



**ICES-2023B**  
**BELGOROD**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

VIII Международная  
научно–техническая  
конференция

Белгород,  
7-8 декабря 2023 г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования**

**«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)**

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ICES-2023В)**

**VIII Международная  
научно-техническая  
конференция**

**Секция молодых ученых**

**Материалы конференции**

**(Белгород, 7-8 декабря 2023 г.)**

**Белгород  
2023**

УДК 620.9(082)

ББК 3

Э 65

**Энергетические** системы (ICES-2023В) [Электронный ресурс]: материалы VIII  
Э65 Междунар. науч.-техн. конф., 7-8 декабря 2023 г. Секция молодых ученых / БГТУ  
им. В.Г. Шухова; отв. ред. П.А. Трубаев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – 84 с. –  
1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: ПК; 512 Мб ОЗУ; сво-  
бодное место на HDD 12 Мб; Microsoft Windows XP и выше; дисковод CD-ROM;  
программа для чтения файлов формата pdf.

ISBN 978-5-361-01308-1

В сборнике опубликованы доклады студентов, магистрантов и аспирантов, пред-  
ставленные в секции молодых ученых VIII Международной научно-технической кон-  
ференции «Энергетические системы (ICES-2023В)».

Сборник предназначен для широкого круга научных и инженерных работников,  
а также аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

Статьи прошли процедуру рецензирования и публикуются в авторской редакции.  
Авторы статей, включенных в сборник, сохраняют исключительные права на разме-  
щенные в сборнике материалы и вправе использовать свои произведения независимо  
от сборника.

**УДК 620.9(082)**

**ББК 3**

ISBN 978-5-361-01308-1

© БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
<b>Барашков И.А., Кравченко Н.А.</b> <i>Научный руководитель: аспирант Леонов Е.С.</i> Исследование зависимостей температуры стенки трубопровода от различных параметров для определения температуры теплоносителя .....	6
<b>Егоров М.Ю., Антипина А.В.</b> Расчет энергоснабжения частного дома на солнечных батареях при различных климатических условиях.....	15
<b>Егоров М.Ю., Антонов Н.С.</b> Обеспечение энерговооружённости беспилотного летательного аппарата за счёт применения различных источников питания .....	22
<b>Зубко Д.А., Ястребов А.В.</b> <i>Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Скурятин Ю.В.</i> Моделирование подшипниковых токов в асинхронном двигателе с двухуровневым преобразователем частоты.....	31
<b>Кочеткова А.А., Шакирзянов М.А.</b> <i>Научный руководитель: д-р техн. наук, доцент Иванов Д.А.</i> Исследование разрядных процессов в высоковольтной изоляции оптическим (УФ) методом .....	38
<b>Кутилина К. А.</b> <i>Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Абасев Ю. В.</i> Теоретический и реальный эффект тепловой модернизации школы.....	44
<b>Назаров Ж.И., Пушмина А.Н.</b> <i>Научный руководитель: ассистент Рыжов Н.А.</i> Устранение гармоник в электрофицированных железных дорогах переменного тока напряжением 25 кВ с использованием новой структуры гибридного фильтра .....	48
<b>Садретдинов И.И.</b> <i>Научный руководитель: канд. тех. наук, доцент Закиров Р.Н.</i> Вакуумная изоляция как альтернатива стандартной изоляции тепловых сетей .....	54
<b>Селиванова В.А.</b> <i>Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Амузаде А.С.</i> Применение элементов SmartGrid для регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности с помощью STATCOM .....	58
<b>Смирнов Д.А.</b> <i>Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Соколова Т.Е.</i> Использование математических функций Excel для решения задач свободной конвекции .....	61
<b>Тарасова М.В.</b> <i>Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Закиров Р.Н.</i> Топливные элементы для генерации электрической энергии на промышленном предприятии.....	67
<b>Ходыкина А.А.</b> <i>Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Фролов А.С.</i> Численное исследование измерительных характеристик вихревых расходомеров с телом обтекания .....	75



## ПРЕДИСЛОВИЕ

VIII-я международная научно-техническая конференция «Энергетические системы (ICES-2023В)» состоялась 7-8 декабря 2023 г. на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова).

Рабочие языки конференции – русский и английский. На конференцию после прохождения процедуры рецензирования были отобраны 29 докладов, в том числе 13 – в секцию молодых ученых. Всего в конференции приняли участие 60 человек из 19 вузов и пяти предприятий, расположенных в 15 российских регионах.

Количественный состав авторов докладов следующий: д-ра техн. наук, профессора – 7 чел.; канд. наук, доценты – 16 чел.; инженеры, ассистенты, старшие преподаватели, мл. научн. сотrud. и др. не остепенённые – 7 чел.; аспиранты – 8 чел.; студенты – 29 чел.

### УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ

- Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
- Воронежский государственный технический университет
- Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк
- Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
- Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
- Казанский государственный энергетический университет
- Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал ИрГУПС)
- Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
- Новосибирский государственный технический университет
- ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород
- ООО «Холдинговая компания Элинар», г. Наро-Фоминск
- ПАО «Гайский ГОК», г. Гай Оренбургской области
- Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург
- Самарский государственный технический университет
- Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
- Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
- Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
- Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
- Тамбовский государственный технический университет
- Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма Свердловской обл.
- Университет науки и технологий МИСиС, г. Москва
- Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
- Филиал ПАО «Россети Центр» – «Белгородэнерго», г. Белгород
- Филиал ПАО «Россети Центр» – «Воронежэнерго», г. Воронеж



## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ



### **Трубаев Павел Алексеевич**

Председатель программного комитета  
Председатель секции «Энергосбережение и энергоэффективность»

*Д-р техн. наук, доц., профессор кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)*



### **Белоусов Александр Владимирович**

Председатель секции «Электроэнергетика и электротехника»

*Канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики и электроники, зав. каф. электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)*



### **Бирюков Алексей Борисович**

Председатель секции «Теплоэнергетика и теплотехника»

*Д-р техн. наук, проф., зав. каф. промышленной теплофизики ДонНТУ (г. Донецк)*



### **Гашо Евгений Геннадиевич**

Председатель секции «Энергетические системы и комплексы»

*Д-р техн. наук, доц., проф. кафедры Промышленных теплоэнергетических систем Национального исследовательского университета «МЭИ», эксперт аналитического центра при Правительстве РФ (г. Москва)*



### **Мозговой Николай Васильевич**

Председатель секции «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение в технологиях»

*Д-р техн. наук, проф., зав. каф. Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ВГТУ (г. Воронеж)*



### **Радченко Вадим Витальевич**

*Канд. экон. наук, Председатель Совета депутатов города Белгорода (г. Белгород)*



### **Удовиченко Злата Викторовна**

*Канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка Донецкой обл.)*



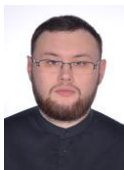
### **Abdouloihabi Mohamed Valid Abdouloihabi**

*PhD, Lecturer, University of Diyala (Baqubah, Diyala)*



### **Marina Kozhukhova**

*PhD, COLLEGE OF Engineering & Applied Science, University of Wisconsin–Milwaukee (Milwaukee)*



### **Леонов Евгений Сергеевич**

технический секретарь

*Инженер кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)*



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ТРУБОПРОВОДА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Барашков И.А., Кравченко Н.А.

Научный руководитель: аспирант Леонов Е.С.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

### **Аннотация**

Для определения параметров среды внутри трубопровода наиболее часто применяются контактные или врезные термодатчики. Контактные термодатчики позволяют определить температуру среды с определенной погрешностью, вызванной термическим сопротивлением стенки трубопровода и влиянием на температуру теплотехнических неоднородностей в месте размещения датчика. Кроме того, для обеспечения достаточной точности измерений необходимо применять тепловую изоляцию, монтируемую поверх датчика и снижающую мобильность прибора до минимума, что значительно снижает его спектр применения. Врезные датчики характеризуются лучшей точностью, но труднее интегрируются в систему, нарушают целостность поверхности трубы, увеличивают гидравлическое сопротивление, больше подвержены износу. Многие изделия этого типа не способны функционировать при высоком давлении внутри трубопроводов, и в химически активных средах. Со временем точность измерений может снижаться в следствие возникновения загрязнений на поверхности гильзы, повышающих термическое сопротивление. Бесконтактные методы измерения температуры с использованием инфракрасных приборов лишен большинства описанных выше недостатков, за исключением низкой точности, что спровоцировано термическим сопротивлением стенки трубы. В работе проведено исследования влияние факторов на разницу температур теплоносителя и наружной поверхности металлических и пластиковых трубопроводов и определены влияющие на эту величину критерии.

**Ключевые слова:** температура, инфракрасный прибор, неразрушающий метод, температурный напор, температура наружной поверхности, стенка трубы, горячая вода, трубопровод.

## RESEARCH OF THE DEPENDENCES OF THE PIPELINE WALL TEMPERATURE ON VARIOUS PARAMETERS TO DETERMINE THE COOLANT TEMPERATURE

Barashkov I.A. Kravchenko N.A

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

### **Abstract**

To determine the parameters of the environment inside the pipeline, contact or mortise temperature sensors are most often used. Contact thermal sensors make it possible to determine the temperature of the medium with a certain error caused by the thermal resistance of the pipeline wall and the influence of thermal inhomogeneities at the location of the sensor on the temperature. In addition, to ensure sufficient measurement accuracy, it is necessary to use thermal insulation mounted on top of the sensor and reducing the mobility of the device to a minimum, which significantly reduces its range of applications. Mortise sensors are characterized by better accuracy, but are more difficult to integrate into the system, violate the integrity of the pipe surface, increase hydraulic resistance, and are more susceptible to wear. Many products of this type are not able to function at high pressure inside pipelines and in chemically active environments. Over time, the ac-



*curacy of measurements may decrease due to the appearance of contamination on the surface of the sleeve, which increases the thermal resistance. Non-contact methods of temperature measurement using infrared devices are free from most of the disadvantages described above, with the exception of low accuracy, which is caused by the thermal resistance of the pipe wall. The work carried out a study of the influence of factors on the difference in temperature of the coolant and the outer surface of metal and plastic pipelines and determined the criteria influencing this value.*

**Keywords:** *temperature, infrared device, non-destructive method, temperature difference, external surface temperature, pipe wall, hot water, pipeline.*

## Введение (Introduction)

Определение фактической температуры теплоносителя в водяных системах теплоснабжения и отопления необходимо в системах контроля, для определения тепловых потерь, при энергетическом обследовании и наладке систем [1]. В настоящее время, не смотря на большое разнообразие теплотехнического оборудования, определить действительную температуру теплоносителя, в случае если датчики не интегрированы в систему или вышли из строя, не нарушая целостности трубопровода, практически невозможно. Установка датчиков, как правило, сопровождается целым рядом негативных факторов, таких как: нарушение целостности и ослабление элементов трубопровода, материальные затраты и временная остановка функционирования участка, подверженного модификации.

Бесконтактное измерение – это метод диагностики, основанный на измерении инфракрасного излучения с поверхностей объектов и определении по нему температуры поверхности. Для проведения измерений используются пирометры, позволяющие определить среднюю температуру в круговой области, определяемой телесным углом прибора, и термографические камеры (тепловизоры), позволяющие получить распределение температур в виде цифрового изображения. Наиболее часто этот метод применяется для определения участков системы, подверженных наибольшим тепловым потерям или, гораздо реже, для определения степени износа трубопровода, вследствие изменения термического сопротивления стенки и увеличения плотности теплового потока через нее.

