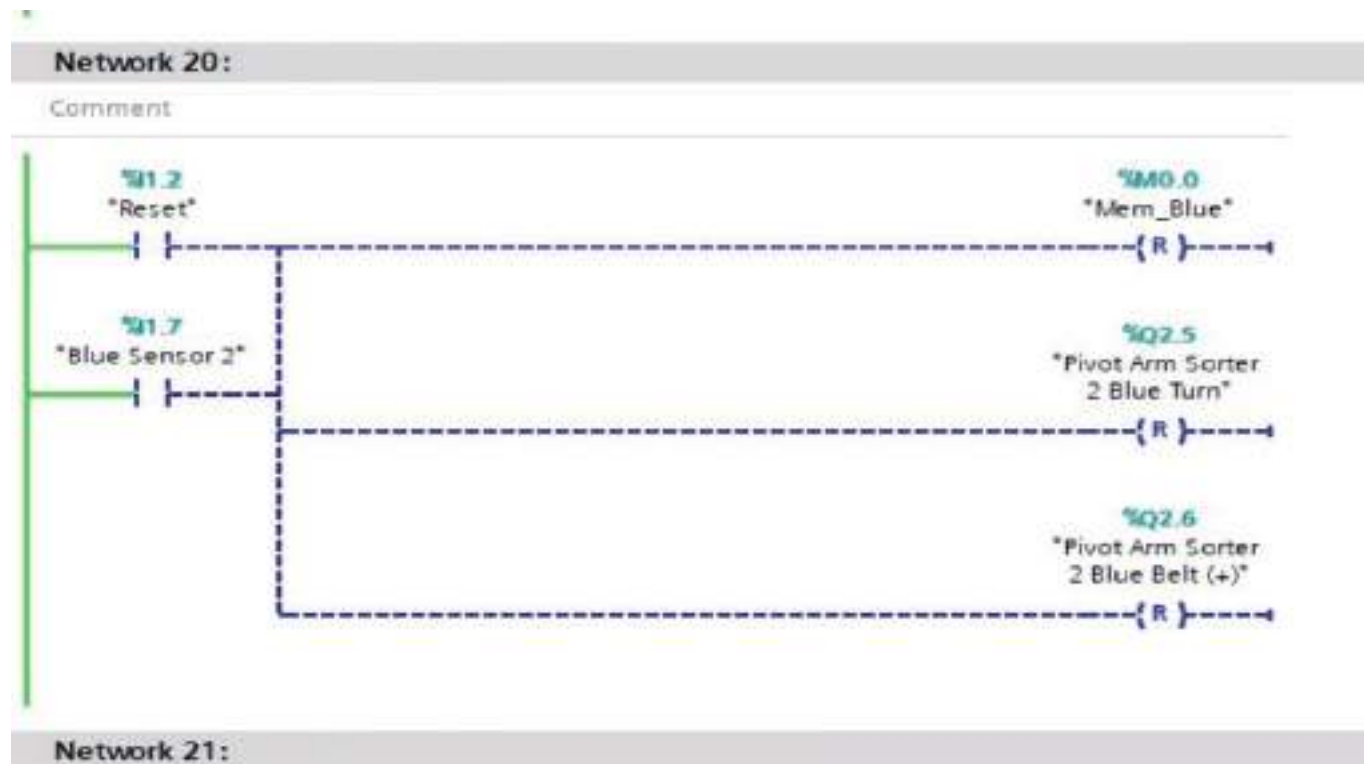


Рис. 8. N20: RESET маркера и выходов Blue

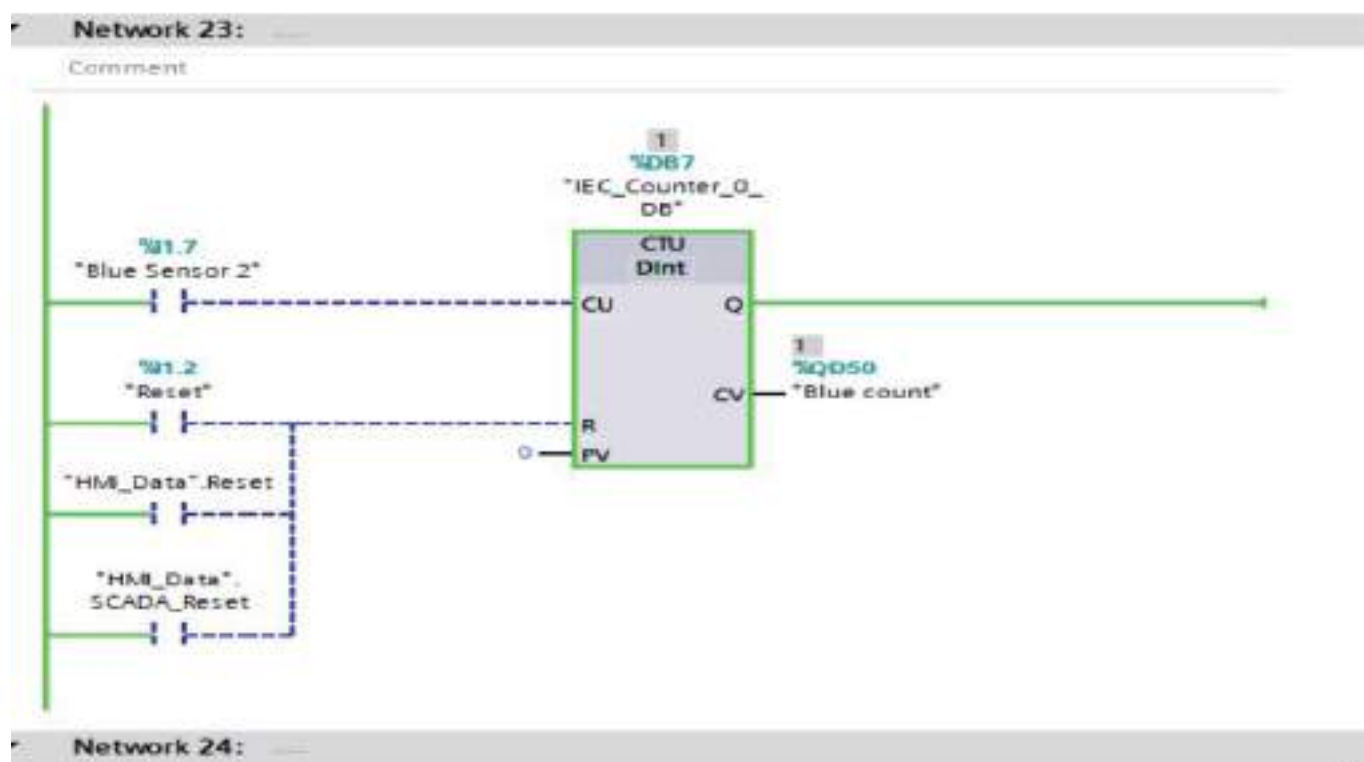


Рис. 9. Network 23: CTU Blue count (%QD50)

%QD54 (Green), %QD46 (Other). Networks 23–25 (рисунок 9) реализуют счётчики CTU DInt для цветовой секции. Подсчёт выполняется по переднему фронту сигналов датчиков. Результаты записываются в %QD50 (Blue), %QD54 (Green), %QD46 (Other).

Цветовая сортировка (Networks 15–25)

Второй функциональный блок (Networks 1–14) реализует весовую сортировку. Network 1 вызывает функциональный блок FC9000 со вспомогательными функциями. Networks 2–4 ре-

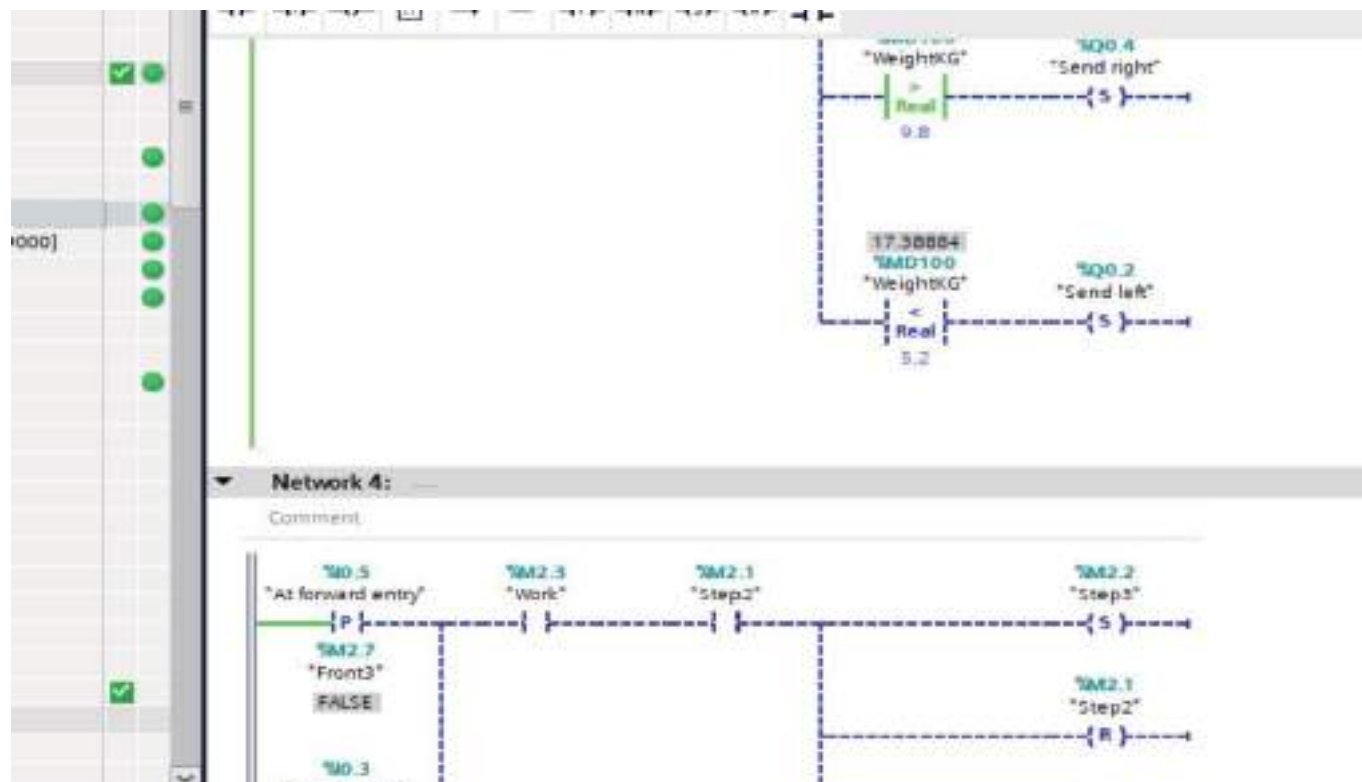


Рис. 10. Network 3: онлайн-мониторинг команд сортировки по весу

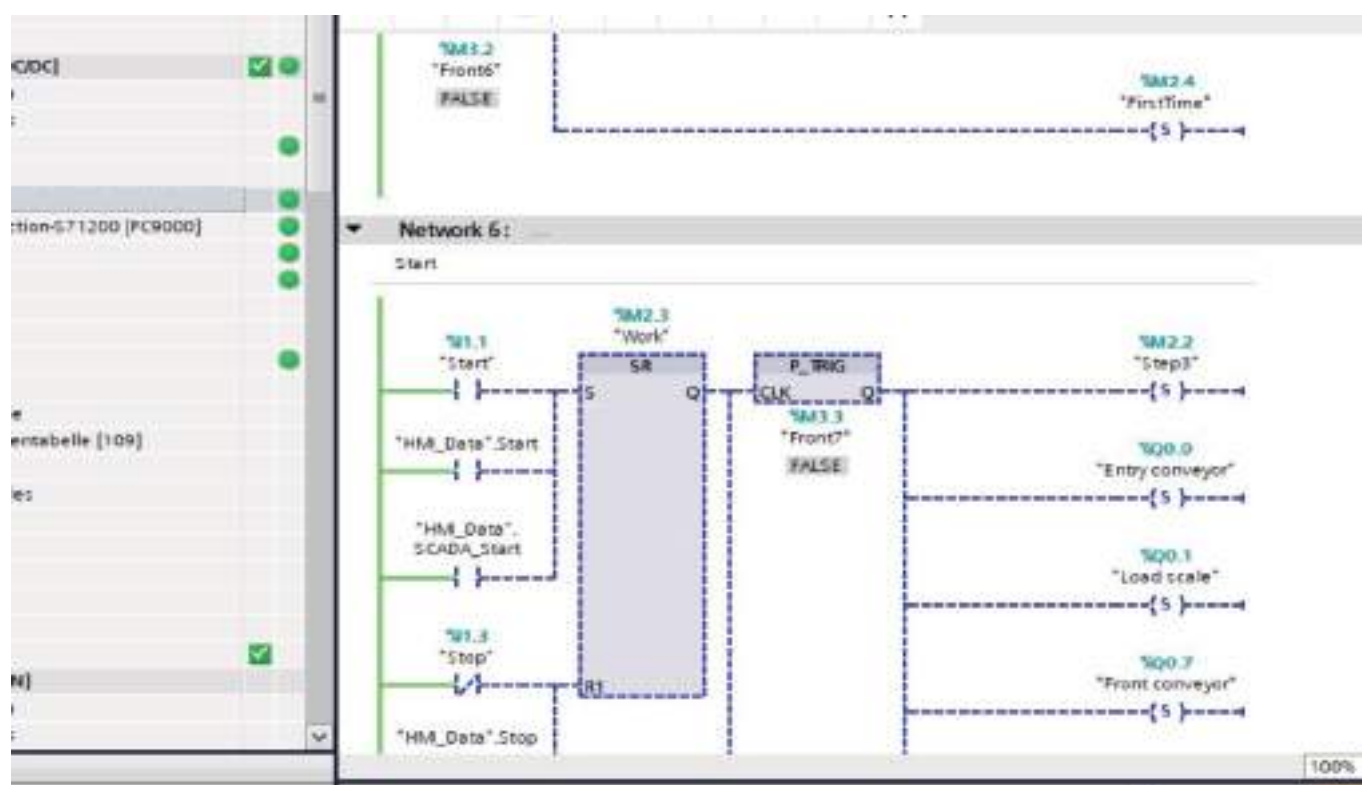


Рис. 11. Network 6: Start/Stop SR-триггер, запуск всех конвейеров

ализуют трёхшаговый алгоритм взвешивания на маркерах Step1/Step2/Step3 (%M2.0–%M2.2).

Network 3 (рисунок 10): по таймеру задержки выполняется умножение (MUL) показаний весов (%ID30) на коэффициент 2.0 → %MD100 («WeightKG»). Затем формируются команды: вес

> 9,8 кг — Send Right (%Q0.4); вес < 5,2 кг — Send Left (%Q0.2); иначе — Send Forward (%Q0.6).

Network 6 (рисунок 11) реализует логику Start/Stop через SR-триггер: при нажатии Start (%I1.1) устанавливается Work (%M2.3) и по переднему фронту запускаются все конвейеры — Entry,

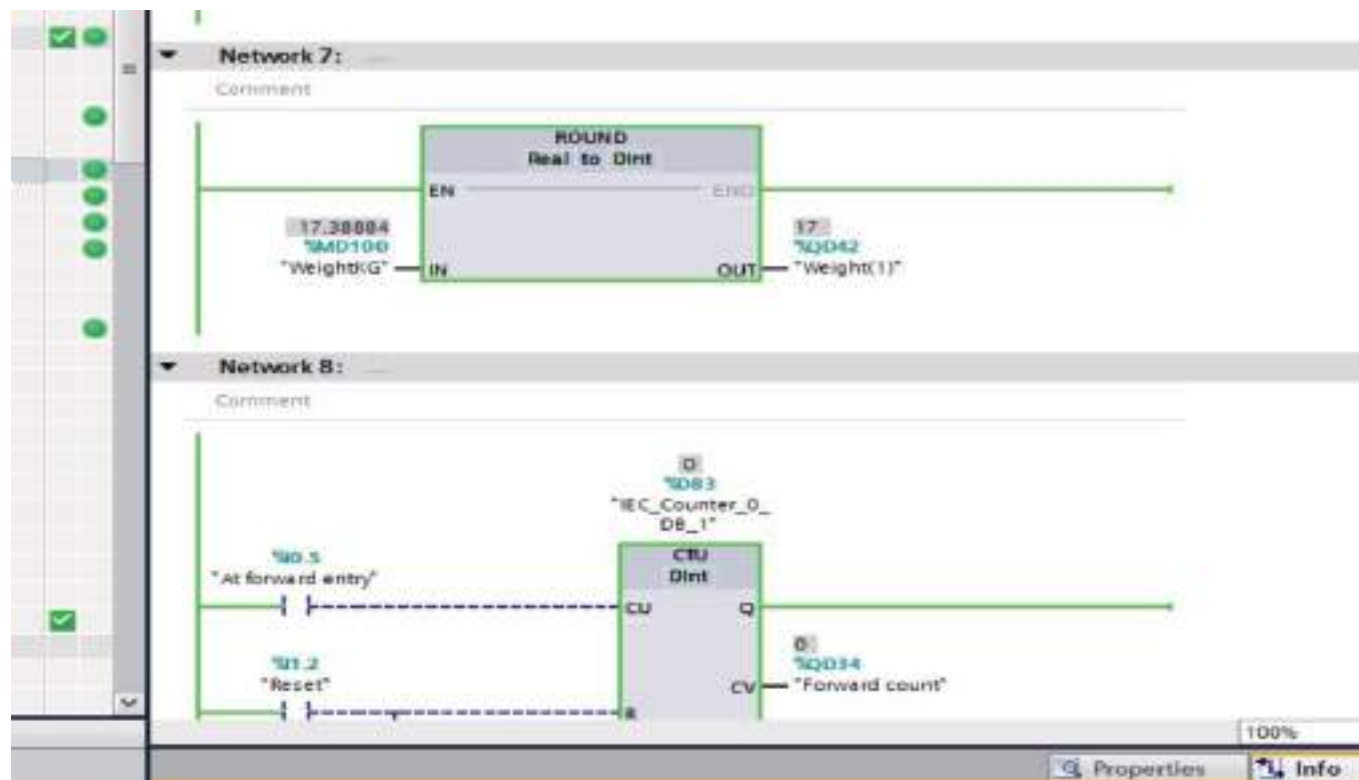


Рис. 12. Network 8: CTU Forward count (%QD34)

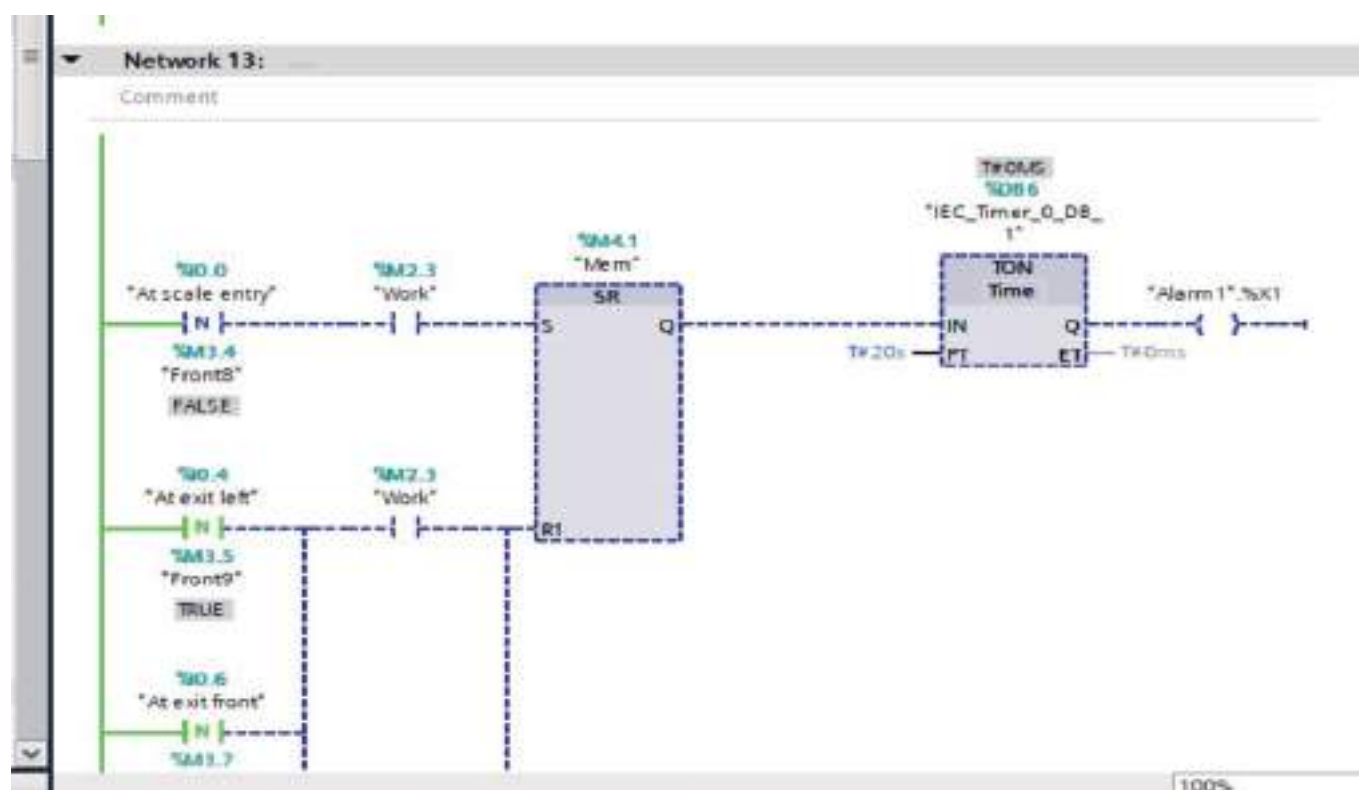


Рис. 13. Network 13: аварийный SR-триггер и таймер TON (20 с)

Load scale, Front, Left, Right, Color, Other, Blue, Green. Network 7 преобразует вес ROUND (REAL→DINT) для отображения на дисплее (%QD42). Networks 8–10 — счётчики CTU по направлениям Forward (%QD34), Left (%QD30), Right (%QD38).

Network 13 (рисунок 13) реализует аварийную защиту: SR-триггер совместно с таймером TON (20 с) формирует двухбитовый сигнал «Alarm1». Network 14 на его основе формирует мигающий сигнал «Blink» для световой аварийной индикации.

Тестирование и результаты

SCADA-панель WinCC Runtime

В ходе работы разработана SCADA-панель в среде SIMATIC WinCC Runtime Advanced (рисунок 14), отображающая в режиме реального времени состояние системы: текущий вес взвешиваемого изделия, счётчики по всем шести направлениям сортировки, индикаторы цвета и кнопки управления Start/Stop/Reset.

Методика тестирования

Тестирование системы проводилось в режиме онлайн-мониторинга TIA Portal с одновременным наблюдением за поведением модели в Factory IO.

Зелёная подсветка контактов в режиме онлайн-мониторинга подтверждает прохождение логических цепей. Проверке подлежали все маршруты сортировки и граничные условия.

Результаты тестирования

Результаты комплексного тестирования системы представлены в таблице 2.

Входетестированиябылавыявленаиустранена ошибка несовместимости типов данных в Network 16 при использовании операции сравнения CMP >. После внесения исправлений (замена сравнения с использованием ТР-таймеров и индикаторных сигналов) система прошла повторное тестирование с положительным результатом по всем сценариям.