Принимать температуру теплоносителя за температуру стенки, полученную при помощи контактного или бесконтактного измерения не рекомендуется, так как эти параметры могут заметно отличаться вследствие термического сопротивления стенки, варьирующегося в зависимости от материала или композиции материалов трубы и толщины стенки.

## Современное состояние вопроса

Существуют исследования, схожие по цели, но они не предлагают определения температуры теплоносителя по температуре поверхности трубы, а лишь указывают на существование определённых зависимостей и констатируют низкую точность неразрушающего метода определения температуры среды внутри трубопровода.

В одном из исследований, в результате эксперимента по определению температуры среды при помощи накладных температурных датчиков авторы сообщают, что: «Измерение температуры наружной стенки трубы газопровода позволяет определить температуру газа в трубе с погрешностью ~8%...». Описанный в статье метод предполагает установку стационарного датчика и толстого слоя изоляции поверх него, кроме того, для определения температуры необходимо фиксировать показания датчика в течении более чем «60 минут» [2]. Подобный метод не позволит в оперативной обстановке определить температуру теплоносителя без проведения подготовительных и





монтажных работ. Таким образом, описанный метод практически полностью повторяет недостатки традиционных методов с монтированием датчиков.

Аналогичные недостатки свойственны методу неразрушающего контроля параметров, описанного в статье [3]. Суть метода заключается в монтаже системы датчиков, позволяющих с относительно высокой точностью определить параметры теплоносителя, что целесообразно лишь в случае необходимости контроля параметров. В случае необходимости местного и единоразового измерения, подобный метод экономически не рентабелен. В статье [4] авторы развили идею и предложили более мобильный, дешевый и простой в реализации метод, однако, в отличие от термографического метода, он подразумевает работу с легкодоступными для технического обслуживания трубопроводами, так как для его реализации необходимо находиться в непосредственном контакте с трубопроводом, в противном случае монтаж датчиков невозможен. Термографические камеры, в свою очередь, позволяют измерять температуру поверхностей на некотором расстоянии, что автоматически увеличивает спектр их применения.

В работе [6] по температуре поверхности стены вращающейся печи предлагается оценка тепловых потерь и температуры газа в ней. В работе [6] описан ряд методов теплового контроля, основанного на определении температуры поверхности образца.

Существует схожее, от части, как по поставленной цели, так и по способу реализации, исследование [7], подтвержденное экспериментальными данными, в котором учитывается термическое сопротивление стенки и скорость движения воздушных масс в зоне проведения эксперимента. Но для обработки результатов, полученных экспериментальным путем, необходимо при помощи данных термограммы произвести расчет плотности теплового потока, коэффициентов теплоотдачи, и при помощи компьютерной программы определить искомую температуру среды внутри «трубопроводной обвязки» [8]. Подобный механизм проведения замеров крайне сложен в реализации на практике. Он не подходит для проведения серии замеров в «полевых условиях», хотя обладает высокой точностью.

Целью настоящего этапа исследования является в определение факторов, влияющих на разность температуры теплоносителя и температуры стенки для определения возможности нахождения температуры водяного теплоносителя внутри трубопровода по значению температуры стенки трубы. Финальная цель наших исследований заключается в получении простых для применения таблиц или числовых зависимостей для подтвержденных экспериментально поправочных коэффициентов, позволяющих по измерению температуры стенки трубы определить температуру водяного теплоносителя. В настоящий момент нами уже выведены теоретические зависимости, косвенно подтверждающие реализуемость поставленной задачи.

## Материалы и методы (Materials and Methods)

Линейная плотность теплового потока через цилиндрическую стенку  $q_l$ , Вт/м, имеет вид:

$$q_l = (t_T - t_0)/R = \Delta t/R, \quad (1)$$

где  $t_T$  – температура теплоносителя, °С;  $t_0$  – температура окружающей среды, °С;  $\Delta t = t_T - t_0$  – температурный напор, °С.

Сопротивление теплопередачи через однослойную цилиндрическую стенку  $R$ , м<sup>2</sup>·К/Вт, определяется суммой сопротивления теплопередач от теплоносителя к внутренней стенке трубы  $R_B$ , в материала стенки трубы  $R_{CT}$  и от внешней стенки в окружающую среду  $R_H$ :

$$R = R_B + R_{CT} + R_H. \quad (2)$$



Составляющие общего сопротивления теплопередачи:

$$R_{\text{в}} = (\pi \alpha_{\text{в}} D_{\text{в}})^{-1}; \quad (3)$$

$$R_{\text{ст}} = \ln(D_{\text{н}}/D_{\text{в}})/(2\lambda_{\text{ст}}) \quad (4)$$

$$R_{\text{н}} = (\pi \alpha_{\text{н}} D_{\text{н}})^{-1}; \quad (5)$$

где  $D_{\text{в}}$  – внутренний диаметр трубы, м;  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр трубы, м ( $D_{\text{вн}} = D_{\text{н}} - 2\delta$ , где  $\delta$  – толщина стенки, м);  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи от жидкости к внутренней поверхности трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к окружающей среде в неограниченном объеме, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К).

Температура наружной поверхности стенки трубы  $t_{\text{ст}}$ , °С, определяется из уравнения теплопередачи через цилиндрическую стенку:

$$t_{\text{ст}} = t_0 + q_l R_{\text{н}} = t_0 + (t_{\text{т}} - t_0) R_{\text{н}}/R \quad (6)$$

или

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{т}} - (t_{\text{т}} - t_0) (R_{\text{в}} + R_{\text{ст}})/R. \quad (7)$$

Критериальное уравнение для теплоотдачи при конвективном движении жидкости в трубе [9]:

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}, \quad (8)$$

откуда критерий коэффициент теплоотдачи от конвекции в трубе [10]

$$\alpha_{\text{в}} = 0,023 \text{Re}_T^{0,8} \text{Pr}_T^{0,4} \lambda_T / D_{\text{в}}, \quad (9)$$

где  $\text{Re}_T$  и  $\text{Pr}_T$  – значения критериев Рейнольдса и Прандтля для теплоносителя в трубе;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя.