Заключение

В статье была исследована автоматизированная конвейерная система двухуровневой сортировки коробок по весовым и цветовым категориям на базе ПЛК Siemens S7-1200 (CPU 1211C DC/DC/DC). Достигнуты следующие результаты:

- разработана и отлажена программа управления в TIA Portal V17 на языке LAD общим объёмом 25 Networks;

- реализована весовая сортировка по трём категориям с порогами 5,2 кг и 9,8 кг;

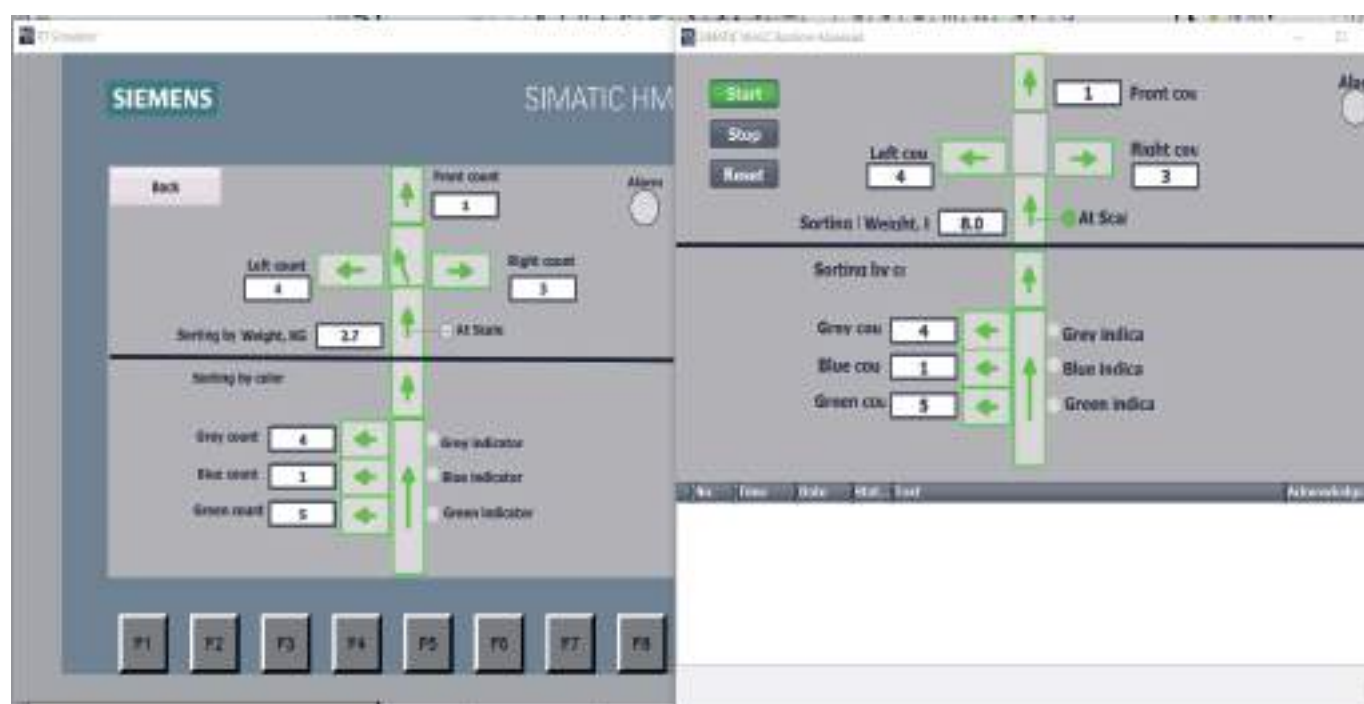


Рис. 14. HMI панель и SCADA-панель SIMATIC WinCC Runtime Advanced

Таблица 2 – Результаты тестирования

Тестовый сценарий	Ожидаемый результат	Фактический результат	Статус
Изделие массой менее 5,2кг	Send Left, левый конвейер	Send Left, левый конвейер	✓
Изделие массой более 9,8 кг	Send Right, правый конвейер	Send Right, правый конвейер	✓
Изделие массой 5,2–9,8 кг	Send Forward, цветовая секция	Send Forward, цветовая секция	✓
Vision Sensor ID=1 (Blue)	Pivot 2 поворот, Blue Belt	Pivot 2 поворот, Blue Belt	✓
Vision Sensor ID=4 (Green)	Pivot 3 поворот, Green Belt	Pivot 3 поворот, Green Belt	✓
Vision Sensor ID=7 (Other)	Pivot 1 поворот, Other Belt	Pivot 1 поворот, Other Belt	✓
Нажатие Emergency Stop	Останов всех конвейеров, мигание	Останов, мигающая сигнализация	✓
Нажатие Reset	Сброс счётчиков и маркеров	Сброс счётчиков и маркеров	✓
Счётчики Blue/Green/Other	Инкремент при каждом изделии	Инкремент при каждом изделии	✓
SCADA WinCC — отображение данных	Актуальные значения счётчиков	Отображение в реальном времени	✓

– реализована цветовая сортировка с применением Vision Sensor и Pivot Arm Sorter с таймерным управлением;

– разработана HMI панель и SCADA-панель в WinCC Runtime для визуализации состояния системы;

– проведено комплексное тестирование, подтвердившее корректность работы всех маршрутов сортировки.

Полученные результаты подтверждают эффективность применения ПЛК Siemens S7-1200 совместно с TIA Portal для решения задач автоматизации производственных процессов. Применение виртуальной среды Factory IO позволило провести полноценную отладку алгоритма без использования физического оборудования, что сокращает затраты на разработку и повышает безопасность проведения исследований [2, 9].

Разработанная автоматизированная система может быть использована в качестве основы для создания реальных систем сортировки, например, сырья и материалов на этапе производства или утилизации, для распределения компонентов по партиям, контроля качества сборки и оптимизации логистики на производственных линиях. В частности, в системах топливоподачи на тепловых электростанциях для перемещения различных видов топлива, при промышленном производстве элементов и устройств возобновляемой энергетики, в пищевой, фармацевтиче-

ской и логистической промышленности и т.п. Подобные системы позволяют оптимизировать процессы транспортировки, повысить производительность, снизить затраты ручного труда и обеспечить более точный контроль над технологическими процессами.

Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 751 с.
2. Real Games. Factory IO. Documentation and User Manual v2.4.3. – Real Games, 2022. – URL: <https://docs.factoryio.com> (дата обращения 09.04.2025).
3. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приёмы прикладного проектирования. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 253 с.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 610 с.
5. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller. System Manual. – Siemens AG, 2023. – URL: <https://support.industry.siemens.com>.
6. Официальный сайт компании Omron. – URL: <https://omron.ru> (дата обращения 09.04.2025).
7. Официальный сайт компании Delta

Electronics [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.deltronics.ru> (дата обращения 09.04.2025).

8. Парр Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.

9. Шишмарёв В.Ю. Автоматизация технологических процессов. – М.: Академия, 2010. – 352 с.

10. Osintsev K.V., Brylina O.G., Prikhodko Yu.S. Modeling and automation of the hydro-transport system of water-coal fuel at negative ambient temperatures. In: Radionov A., Karandaev A. (eds.) Advances in automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 641. pp. 657-666. Springer, Cham.

11. Siemens AG. TIA Portal. STEP 7 Professional V17. Getting Started. – Siemens AG, 2021. – URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата обращения 09.04.2025).

12. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.

13. Siemens AG. SIMATIC WinCC V17. User Manual. – Siemens AG, 2022. – URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата обращения 09.04.2025).

References

1. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of automatic control systems. – St. Petersburg: Profession, 2003. – 751 p.

2. Real Games. Factory IO. Documentation and User Manual v2.4.3. – Real Games, 2022. – URL: <https://docs.factoryio.com> (accessed 09.04.2025).

3. Petrov I.V. Programmable controllers. Standard languages and techniques of applied design. – M.: SOLON-Press, 2004. – 253 p.

4. Denisenko V.V. Computer control of technological process, experiment, equipment. – M.: Hotline Telecom Publishing, 2009. – 610 p.

5. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller. System Manual. – Siemens AG, 2023. – URL: <https://support.industry.siemens.com>.

6. Omron. – URL: <https://omron.ru> (accessed 09.04.2025).

7. Delta Electronics. – URL: <http://www.deltronics.ru> (accessed 09.04.2025).

8. Parr E. Programmable controllers: an engineer's guide. – M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2007. – 516 p.

9. Shishmarev V.Yu. Automation of technological processes. – M.: Academy, 2010. – 352 p.

10. Osintsev K.V., Brylina O.G., Prikhodko Yu.S. Modeling and automation of the hydro-transport system of water-coal fuel at negative ambient temperatures. In: Radionov A., Karandaev A. (eds.) Advances in automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 641. pp. 657-666. Springer, Cham.

11. Siemens AG. TIA Portal. STEP 7 Professional V17. Getting Started. – Siemens AG, 2021. – URL: <https://support.industry.siemens.com>. (accessed 09.04.2025).

12. Miroshnik I.V. Theory of automatic control. Linear systems. – St. Petersburg: Piter, 2005. – 336 p.

13. Siemens AG. SIMATIC WinCC V17. User Manual. – Siemens AG, 2022. – URL: <https://support.industry.siemens.com>. (accessed 09.04.2025).

Сведения об авторах

Брылина Олеся Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия, brylinaog@susu.ru.

Исанбеков Рим Рашидович – магистрант, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ООО «Биянковский щебёночный завод», г. Миньяр, Челябинская область, РФ, isanbekov-rim@mail.ru.

About the authors

Brylina Olesya Gennadyevna – Ph.D, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, Chelyabinsk, Russia, brylinaog@susu.ru.

Isanbekov Rim Rashidovich – master's student, South Ural State University, Biyankovsky Sckebenochniy zavod LLC, Minyar, Chelyabinsk Region, Russia, isanbekov-rim@mail.ru.

Дата поступления рукописи: 27.03.2026

Дата принятия рукописи: 05.06.2026

ПУТИ ПОИСКА И РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В ТОЧКЕ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

- **Заварухин В.А.**, канд. техн. наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия
- **Шашкин А.В.**, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

WAYS TO FIND AND SOLVE ISSUES OF PHOTOVOLTAIC MODULE OPERATION AT THE MAXIMUM POWER POINT

- **Zavarukhin V.A.**, Ph.D., South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia
- **Shashkin A.V.**, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

В данной работе рассмотрены методы поиска оптимального режима работы фотоэлектрических модулей. Отмечена возможность негативного влияния работы модулей в точке максимальной мощности. Проблема использования точки максимальной мощности может быть актуальной при исследованиях режимов работы солнечных электростанций. При затенении лицевой поверхности модулей на графике вольт-амперной характеристики образуется ступенчатый график с локальными точками максимальной мощности на каждой из ступеней. Выбор точки максимальной мощности на таком графике влияет на срок службы затененного модуля. Полученные результаты анализа существующих методик подтверждают, что все методики определяют точку максимальной мощности без учета затененных участков модулей.

Ключевые слова: солнечная энергетика, точка максимальной мощности, фотоэлектрические модули.

This paper examines methods for finding the optimal operating mode of photovoltaic modules. The possibility of a negative impact of module operation at the maximum power point is noted. The problem of using the maximum power point may be relevant in studies of operating modes of solar power plants. When the front surface of the modules is shaded, the current-voltage characteristic graph becomes stepped, with local maximum power points on each of the steps. The choice of the maximum power point on such a graph affects the service life of the shaded module. The obtained results of the analysis of existing methods confirm that all methods determine the maximum power point without considering the shaded areas of the modules.

Key words: solar energy, maximum power point, photovoltaic modules.

Введение

Солнечная энергия является одним из основных вариантов генерации электроэнергии, т.к. она неисчерпаема, доступна практически везде и является экологически чистой. Сейчас всё боль-

ше стран переходит к выработке электрической мощности при помощи фотоэнергетических систем (ФЭС). Уже сегодня достигнуты большие успехи в улучшении технологии ФЭС ячеек, однако общая эффективность солнечного модуля все еще остается на низком уровне. Эффектив-

ность работы фотоэлектрического модуля определяется его работой в точке максимальной мощности вольтамперной характеристики (ВАХ). Поэтому для достижения максимальной эффективности фотоэлектрического модуля (ФЭМ) необходимо использовать алгоритм слежения за данной точкой, для того чтобы передавать в нагрузку максимально возможную, при данных условиях, мощность солнечного модуля. Эта задача осложняется различными природными факторами, решение которых также очень важно для достижения максимальной производительности и максимального срока службы ФЭМ.

Точка максимальной мощности

Эффективный режим работы определяется отношением тока (I_{mpp}) и напряжения (U_{mpp}) – точкой максимальной мощности (ТММ) (рисунок 1). Мощность фотоэлектрических модулей зависит от освещенности и температуры ячеек. Изменение этих параметров влияет на смещение этой точки на вольт-амперной характеристике. Это требует быстрого определения значений тока и напряжения ТММ при новых входных параметрах.

Поэтому при построении ФЭС необходимо учитывать проблемы затенения, недостаточной освещенности, перегрева, загрязнения модулей и нелинейной зависимости сгенерированного солнечного модулем тока от его выходного напряжения [1].

Обзор методов поиска точки максимальной мощности

Можно выделить два основных метода поиска экстремума – это метод «Возмущение и наблюдение» и метод «Возрастающая проводимость», которые являются основой многих похожих методов из-за их простых управляющих структур и удобства реализации. Также существуют более дешёвые методы, требующие меньшего количества датчиков, которые подходят для ФЭС с низким уровнем точности отслеживания ТММ: метод постоянного напряжения и тока, метод короткого замыкания, метод напряжения холостого хода.

1. Метод «Возмущение и наблюдение»

Регулирование режима работы модулей на основе прямого измерения мощности является

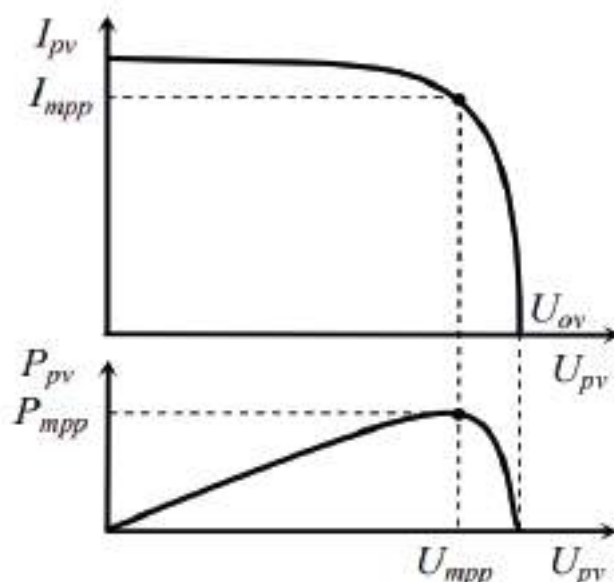


Рис. 1. Статистические характеристики солнечного модуля

самым распространенным методом, т.к. требует наименьших вычислительных затрат и наиболее прост в аппаратной реализации. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2 [2,3]. Принцип работы основан на пошаговом измерении мощности и поиске изгиба на графике мощности путем изменения опорного напряжения (рисунок 1). Поиск ТММ происходит до тех пор, пока происходит рост мощности при увеличении опорного напряжения. При уменьшении мощности опорное напряжение начинает уменьшаться.

2. Метод «Возрастающая проводимость»

Метод нацелен на поддержание ТММ путем простого измерения возрастающей и мгновенной проводимости при определении и регулировании рабочего напряжения солнечной батареи. Рабочий цикл преобразователя регулирует микроконтроллер.

По сравнению с методом возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости может отслеживать ТММ с более высокой точностью, и он имеет более высокую точность во время меняющихся погодных условиях, однако снижает скорость выборки, так как требует большего объема вычислений [3,4].

3. Метод «Постоянного напряжения и тока»

Определение точки максимальной мощности основано на допущении незначительного изменения напряжения в точке максимальной мощности при изменении освещенности и температуры ФЭМ (смещение ТММ по напряжению происходит в пределах $\pm 2\%$ от стандартных условий

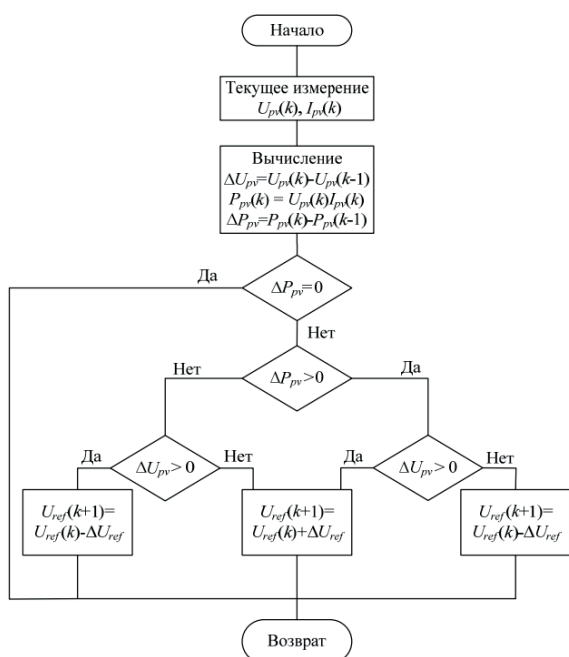


Рис. 2. Блок-схема алгоритма метода «Возмущение и наблюдение»

испытаний). Алгоритм работы изображен на рисунке 4. Данный метод не требует выведения модулей из работы для поддержания оптимального режима работы.

Регулирование режима ФЭМ происходит путем изменения тока нагрузки. Недостатком метода является отмеченное допущение, что при-

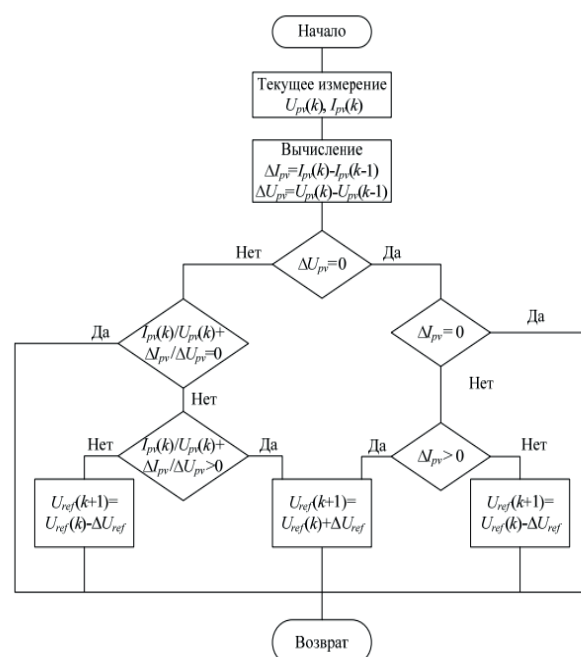


Рис. 3. Блок-схема алгоритма метода «Возрастающей проводимости»

водит к работе в режиме, близком к ТММ, но попадание в ТММ зачастую не происходит.

4. Метод «Короткого замыкания»

Ток короткого замыкания является непостоянной величиной и напрямую зависит от энергетической освещенности в течение суток (рисунок 5). Измерение тока короткого замыкания позво-

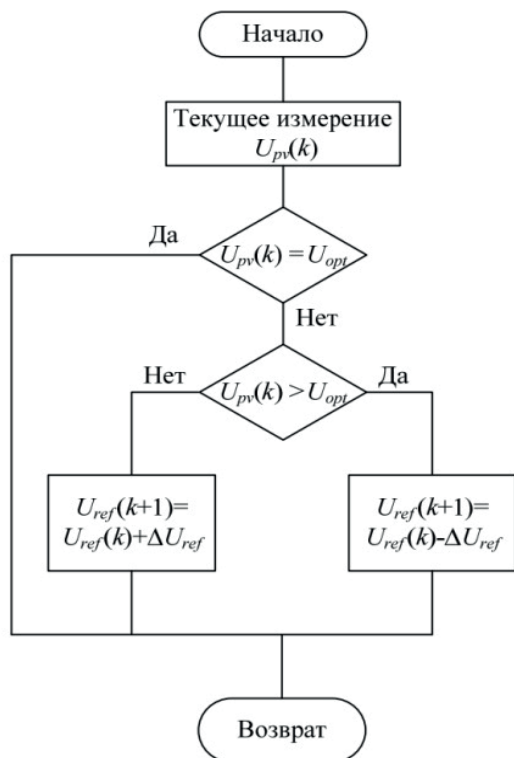


Рис. 4. Блок-схема алгоритма метода «Постоянного напряжения»

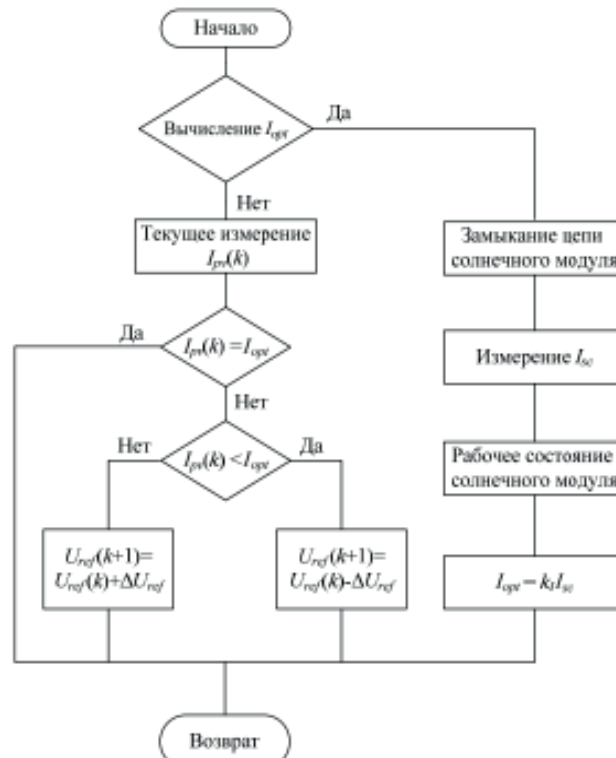


Рис. 5. Блок-схема метода короткого замыкания

ляет уточнить положение точки максимальной мощности. Для этого определяется опорное значение тока относительно тока короткого замыкания путем введения опорного коэффициента k , который находится в пределах 0,78–0,92. Контроллер формирует опорное напряжение, соответствующее оптимальному току на выходе модуля. Недостатком данного метода является периодическое выведение модулей из работы и неточное попадание в оптимальный режим работы, но точность выше, чем у предыдущего метода [1,2].

5. Метод «Холостого хода»

Для опорного регулирования оптимального режима работы также используется напряжение холостого хода (рисунок 6). При отключении модулей из работы вместо измерения тока короткого замыкания происходит измерение напряжения холостого хода. Опорное напряжение определяется путем умножения напряжения холостого хода на коэффициент k (коэффициент k находится в пределах 0,71–0,78).

Метод опирания на значение напряжения холостого хода имеет недостатки, аналогичные предыдущему. Достоинство – отсутствие колебаний возле точки MPP при постоянной солнечной радиации [1,2].