Критериальное уравнение для конвекции в свободном объеме в случае обтекания горизонтальной трубы [9]:

$$\text{Nu} = 0,5 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} (\text{Pr} / \text{Pr}_{\text{ст}}), \quad (10)$$

откуда коэффициент теплоотдачи для конвекции в свободном объеме в случае обтекания горизонтальной трубы [9]

$$\alpha_{\text{н конв}} = 0,5 (\text{Gr}_0 \cdot \text{Pr}_0)^{0,25} (\text{Pr}_0 / \text{Pr}_{\text{ст}}) \lambda_0 / D_{\text{н}} \quad (11)$$

где  $\text{Gr}_0$  и  $\text{Pr}_0$  – значения критериев Грасгофа и Прандтля для воздуха при температуре при  $t_0$ ;  $\text{Pr}_{\text{ст}}$  – значение критерия Прандтля для воздуха при температуре  $t_{\text{ст}}$ ;  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности воздуха при  $t_0$ .

Коэффициент теплоотдачи для теплообмена излучением [11]:

$$\alpha_{\text{в изл}} = \varepsilon \sigma_0 ((t_{\text{ст}} + 273,15)^4 - (t_0 + 273,15)^4) / (t_{\text{ст}} - t_0) \quad (12)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения (степень черноты) внешней поверхности трубы;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>.

Суммарный коэффициент теплоотдачи от наружной стенки трубы к окружающей среде:

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{н изл}} + \alpha_{\text{н конв}} \quad (13)$$

В уравнениях (11) и (12) используется неизвестная температура  $t_{\text{ст}}$ , поэтому расчет производится итерационно с уточнением этого значения.



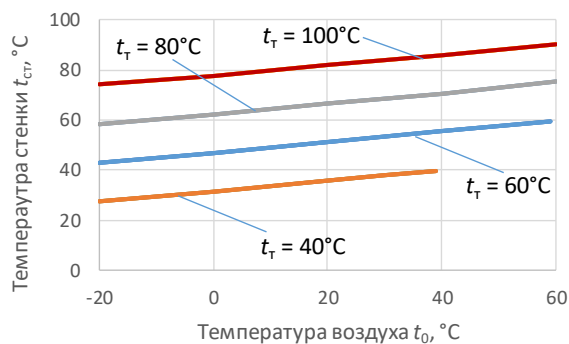
## Результаты (Results)

На основании приведенных уравнений была составлена расчетная таблица в электронных таблицах Excel. Это позволило провести некоторое количество теоретических экспериментов, суть которых заключалась в изменении основных параметров модели с целью выявления зависимости одних параметров от других. В результате было получено 12 графиков зависимостей. Все расчетные опыты были проведены для двух наиболее распространённых материалов труб, полипропилена и стали.

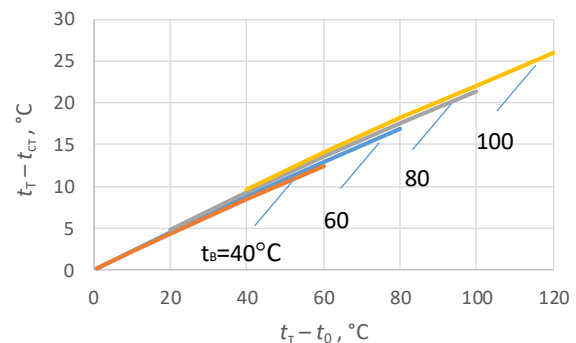
Для каждого варианта материала проводились опыты по изменению трех основных параметров: температуры воздуха, скорости движения теплоносителя и наружного диаметра трубы (с учетом толщины стенки).

1. *Материал: полипропилен, труба 32×2,8, изменяется температура окружающей среды  $t_0$ .*

Проанализировав графики на рис. 1 и 2), полученные при помощи составленной математической модели, была выявлена зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы от температурного напора сред.



**Рис. 1.** Зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы от изменения температуры воздуха  $t_0$ , и температуры теплоносителя  $t_T$



**Рис. 2.** Зависимость разности температур греющего теплоносителя и наружной поверхности стенки трубы от изменения температурного напора сред  $t_T - t_0$  и температуры теплоносителя  $t_T$

При температурном напоре в 120 °C температура стенки составила 74 °C. Температурный напор между внутренней и наружной поверхностями трубы составил 26 градусов, что подтверждает актуальность исследований в этой области, вследствие высокой востребованности в зонах с холодным климатом и при обслуживании холодильных или высокотемпературных установок.

2. *Материал: полипропилен, труба 32×2,8, изменяется скорость течения теплоносителя.*

Наиболее значительное изменение температуры наружной поверхности стенки трубы, от 42,5°C до 43,8°C, наблюдается на участке изменения скорости течения теплоносителя в пределах от 0,1 (м/с) до 1 (м/с) и при температурном напоре сред равном 80 градусам (рис. 3). При дальнейшем снижении температурного напора сред, влияние параметра скорости теплоносителя внутри трубы на температуру наружной поверхности стенки в значительной степени снижается. При изменении скорости течения теплоносителя в пределах от 1 м/с до 6 м/с изменение температуры наружной поверхности стенки трубы пренебрежимо мало.