Результаты проведенного анализа приведены в таблице 1. Методы «возмущения и наблюдения» и «возрастающей проводимости» являются самыми распространенными в применении на СЭС промышленных масштабов. Однако, остальные методы могут быть вспомогательными

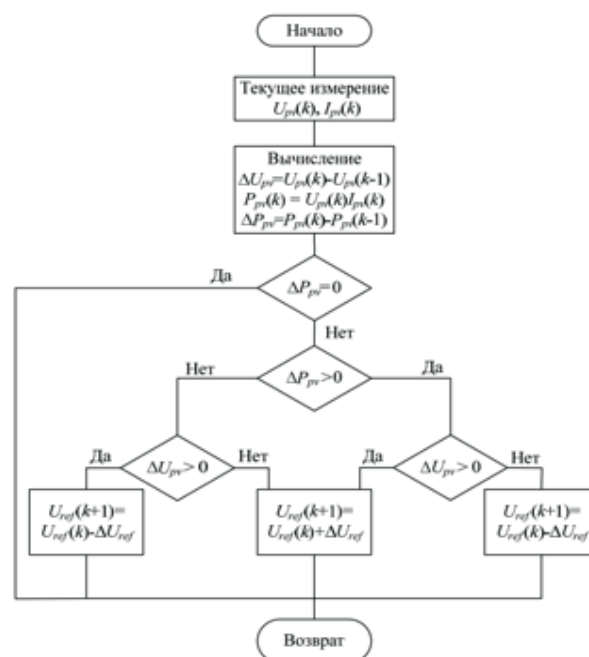


Рис. 6. Блок-схема алгоритма метода «Холостого хода»

ми при поиске неисправностей при работе модулей.

Факторы, определяющие работу солнечного модуля вблизи точки максимальной мощности

Существуют различные факторы влияния на солнечный модуль, которые выводят его работу из точки максимальной мощности и их влияние необходимо минимизировать. На работу солнечного модуля влияет ряд факторов, выводящих

Таблица 1 – Результаты анализа методов поиска ТММ

Методика регулирования	Особенности регулирования	Точность регулирования
Метод «Возмущения и наблюдения»	Не требует выведения ФЭМ из работы. Колебания вблизи ТММ происходят непрерывно.	Рабочее значение мощности находится вблизи истинной ТММ.
Метод «Возрастающая проводимость»	Не требует выведения ФЭМ из работы. Колебания прекращаются при достижении истинной ТММ.	Возможно достижение истинной ТММ.
Метод «Постоянного напряжения и тока»	Не требует выведения ФЭМ из работы	Рабочее значение мощности находится в диапазоне $\pm 2\%$ от установленного заранее значения напряжения в точке максимальной мощности. Низкая точность.
Метод «короткого замыкания»	Требует кратковременного выведения ФЭМ из работы для коррекции значения опорного тока	Рабочее значение мощности определяется относительно опорного значения. Точность выше, чем у предыдущего метода.
Метод «холостого хода»	Требует кратковременного выведения ФЭМ из работы для коррекции значения опорного напряжения	

его из точки максимальной мощности, среди которых наиболее распространены недостаточная освещённость, перегрев и загрязнение. Повлиять на погодные условия невозможно, тогда как проблема загрязнения наносит наибольший ущерб: при длительном сохранении загрязнений потери выработки могут достигать 5–30 %. Загрязнителями выступают пыль, сажа, металлические соединения, химические выбросы, а также листья, птичий помёт, остатки насекомых и биомасса. Частичное загрязнение вызывает неравномерную освещённость и появление «горячих точек» — зон локального перегрева, которые снижают выработку энергии, ускоряют износ фотоэлементов и сокращают срок службы модуля.

Для минимизации негативных последствий разработаны гидрофобные, антистатические и самоочищающиеся покрытия, уменьшающие налипание загрязнений. Мониторинг состояния панелей с помощью тепловизоров и камер высокого разрешения позволяет оперативно выявлять участки, нуждающиеся в обслуживании. Важен и угол наклона модулей: при оптимальном угле они лучше очищаются дождём. Проблему перегрева решают методами пассивного охлаждения и активными водяными системами. Одним из наиболее эффективных способов защиты считается использование голографической плёнки, которая предотвращает перегрев от инфракрасного излучения и повышает генерацию энергии за счёт миниатюрных призмаконов-концентраторов в структуре плёнки [5,6].

Выводы

Использование методик поиска ТММ позволяет эффективно использовать фотоэлектрические модули. Несмотря на это работа в ТММ может подвергаться ФЭМ работе в условиях, которые снижают ресурс.

Одним из таких условий является частичное затенение лицевой поверхности модулей, так как ТММ может попасть в область ВАХ, где затененные ячейки не исключены из работы шунтирующими диодами. Эта причина позволяет поставить цель дальнейших исследований в этой области.

Последовательное использование методов «Постоянного напряжения и тока» с одним из остальных позволит определять наличие затененных участков и избежать работы в режиме

работы, способном привести к повреждению затененных модулей.

Список литературы

1. Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашского университета. — № 3. — С. 76–93.
2. А.Г. Возмилов, С.А. Малюгин, А.А. Малюгина Алгоритмы слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей // Вестник ЧГАА. 2014. Том 70. С. 18–25.
3. Д.А. Безик, А.А. Халюзин Методы отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сборник материалов международной научно-технической конференции, Брянск, 17–19 апреля 2023 года. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2023. С. 52–65.
4. Пахомов, П. А. Методы отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) // Матрица научного познания. 2021. № 6-2. С. 57–65.
5. И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов Повышение эффективности работы солнечных электростанций: анализ факторов перегрева, загрязнения и деградации фотоэлектрических модулей // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2025. — Т. 10, № 1(39). С. 116–124. — DOI 10.25744/genb.2025.1.39.016.
6. Д.С. Горынцев, О.Е. Куракина Влияние различных видов загрязнений фотоэлектрических модулей на выработку электроэнергии солнечных электростанций // Техника и технология современных производств: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 06–07 мая 2025 года. — Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. С. 83–86.

References

1. Malinin G.V., Serebryannikov A.V Maximum power point tracking for PV array // Vestnik Chuvashskogo universiteta, 2016, no. 3, pp. 76–93.
2. Vozmilov A.G., Malyugin S.A., Malyugina A.A. Maximum power point tracking algorithms of photoelectric converters. Vestnik ChSAA, 2014, vol. 70, pp. 18–25
3. D.A. Bezik, A.A. Kalyuzin. Methods for

Tracking the Maximum Power Point of Solar Panels // Problems of Energy Supply, Automation, Informatization and Environmental Management in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Bryansk, April 17–19, 2023. Bryansk: Bryansk State Agrarian University, 2023. Pp. 52-65.

4. Pakhomov, P. A. Methods for Tracking the Maximum Power Point (MPP) // Matrix of Scientific Knowledge. 2021. No. 6-2. Pp. 57-65.

5. I.M. Kirpichnikova, I.B. Makhsumov. Improving the Efficiency of Solar Power Plants: Analysis of Overheating, Contamination and

Degradation Factors of Photovoltaic Modules // Grozny Natural Science Bulletin. 2025. – Vol. 10, No. 1(39). Pp. 116-124. – DOI 10.25744/genb.2025.1.39.016.

6. D.S. Goryntsev, O.E. Kurakina. Influence of Various Types of Contamination of Photovoltaic Modules on the Electricity Generation of Solar Power Plants // Machinery and Technology of Modern Production: Collection of Papers of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Penza, May 6–7, 2025. – Penza: Penza State Agrarian University, 2025. Pp. 83-86.

Сведения об авторах

Заварухин Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия, zavarukhinva@susu.ru.

Шашкин Алексей Владимирович – магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия, alvlshash2@gmail.com.

About the authors

Zavarukhin Vladimir Aleksandrovich – Ph.D, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, zavarukhinva@susu.ru.

Shashkin Alexey Vladimirovich – master's student of the Department of Electric Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, alvlshash2@gmail.com.

Дата поступления рукописи: 06.05.2026

Дата принятия рукописи: 05.06.2026

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СООТНОШЕНИЯ ПОТОКОВ

- **Базыкин Д.А.**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия
- **Дахин С.В.**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF A THERMOELECTRIC GENERATOR UNIT WITH CONTROL OF THE QUANTITATIVE FLOW RATIO

- **Bazykin D.A.**, Ph.D., Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
- **Dakhin S.V.**, Ph.D., Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

В работе представлены результаты экспериментов, основной задачей которых является определение эксплуатационных параметров экспериментального образца термоэлектрической генераторной установки, предназначенной для автономной генерации электрической энергии на децентрализованных объектах нефте- и газодобывающей отраслей промышленности.

В ходе проведенных исследований определены такие характеристики, как температура, давление и объемный расход потоков рабочего тела – воздуха, а также изменение максимальной удельной мощности генерируемого электрического тока при выбранных режимах функционирования и построены графики зависимости указанных параметров от положения регулировочного винта, входящего в состав противоточной вихревой трубы, который позволяет изменять количественное соотношение холодного и горячего потоков рабочего тела.

В результате анализа полученных данных сделан вывод о наиболее эффективных режимах эксплуатации рассматриваемой установки.

Ключевые слова: вихревая труба, термоэлектрические генераторные модули, электроэнергия, экспериментальная установка, количественное соотношение потоков, эксплуатационные характеристики.

This paper presents the results of experiments aimed at determining the operating parameters of a prototype thermoelectric generator unit designed for autonomous electric power generation at decentralized oil and gas production facilities.

The study determined parameters such as temperature, pressure, and volumetric flow rate of the working fluid (air), as well as changes in the maximum specific power of the generated electric current under selected operating conditions. Graphs were constructed showing the dependence of these parameters on the position of the adjusting screw included in the counter-current vortex tube, which allows for changing the ratio of cold and hot working fluid flows.

Analysis of the obtained data allowed us to conclude on the most efficient operating modes for this unit.

Key words: vortex tube, thermoelectric generator modules, electric power, experimental setup, flow ratio, operating characteristics.

Введение

Задача автономного электрообеспечения оборудования малой мощности, систем и средств автоматики, а также катодной защиты трубопроводов в нефте- и газодобывающей отраслях промышленности может быть решена посредством применения термоэлектрических генераторных модулей [1], являющихся одними из основных составляющих термоэлектрической генераторной установки, принцип работы которой основан на термическом разделении газообразного потока в противоточной вихревой трубе за счет реализации вихревого эффекта Ранка-Хилша на холодный и горячий газообразные потоки, в последующем направляющиеся в каналы термоэлектрического генератора, который представляет собой два параллельных канала прямоугольного сечения, между которыми закреплены термоэлектрические генераторные модули. В нем за счет подачи тепла на одну сторону термоэлектрических генераторных модулей и отвода тепла с противоположной стороны выполняется генерация электроэнергии [2].

Описание экспериментальной установки

Представленная в работе экспериментальная установка изображена на рис. 1.

В составе разработанной термоэлектрической генераторной установки имеется противоточная вихревая труба NexFlow 50040H, номинальный расход газа на входе в которую составляет 1133 л/мин.

По мере подачи газообразного потока во входной патрубке вихревой трубы, тангенциально – в камеру вихревого энергоразделения, выполняется его завихрение с одновременным термическим разделением на холодный и горячий потоки, при этом холодный поток направляется по приосевой области вихревой трубы к выходному участку холодного потока, а горячий поток движется по пристеночной, периферийной зоне вихревой трубы к выходному участку горячего потока [3].

Вихревая труба NexFlow 50040H в выходном участке горячего потока содержит регулировочный винт, позволяющий изменять количественное соотношение потоков.



Рис. 1. Экспериментальная термоэлектрическая генераторная установка

Актуальность исследования

В работе [4] были проведены теоретические и экспериментальные исследования, заключающиеся в определении коэффициента энерго-разделения потоков при различных положениях указанного регулировочного винта и варьировании значений расхода входящего газа. При этом отсутствуют данные о реальных значениях давления, расхода и температуры холодного и горячего потоков.

Авторами [5] представлены эмпирические данные зависимости расхода газообразного рабочего тела на входе, температуры, расхода горячего потока и теплосодержания горячего воздуха от давления входного потока для той же вихревой трубы.

В представленных данных не содержится сведений об изменении упомянутых параметров при регулировании количественного соотношения холодного и горячего потоков.

В связи с вышеизложенным, исследование, заключающееся в экспериментальном определении параметров потоков, а также изменения максимальной удельной мощности электрического тока, генерируемого термоэлектрической генераторной установкой, при регулировании количественного соотношения потоков в вихревой трубе, является достаточно актуальным.

Результаты проведенных экспериментов

Из руководства по эксплуатации и [6] известно, что максимальная эффективность термического вихревого энергоразделения газа в используемой при экспериментах вихревой трубе достигается при давлении потока рабочего тела на входе в трубу, равном 6,9 бар.

В ходе исследований было принято решение о том, что значения параметров газообразных потоков воздуха и изменения максимальной удельной мощности генерируемого электрического тока при смене положения регулировочного винта будет осуществляться в условиях указанного давления.

Графические результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 2 – рис. 6. На рис. 2 показаны графические зависимости значений температуры входного, горячего и холодного потоков при варьировании числа оборотов регулировочного винта.

На рис. 3 представлены графические зависимости давления горячего и холодного потоков от числа оборотов регулировочного винта.

На рис. 4 изображены графические зависимости значений объемного расхода холодного и горячего потоков от числа оборотов регулировочного винта.

На рис. 5 показаны графики изменения температуры холодного и горячего потоков на выходе из каналов термоэлектрической генераторной установки от числа оборотов регулировочного винта.

Экспериментальным путем было установлено, что значение максимальной удельной мощности электрического тока, генерируемого термоэлектрическими генераторными модулями, использующимися в установке, в представленных условиях составило 3,15 Вт на 1 м² поверхности каналов. Данное значение было получено при числе оборотов регулировочного винта, равном 2,5. По результатам измерений мощности был построен график изменения удельной мощности электрического тока, генерируемого термоэлектрической генераторной установкой в условиях изменения числа оборотов регулировочного винта вихревой трубы, представленный на рис. 6.

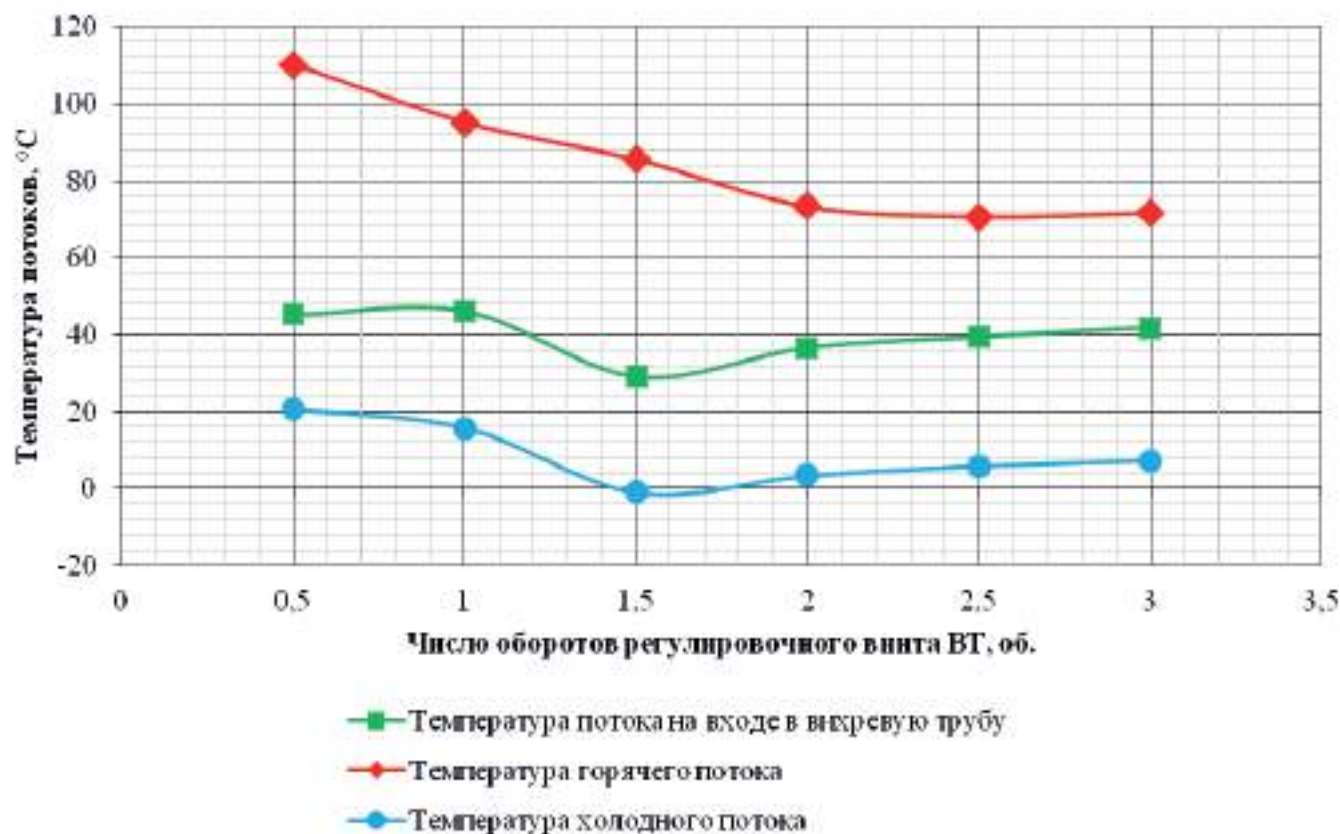


Рис. 2. Зависимость температур потоков от числа оборотов регулировочного винта вихревой трубы

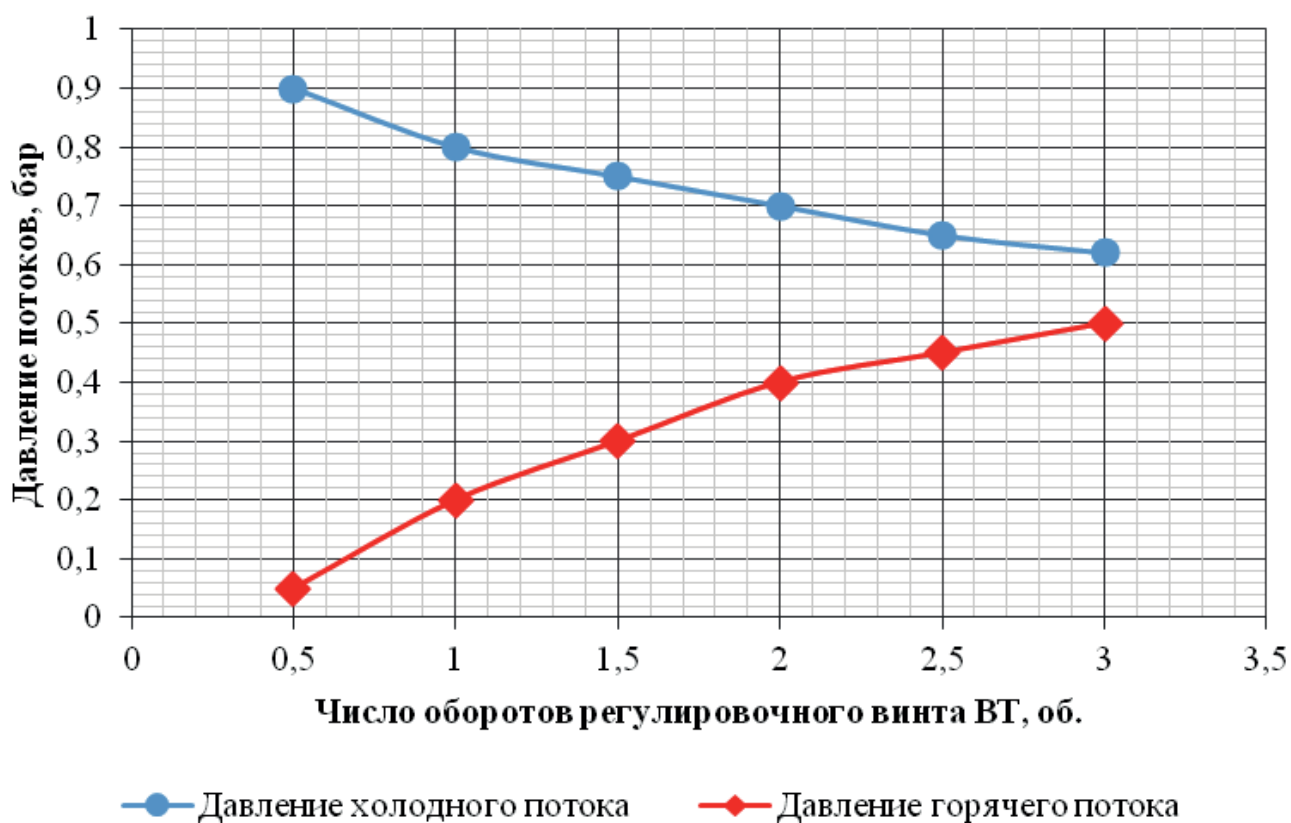


Рис. 3. Зависимость давления холодного и горячего потоков от числа оборотов регулировочного винта вихревой трубы

Выводы

Анализируя полученные графические зависимости, можно сделать вывод о том, что при достаточно слабом открытии проходного сечения горячего выходного участка вихревой трубы, соответствующего 0,5 оборотам регулировочного винта, имеются наивысшие значения разности температур, давления и объемного расхода между холодным и горячим потоками, а численные значения разности температур ΔT , давлений Δp , объемных расходов ΔQ при этом составляют $\Delta T=81,6$ °С, $\Delta p=0,85$ бар, $\Delta Q=50,9$ м³/ч. При дальнейшем открытии проходного сечения (повороте регулировочного винта в сторону раскручивания) происходит постепенное снижение разности указанных параметров до значений $\Delta T=56,4$ °С, $\Delta p=0,2$ бар, $\Delta Q=30,5$ м³/ч, что соответствует трем полным оборотам винта. При этом удельная мощность электрического тока, генерируемого термоэлектрическими генераторными модулями, возрастает до определенного максимума, соответствующего 2,5 оборотам винта. Также при открытии проходного сечения выходного участка горячего потока – от 0,5 до 2,5 оборотов регулировочного винта, выполня-

ется увеличение объемного расхода упомянутого потока на 13,4 м³/ч, причем его температура снижается на 39,5 °С, в следствие чего сокращается температурный перепад между холодным и горячим потоками рабочего тела.