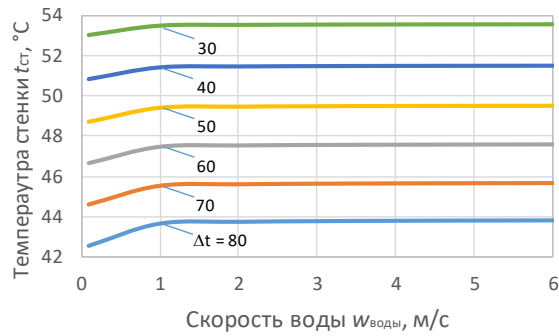


Рис. 3. Зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы  $t_{ст}$  от изменения скорости течения теплоносителя внутри трубы  $w_{воды}$  и температурного напора  $\Delta t$

3. *Материал: полипропилен, изменяется наружный диаметр трубы  $D_n$  (толщина стенки  $\delta$  принималась согласно стандартным размером)*

На графиках (рис. 4–6) видно, что при постоянных параметрах сред последовательное изменение диаметра трубы, сопряженного с толщиной стенки, в пределах от 0,032 м. до 0,11м. привело к снижению температуры наружной поверхности стенки трубы на 10°C. Эта зависимость позволит измерять температуру внутренней среды трубопровода на участках повышенного или пониженного гидродинамического сопротивления, после конфузоров или диффузоров.

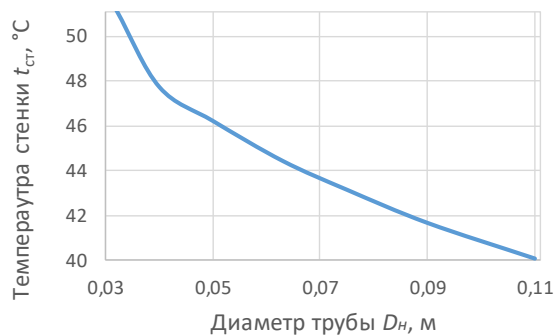


Рис. 4. Зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы от изменения наружного диаметра трубы  $D_n$  при  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$

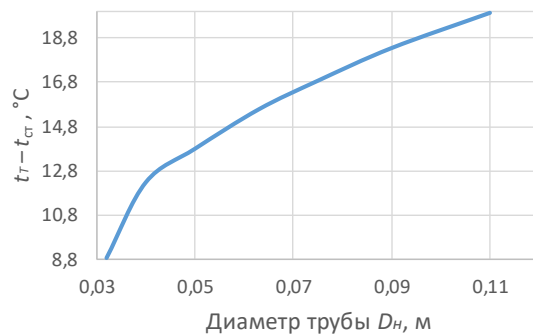


Рис. 5. Зависимость разности температур греющего теплоносителя и наружной поверхности стенки трубы от изменения наружного диаметра трубы  $D_n$  при  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$

График на рис. 6 компилирует зависимости, полученные ранее, и позволяет увидеть на сколько при разных постоянных температурных напорах сред на температуру наружной поверхности стенки трубы влияет изменение диаметра трубы. Например, при температурном напоре сред  $t_T - t_0 = 70^\circ\text{C}$  при последовательном изменении диаметра трубы с  $D_n = 0,032\text{м}$  до  $D_n = 0,11\text{м}$  температура наружной поверхности стенки трубы изменилась на 10 градусов.

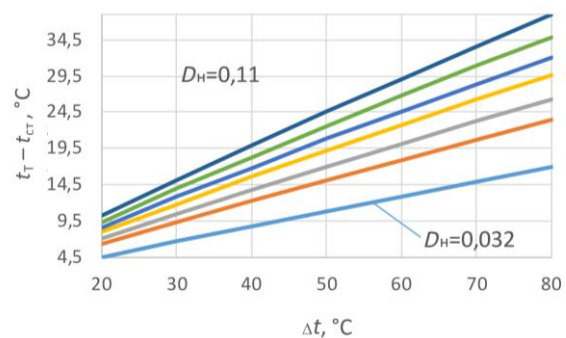


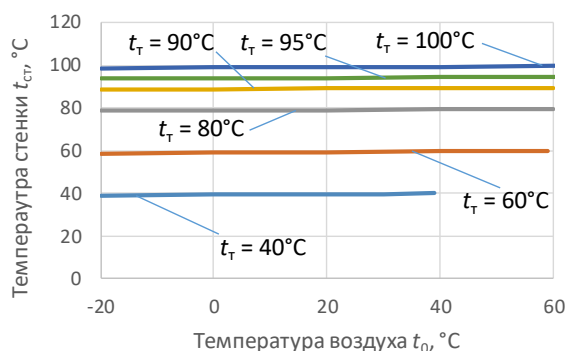
Рис. 6. Зависимость разности температур греющего теплоносителя и наружной поверхности стенки трубы от изменения температурного напора  $\Delta t$  и диаметра трубы  $D_n$  при постоянной температуре греющего



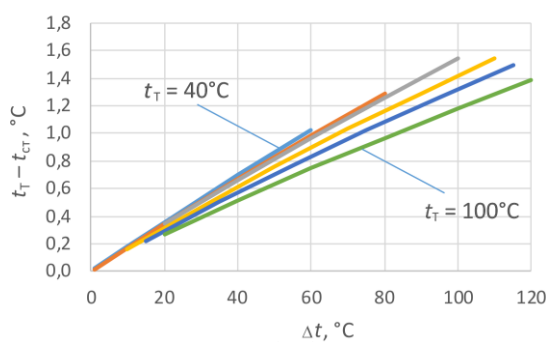
теплоносителя  $t_b = 60^\circ\text{C}$

4. *Материал: сталь, труба 33,5×3,2, изменяется температура окружающей среды*

Ситуация со стальными трубами на первый взгляд может показаться весьма неоднозначной. График представленный на рис. 7 демонстрирует ситуацию идентичную рис. 1. Рис. 8 показывает, что рост температурного напора сред за счёт увеличения температуры окружающей среды при постоянной температуре греющего теплоносителя приводит к снижению температурного напора между внутренней и наружной поверхностями стенки труб, но это изменение не превышает и  $0,5^\circ\text{C}$ . Таким образом для разных материалов труб, в следствие их разной теплопроводности и степени черноты тела, для определения температуры греющего теплоносителя через температуру наружной поверхности стенки необходимо экспериментально выводить температурные поправки для каждого отдельного материала и типоразмера труб и изоляции.



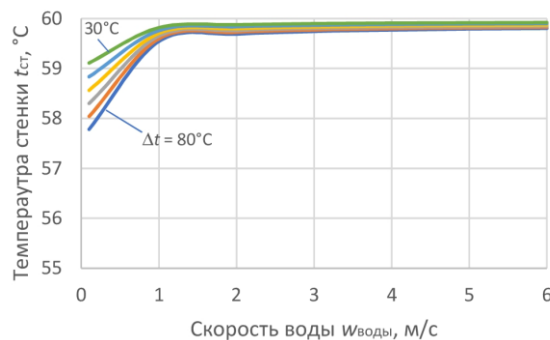
**Рис. 7.** Зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы от изменения температуры воздуха  $t_0$ , и температуре теплоносителя  $t_T$



**Рис. 8.** Зависимость разности температур греющего теплоносителя и наружной поверхности стенки трубы от изменения температурного напора сред  $\Delta t$  и температуры теплоносителя  $t_T$

5. *Материал: сталь, труба 33,5×3,2, изменяется скорость течения теплоносителя, при постоянном температурном напоре сред.*

Как и на графике, представленном ранее (рис.3) изменение скорости течения греющего теплоносителя совершенно не значительно влияет на температуру наружной поверхности стенки трубы (рис. 9). Например, при постоянном температурном напоре сред  $\Delta t = 80^\circ\text{C}$  и при изменении скорости течения воды с 0,1 до 4,5 м/с температуру наружной поверхности стенки трубы увеличилась лишь на  $2^\circ\text{C}$ . Такие показатели не значительно отличаются от результатов опыта с полипропиленовой трубой.

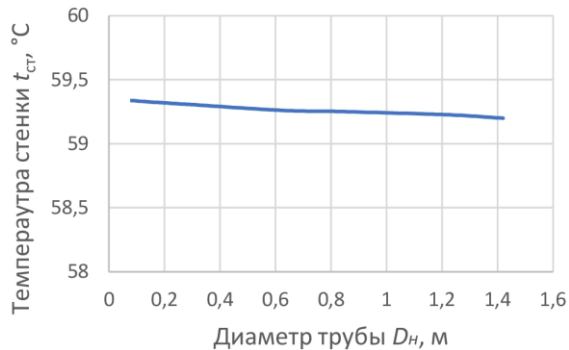


**Рис. 9.** Зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы от изменения скорости течения теплоносителя внутри трубы  $w_{воды}$  и температурного напора сред  $\Delta t$



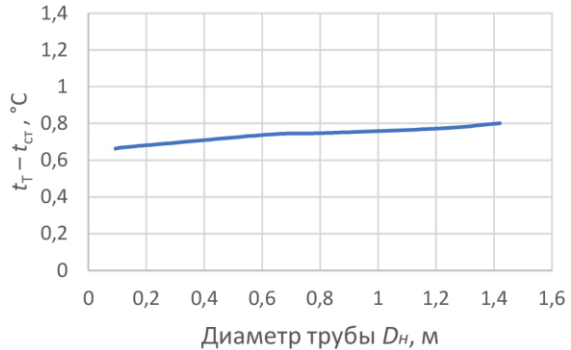
б. *Материал: полипропилен, изменяется наружный диаметр трубы (толщина стенки  $\delta$  принималась согласно стандартным размерам)*

Зависимости, представленный на рис. 10 и рис. 11 отличаются от представленных ранее графиков, содержащих в себе результаты идентичных опытов с полипропиленовой трубой (рис. 4 и 5). Температура наружной поверхности стенки трубы изменяется на ничтожно малые значения.

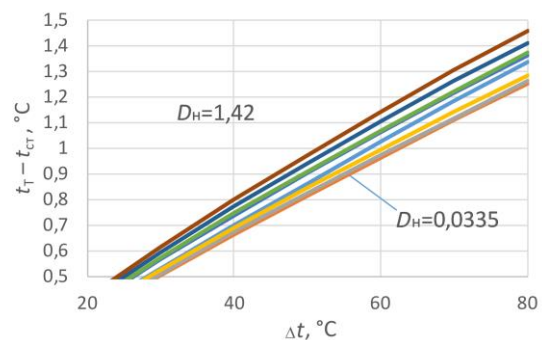


**Рис. 10.** Зависимость температуры наружной поверхности стенки трубы от изменения наружного диаметра трубы  $D_n$  при постоянном температурном напоре сред  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$

Как и в случае с предыдущими графиками (рис. 10 – 11), полученная зависимость указывает на незначительное изменение температуры наружной поверхности стенки трубы, в среднем около 0,2 градусов, при значительном изменении наружного диаметра трубы, сопряженного с толщиной стенки (рис. 12).



**Рис. 11.** Зависимость разности температур греющего теплоносителя и наружной поверхности стенки трубы от изменения наружного диаметра трубы  $D_n$  при постоянном температурном напоре сред  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$



**Рис. 12.** Зависимость разности температур греющего теплоносителя и наружной поверхности стенки трубы от изменения температурного напора сред  $\Delta t$  и диаметра трубы  $D_n$  при постоянной температуре греющего теплоносителя  $t_b = 60^\circ\text{C}$

## Выводы (Conclusion)

Обозначенный ранее этап исследования выполнен успешно. Выявлены и описаны зависимости, позволяющие определить температуру греющего теплоносителя внутри трубы при ряде определенных параметров. Наибольшее влияние на температуру стенки полипропиленовых труб оказывают: температура окружающей среды и наружный диаметр труб, сопряженный с толщиной стенки. Это значительно повышает актуальность последующих исследований и финальной цели так как прогнозируемые результаты могут быть востребованы при эксплуатации высокотемпературных и низкотемпературных установок, а также трубопроводов в регионах с холодным климатом. Представленные выше графики зависимостей в схожих по тематике работах авторами обнаружены не были. Зависимости, полученные в результате опытов со стальными трубами, не дали ожидаемых результатов, но на практике стальные трубопроводы, вслед-



ствии высокой теплопроводности стали, зачастую применяются вместе с теплоизоляцией, что позволяет провести исследования по определению степени влияния различных параметров на температуру наружной поверхности многослойной цилиндрической стенки. Кроме того, стоит отметить, что опыт со стальными трубами указал на низкую эффективность термографии, как способа определения температуры среды внутри трубопровода, при относительно низком термическом сопротивлении материала стенки трубы.

*Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова*

### Библиографический список

1. Щербинина О.А., Щербинин И.А. Опыт использования автоматизированных информационно измерительных систем управления и сбора данных параметров теплоносителя и тепловой энергии на основе тепловычислителей «Взлет, Логика и КМ-5» на примере учебных корпусов ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 127-131.
2. Экспериментальное определение методической погрешности измерения температуры газового потока в стальной трубе с помощью накладных датчиков температуры / В.М. Карюк, А.В. Мальков, В.Н. Бойков, А.С. Суродеев // Нефть газ экспозиция. – Саратов: Объединение БИНАР, 2017. – С. 102-104.
3. Зонова А.Д., Черепанов В.Я. Исследование теплотрического метода неразрушающего контроля параметров теплоносителя в системах теплоснабжения // Гео-Сибирь. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 239-243.
4. Зонова А.Д., Черепанов В.Я. Черепанов. Методика экспресс-измерений тепловой мощности отопительных приборов неразрушающим методом. // ИнтерЭкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 5, №2. – С. 158-163.
5. Беседин П.В., Трубаев П., Нусс М.В. Расчет потерь тепла через корпус цементных вращающихся печей // Цемент и его применение. – 2001. – № 2. – С. 13.
6. Карпов Д.Ф. Тепловые методы и средства контроля теплопроводности термокраски // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 2. – С. 61-68.
7. Семенов А.Е., Путилин С.А. Определение температуры среды трубопроводной обвязки судовых компрессоров по температуре наружной стенки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 1. – С. 81-86.
8. Кузнецов В.А., Трубаев П.А. Возможности и проблемы математического моделирования теплотехнологических процессов // Энергетические системы. – 2017. – № 1. – С. 54-61.
9. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. / Под общ. ред. А.В. Клименко, В. М. Зорина. – 4-е изд., стереот. – М.: Изд. дом МЭИ, 2017. – 564 с.
10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
11. Бухмиров В.В. Ракутина Д.В. Определение коэффициента теплопередачи через гладкую и оребренную трубы. – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2010. – 24 с.

### Сведения об авторах

**Барашков Илья Артемович, Кравченко Никита Александрович** – студенты третьего курса образовательной программы «Энергетика теплотехнологии» направления «Теплоэнергетика и теплотехника» БГТУ им. В.Г. Шухова.



## РАСЧЕТ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА НА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Егоров М.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Антипина А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГУАП, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ПГУПС, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

### Аннотация

Защита окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу – важный вопрос, так как загрязнение воздуха имеет серьезные последствия как для здоровья людей, так и для экосистем в целом. Решение проблем экологии требует всемирного и всестороннего подхода. Это включает и изменения в образе жизни, и осознанное использование ресурсов, и разработку экологически чистых технологий, а также сотрудничество государств и общественных организаций. Солнечные батареи, также известные как фотоэлектрические солнечные модули, используют солнечный свет для преобразования его в электрическую энергию. Их популярность растет благодаря их способности предоставлять чистую и возобновляемую энергию, а также снижать зависимость от традиционных источников энергии, таких как уголь, нефть и газ и другие. В данной работе авторами был исследован возобновляемый источник энергии, такой как солнечная энергия. Также был проведен расчет солнечных батарей для частного дома. Рассматривается эффективность использования солнечной энергии в частном доме, включая оценку площади установки солнечных панелей, расчет потенциальной мощности, учет климатических и географических особенностей, а также потребление электроэнергии.

**Ключевые слова:** солнечные батареи, источники возобновляемой энергии, преобразование энергии, расчет энергоснабжения дома на солнечных батареях, климат, КПД, эффективность

## CALCULATING THE POWER SUPPLY OF A PRIVATE HOUSE WITH SOLAR PANELS UNDER DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS

Mikle Egorov<sup>1,2,3</sup>, Anna Antipina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg

<sup>3</sup>Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirova, Saint-Petersburg

### Abstract

Protecting the environment from harmful air emissions is an important issue, as air pollution has serious consequences for human health and ecosystems. Solving environmental problems requires a worldwide and comprehensive approach. This includes lifestyle changes, conscious use of resources, development of environmentally friendly technologies and cooperation between governments and public organizations. Solar cells, also known as photovoltaic solar modules, use sunlight to convert it into electrical energy. They are growing in popularity due to their ability to provide clean and renewable energy and reduce dependence on traditional energy sources such as coal, oil, and gas. In this paper, renewable energy sources such as solar energy have been investigated. The calculation of solar panels for a private house has also been done. The efficiency of using solar energy in a private home is discussed, including estimating the area of solar panel installation, calculating the potential capacity, considering climatic and geographical features, and electricity consumption.

**Keywords:** solar panels, renewable energy sources, energy conversion, solar home energy calculation, climate, efficiency.





## Введение

В настоящее время человечество каждый день сталкивается с множеством социальных, экономических и экологических проблем. Загрязнение окружающей среды является вредоносным воздействием на экосистемы и живые организмы. Выбросы от промышленных предприятий, электростанций и заводов содержат вредные и токсичные вещества, которые попадают в атмосферу и вызывают угрозы для человечества и планеты. Для предотвращения климатического кризиса от выбросов, загрязняющих атмосферу, ученые модернизируют альтернативные источники энергии. К альтернативным источникам энергии относятся возобновляемые источники; к ним относятся энергия солнечных лучей, воды (к которым относятся приливы и отливы), дождя, тепловая энергия недр Земли и биоэнергия, которая добывается при перерабатывании биомасс и отходов. Наиболее популярно и развито использование солнечных лучей и ветра. Солнечные батареи используются в различных областях, включая электросистемы, коммерческие здания, а также научные и космические исследования. Эта технология имеет потенциал для уменьшения негативного воздействия на окружающую среду и сокращения выбросов парниковых газов. Однако для эффективного использования солнечных батарей необходимо учитывать ряд факторов, таких как климатические условия, угол установки и обслуживание, чтобы обеспечить максимальную производительность и долговечность этой технологии.

## Материалы, методы и результаты

### Солнечные батареи

Солнечные лучи в электрический ток преобразуют солнечные батареи [1, 2], которые набирают популярность по нескольким причинам:

- экологически чистые: солнечная энергия не воздействует на атмосферу вредными выбросами;
- экономически эффективны: не смотря на капитальные затраты на создание и установку, в долгосрочной перспективе они экономят деньги за счёт того, что солнечный свет является естественным воздействием, нет трат на его добычу;
- независимость от сети: солнечные батареи позволяют производить электричество на удалении от сети или в ситуациях, когда нет доступа к электрической сети;
- долговечность: солнечные батареи имеют долгий срок службы и требуют минимального обслуживания;
- автоматизация: возобновляемые источники энергии легки в автоматизации и могут работать без прямого участия человека.

Основными недостатками солнечных батарей являются

- невысокая эффективность при неблагоприятных погодных условиях;
- высокая стоимость, и, как следствие, большой период окупаемости;
- регулярное обслуживание и уход за солнечными панелями, в особенности в регионах с большим количеством осадков;
- генерирование постоянного тока;
- выбор местности для солнечной электростанции.

### Принцип работы

Солнечные батареи работают на основе фотоэлектрического эффекта [2, 3], возникающего при взаимодействии фотонов света с полупроводниковыми материалами, такими как кремниевые кристаллы. В результате этого в материалах появляются движущиеся электроны, которые создают электрический ток - фотогенерация.

Солнечные батареи состоят из нескольких солнечных ячеек, объединенных в блоке. Когда свет попадает на солнечную батарею, каждая ячейка создает электрический



ток благодаря фотоэлектрическому эффекту. Этот ток затем собирается и может быть использован для питания электрических устройств или сохранения в аккумуляторах.

Солнечные батареи являются источником чистой и возобновляемой энергии, и их принцип работы является основой для создания солнечных систем, которые способны обеспечивать энергией дома, предприятия и другие устройства, не нанося вред окружающей среде.

Солнечная батарея состоит из нескольких последовательно соединённых модулей (рис. 1).

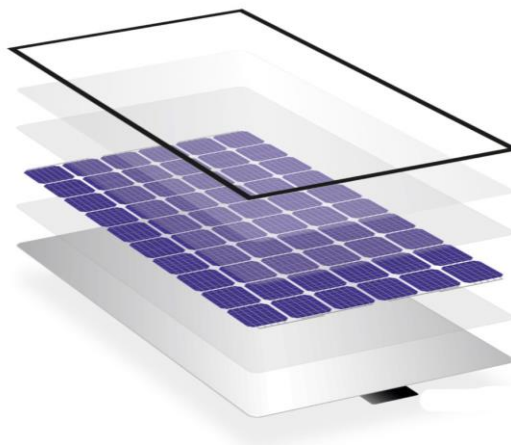


Рис. 1. Структура солнечной панели

#### Реализация создания солнечной электростанции

Эффективность солнечной панели зависит от многих факторов: погодные условия (ясный или пасмурный день, время года, регион), температура окружающей среды (максимальный КПД достигается при 25°C), внешние источники загрязнения (сажа, снег, ржавчина), угол падения солнечных лучей. Поэтому, для сравнения рассмотрим два региона России с разными климатическими условиями на примере домов с одинаковым количеством проживающих, площадью и нахождением относительно лесов, предприятий и других сооружений.

Для примера возьмем пригород Санкт-Петербурга с преобладающим прохладным климатом, умеренным, но изменчивым, с постоянными осадками, пасмурной погодой, туманностью и ветреностью; и пригород солнечного города Сочи, где продолжительность годового солнечного сияния в 1,5 раза превышает Санкт-Петербург. В табл. 1 представлены данные дневной суммы солнечной радиации в Санкт-Петербурге и в Сочи, соответственно.

Таблица 1

#### Данные дневной суммы солнечной радиации, кВт · ч/м<sup>2</sup>

Город	янв.	фев.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сент.	окт.	нояб.	дек.	год
Санкт-Петербург	0,35	1,08	2,36	3,98	5,46	5,78	5,61	4,31	2,6	1,23	0,5	0,2	2,8
Сочи	1,3	2,08	2,98	4,1	5,73	6,02	5,99	5,54	4,11	2,91	1,74	1,21	6,64

Сравнив данные, можно сделать вывод, что солнечная энергия в Санкт-