Данный факт указывает на то, что в представленных условиях наибольшее влияние на эффективность генерации электроэнергии оказывают объемные расходы потоков. Однако в случае увеличения разности температур между ними и общем увеличении рабочего температурного диапазона эффективность будет значительно выше в связи с тем, что максимальный КПД генерации электрической энергии используемыми в установке термоэлектрическими генераторными модулями достигается в диапазоне температур +50/+150 °С.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных экспериментальных работ удалось определить такие эксплуатационные параметры термоэлектрической генераторной установки, как температура, давление и объемный расход потоков рабочего тела, а также изменение максимальной удельной

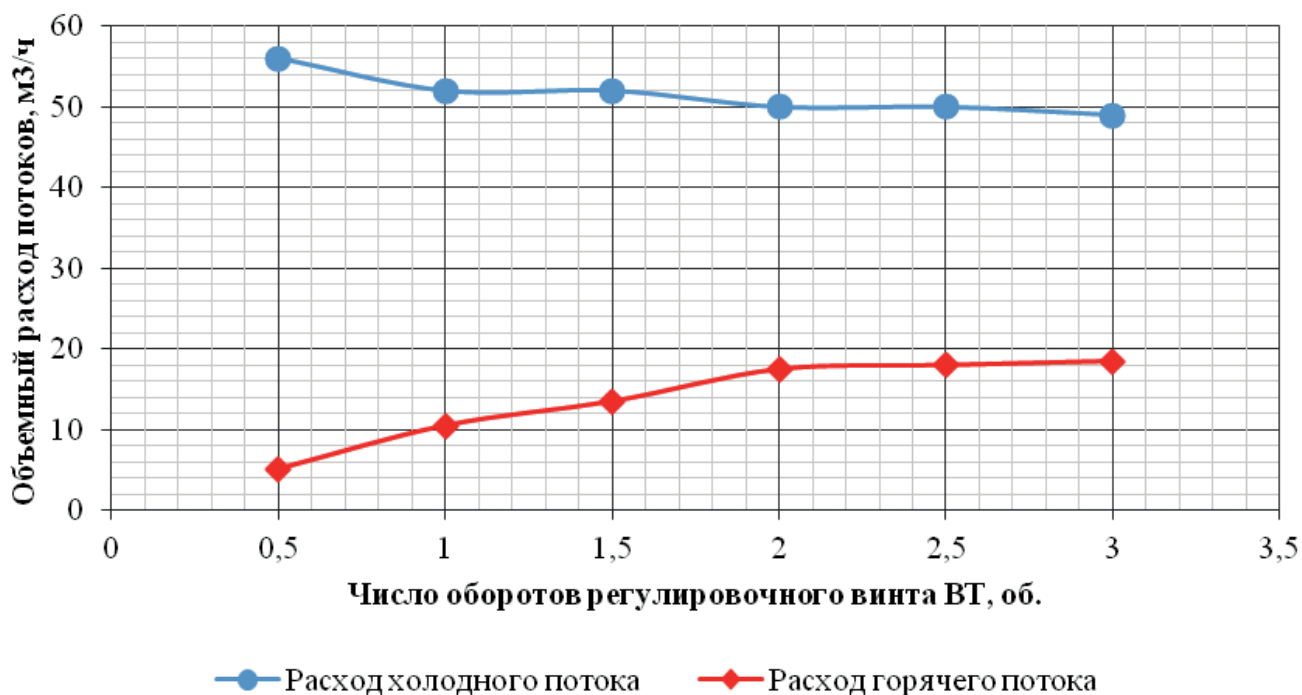


Рис. 4. Зависимость объемного расхода холодного и горячего потоков от числа оборотов регулировочного винта вихревой трубы

мощности генерируемого электрического тока в зависимости от положения регулировочного винта, позволяющего регулировать количественное соотношение холодного и горячего потоков, выходящих из вихревой трубы.

Список литературы

1. Научные положения и принципы проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации источников генерации энергии для автономных потребителей малой мощности

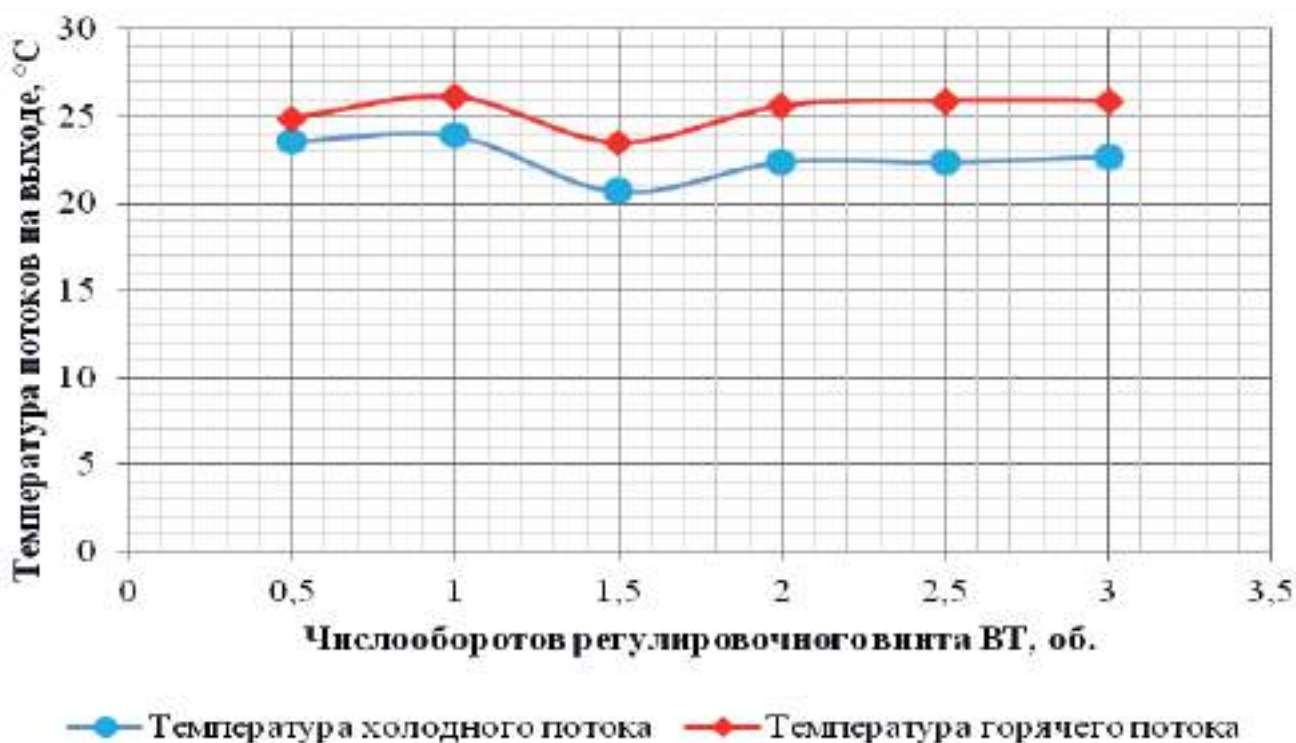


Рис. 5. Зависимость температуры потоков на выходе от числа оборотов регулировочного винта

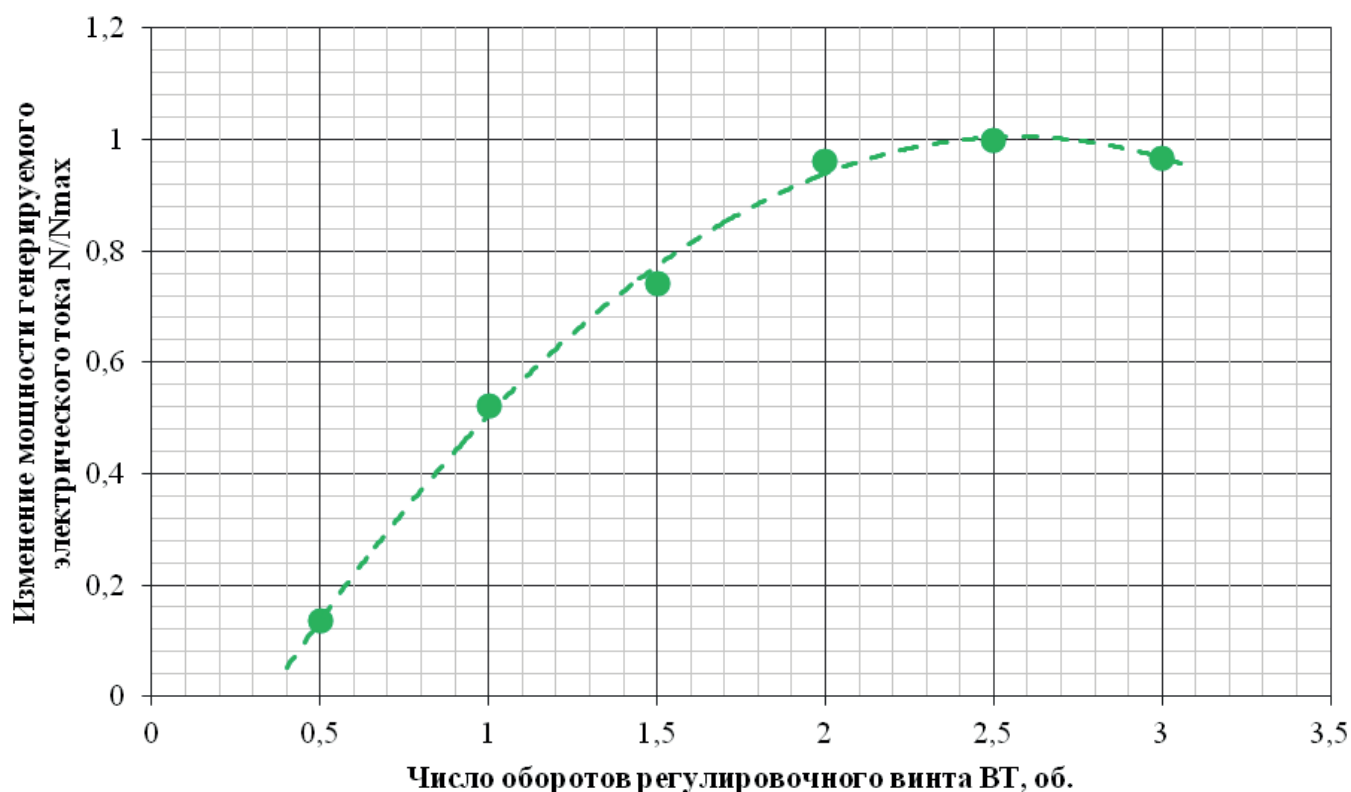


Рис. 6. Изменение удельной мощности генерируемого электрического тока в зависимости от числа оборотов регулировочного винта вихревой трубы

/ А. С. Григорьев, В. А. Карасевич, А. О. Пименов [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. – 2019. – № 2(78). – С. 92-103.

2. Создание экспериментальной электрогенерирующей установки с применением вихревого эффекта Ранка-Хилша / Д. А. Базыкин, В. А. Ильичев, В. В. Курасов, А. В. Бараков // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения: труды 24-й научно-технической конференции, Воронеж, 16 июня 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. – С. 3-10.

3. Белоусов, А.М. Исследование возможностей повышения энергоэффективности вихревой трубы Ранка-Хилша / А.М. Белоусов, И.Х. Исрафилов, С.И. Харчук // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.7: в 2-х ч. Ч.2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – С.112-121

4. Chatterjee M., Mukhopadhyay S., Vijayan P.K. 1-D model for mass transfer calculation in vortex tube using heat and mass transfer analogy // American Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Т. 4. – №. 1. – С. 1-24.

5. Орлов, А. Ю. Влияние конструктивных особенностей вихревых труб на параметры процесса термосепарации / А. Ю. Орлов, Н. В.

Орлова, М. В. Савушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 619-624.

6. Chatterjee M., Mukhopadhyay S., Vijayan P.K. Experimental study of heat and mass transfer in Ranque-Hilsch Vortex tube // Int J Adv Res. – 2016. – Т. 4. – №. 7. – С. 667-674.

References

1. Scientific Provisions and Principles of Design, Operation, and Decommissioning of Energy Sources for Autonomous Low-Power Consumers / A. S. Grigoriev, V. A. Karasevich, A. O. Pimenov [et al.] // Science and Technology in the Gas Industry. - 2019. - No. 2 (78). - Pp. 92-103.

2. Development of an Experimental Electric Generating Plant Using the Ranque-Hilsch Vortex Effect / D. A. Bazykin, V. A. Ilyichev, V. V. Kurasov, A. V. Barakov // Physical and Technical Problems of Power Engineering, Ecology, and Energy Resource Conservation: Proceedings of the 24th Scientific and Technical Conference, Voronezh, June 16, 2022. - Voronezh: Voronezh State Technical University, 2022. - Pp. 3-10.

3. Belousov, A.M. Study of Possibilities of Improving the Energy Efficiency of a Rank-Hilsch

Vortex Tube / A.M. Belousov, I.Kh. Israfilov, S.I. Kharchuk // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. Issue 7: in 2 parts. Part 2. Tula: Tula State University Publishing House, 2015. - Pp. 112-121

4. Chatterjee M., Mukhopadhyay S., Vijayan P.K. 1-D Model for Mass Transfer Calculation in a Vortex Tube Using Heat and Mass Transfer Analogies // American Journal of Heat and Mass Transfer. - 2017. - Vol. 4. - No. 1. - Pp. 1-24.

5. Orlov, A. Yu. Influence of design features of vortex tubes on the parameters of the thermal separation process / A. Yu. Orlov, N. V. Orlova, M. V. Savushkin // Bulletin of Tambov State Technical University. - 2013. - Vol. 19, No. 3. - P. 619-624.

6. Chatterjee M., Mukhopadhyay S., Vijayan P.K. Experimental study of heat and mass transfer in RanqueHilsch Vortex tube // Int J Adv Res. - 2016. - Vol. 4. - No. 7. - P. 667-674.

Сведения об авторе

Базыкин Денис Александрович – кандидат технических наук, ассистент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия, bazykin.denis@yandex.ru.

Дахин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия, svdakhin@ya.ru.

About the author

Bazykin Denis Aleksandrovich – Ph.D, Assistant Professor, Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, bazykin.denis@yandex.ru

Dakhin Sergey Viktorovich – Ph.D, Associate Professor, Associate Professor, Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, svdakhin@ya.ru.

Дата поступления рукописи: 07.04.2026

Дата принятия рукописи: 05.06.2026

Турбомашины и поршневые двигатели

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ ГПУ В ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

- **Осинцев К.В.**, доктор техн. наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

A REVIEW OF POTENTIAL FOR INCREASING THE USE OF AUTONOMOUS COGENERATION SYSTEMS BASED ON GAS RECIPROCATING PLANTS IN THE CHELABINSK REGION

- **Osintsev K.V.**, D.Sc., South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Для предприятий, стремящихся к оптимизации расходов, газопоршневые электростанции (ГПЭС) представляют собой одно из наиболее выгодных решений. Они позволяют существенно сократить затраты на электроэнергию – для малого и среднего бизнеса экономия может быть значительной по сравнению с тарифами энергосетей.

Кроме того, ГПЭС избавляют от зависимости от централизованных сетей, подключение к которым зачастую является проблематичным или вовсе нереализуемым.

Важно отметить, что при организации собственной генерации с помощью ГПЭС, все вложенные средства идут на приобретение собственного актива – оборудования, а не на оплату услуг по присоединению и согласованию мощности, которые, по сути, являются инвестициями в развитие сетевых монополий. В свете текущего роста цен на электроэнергию, мини-ТЭЦ на базе ГПЭС становятся актуальным инструментом для промышленных предприятий, желающих обеспечить себя собственной, более дешевой энергией.

Ключевые слова: преимущество когенерации, автономность, теплота, электроэнергия, газопоршневая установка

For companies seeking to optimize costs, gas reciprocating power plants (GRPPs) represent one of the most cost-effective solutions. They significantly reduce electricity costs—for small and medium-sized businesses, savings can reach significant quantity compared to grid tariffs.

Furthermore, GRPPs eliminate dependence on centralized grids, connection to which is often problematic or even impossible. It is important to note that when organizing in-house generation using GRPPs, all invested funds are used to acquire the equipment, rather than to pay for connection and capacity approval services, which are essentially investments in the development of grid monopolies.

In light of the current rise in electricity prices, mini-CHP plants based on gas turbine power plants are becoming a viable option for industrial enterprises seeking to provide their own, cheaper energy.

Key words: advantages of cogeneration, autonomy, heat, electricity, gas piston unit.

Введение

Энергетическая стратегия России формирует новые ориентиры развития энергетического сектора в рамках перехода российской экономики на инновационный путь развития, предусмотренный концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации. На данный момент помимо федеральных планов развития энергетики, существуют региональные запросы на подключение к автономным источникам электро- и теплоснабжения. Главной целью энергетической программы Челябинской области является обеспечение промышленного и аграрного комплекса энергоносителями по ценам, приемлемым с точки зрения конкурентоспособности местной продукции на федеральном рынке, создание условий для динамического развития региона и снижение нагрузки на природную среду. Для достижения этой цели необходимы активная политика энергосбережения, реконструкция действующих ТЭС, использование новых перспективных энергетических технологий, максимальное вовлечение в топливный цикл местных ресурсов и дешевых ресурсов соседних регионов.

Главные цели развития энергетики Челябинской области заключаются в следующем: обеспечение стабильного и бесперебойного снабжения экономики и жителей региона электроэнергией; поддержание и совершенствование единой энергетической системы области; повышение эффективности работы и устойчивого развития электроэнергетики за счет внедрения передовых технологий; модернизация существующих газовых теплоэлектростанций, в частности, замена устаревших паросиловых турбин на более современные парогазовые установки; снижение негативного воздействия на окружающую среду. Значительная часть основных фондов в электроэнергетике Челябинской области устарела: износ составляет 40-45%, а в сельских распределительных сетях этот показатель превышает 55%. Отечественное оборудование, являющееся основой отрасли, должно соответствовать современным требованиям. Необходимо не только поддерживать работоспособность существующего оборудования, но и активно обновлять основные производственные мощности, внедряя новые технологии для производства и распределения электроэнергии и тепла.

Одной из актуальных проблем в теплоэнергетике является сложность подключения к централизованным сетям, особенно для удаленных объектов. Это требует значительных финансовых вложений с длительным сроком окупаемости. Однако, потребители желают обеспечить свою энергетическую независимость. Для этого разработано специальные технические решения в области когенерации на базе газопоршневых установок. Компактные решения позволяют минимизировать затраты на подключение к централизованным сетям. Их можно размещать непосредственно в существующих зданиях котельных, если позволяют площади, что упрощает процесс установки.

Современные технологии

Идея одновременной выработки электрической и тепловой энергии с использованием двигателей внутреннего сгорания (ДВС) известна давно. Первые такие установки применялись на транспорте и для резервного электроснабжения. Сегодня в промышленности выпускаются два основных типа газопоршневых двигателей. Газовые двигатели с искровым зажиганием – это газодизели, где воспламенение газозоудной смеси происходит за счет впрыска жидкого топлива. Газопоршневые электростанции используют газопоршневые двигатели, которые вырабатывают электроэнергию путем сжигания природного газа.

На фоне подорожания топлива энергетический сектор стремится к более экономичным методам генерации электроэнергии. Стабильное энергоснабжение также затруднено в системах с крупными установками. В связи с этим, наряду с развитием «большой» энергетики, крайне важно наращивать потенциал «малой» энергетики. Малая энергетика способствует укреплению энергетической безопасности и снижению зависимости потребителей от централизованных поставок. Её роль становится всё более значимой, учитывая текущие социально-экономические тенденции в стране.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к газопоршневым электростанциям (ГПЭС), использующим природный газ. При нынешних ценах на дизельное топливо и газ, топливная составляющая себестоимости электроэнергии для ГПЭС оказывается в несколько раз

ниже, чем у дизельных аналогов. Помимо своей экономичности, ГПЭС демонстрируют отличные экологические характеристики, поскольку состав их выхлопных газов соответствует самым строгим международным нормам. Более того, работа на газе значительно увеличивает ресурс самого двигателя внутреннего сгорания.

Применение ГПЭС целесообразно в зонах, имеющих систему газоснабжения. В таких условиях по стоимости электроэнергии они могут конкурировать с системами централизованного электроснабжения, использующими мощные традиционные электростанции, а по срокам окупаемости капиталовложений существенно опережать их.

Пример использования ГПЭС для когенерации промышленного предприятия

Представим, что источником теплоснабжения завода и одного из микрорайонов города, прилегающего к заводу, является водогрейная котельная. В котельной установлены котлы КВГМ-10 (4 штуки). Суммарная тепловая нагрузка потребителей примерно 30 МВт (в отопительный период).

На территории завода предполагается установка газопоршневой электростанции. Для газопоршневой станции предусмотрена реконструкция существующего здания ремонтно-испытательных мастерских и пристроенных помещений. В газопоршневой станции предполагается установка двух газопоршневых агрегатов с генерацией электроэнергии в 0,6 МВт и теплоты в виде горячей воды с температурным графиком 95/70 °С в количестве 0,6 МВт для нужд завода и на собственные нужды станции.

При этом теплоснабжение района теплоснабжения не меняется и для этого будет использоваться существующая водогрейная котельная. Тепловая генерация от газопоршневой электростанции предусмотрена до существующих тепловых сетей от водогрейной котельной. Теплофикационная обратная вода от части потребителей с температурой 70 °С подается в теплообменные аппараты выхлопных газов газопоршневых агрегатов и нагревается до 95 °С. Потребителями электрической и тепловой энергии от газопоршневой электростанции будут являться здания только на территории завода.

Выбор ГПУ российского производства

Первые зарубежные установки поступили в начале 90-х годов. Опыт их эксплуатации был невелик. Из-за высокой стоимости, длительного срока окупаемости, жестких требований к условиям эксплуатации широкого распространения они не получили. Однако, в период 2000-х годов рынок ГПУ в России стал наполняться агрегатами австрийского, американского и японского производства. Первые отечественные газопоршневые электростанции предложил «Барнаултрансмаш» на базе своего двигателя Д-12. Однако, сравнительно малый ресурс двигателя (опыт эксплуатации на транспорте), низкая степень автоматизации и неспособность этих станций работать синхронно с внешней сетью не позволили им получить признания на рынке. Еще целый ряд предприятий, в том числе «Ярославский моторный завод», предлагают газопоршневые станции, решающие в основном задачи автономного, либо резервного питания. На природный газ был переведен самый надежный, с точки зрения авторемонтников и автомобилистов, ярославский дизель ЯМЗ-238, мощности которого с запасом хватает для работы со 100-киловаттным синхронным генератором. Шкаф управления на базе микропроцессорной техники обеспечил надежную и безопасную синхронизацию с внешней сетью, работу аварийных защит, дистанционный контроль и управление по сотовой связи.

Газопоршневые двигатели российского производства, представленные на рынке, имеют единичную мощность порядка от 100 – 1000 кВт.

Выводы

Одним из главных преимуществ использования газопоршневых электростанций является снижение стоимости энергии. Разница для малых и средних предприятий может составлять 3-4 раза против стоимости закупки электроэнергии от сетей. Кроме того, к плюсам газопоршневых электростанций нужно отнести отсутствие необходимости обязательного подключения к электрическим сетям, что особенно затруднительно, а в большинстве случаев невозможно. Важно понимать, что при собственной генерации, организованной с помощью газопоршневых электростанций, все капитальные затраты – это стоимость самого оборудования, остающегося в

собственности потребителя, а не плата за согласование мощности и техническое присоединение, которая инвестируется в развитие сетевых компаний.

В связи с увеличением цен на электрическую энергию на промышленных предприятиях встает вопрос собственной выработки электрической энергии с помощью мини ТЭЦ.

Список литературы

1. Осинцев, К. В. Расчет теплообменников системы утилизации теплоты газопоршневой установки / К. В. Осинцев // Тепловые электрические станции. – 2026. – № 1(5). – С. 18-21.

2. Тюрина, О. А. Газопоршневая установка как источник автономной генерации электроэнергии / О. А. Тюрина // Аллея науки. – 2023. – Т. 1, № 1(76). – С. 1011-1014.

3. Газопоршневая электростанция. Особенности выбора и эксплуатации // Главный энергетик. – 2009. – № 11. – С. 21-24.

References

1. Osintsev, K. V. Calculation of heat exchangers for a gas piston unit heat recovery system / K. V. Osintsev // Thermal power plants. - 2026. - No. 1 (5). - Pp. 18-21.

2. Tyurina, O. A. Gas piston unit as a source of autonomous electricity generation / O. A. Tyurina // Alley of Science. - 2023. - Vol. 1, No. 1 (76). - P. 1011-1014.

3. Gas piston power plant. Features of selection and operation // Chief Power Engineer. - 2009. - No. 11. - P. 21-24.

Сведения об авторе

Осинцев Константин Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Россия, osintcevk@susu.ru.

About the author

Osintsev Konstantin Vladimirovich – D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, osintcevk@susu.ru.

Дата поступления рукописи: 12.04.2026

Дата принятия рукописи: 05.06.2026

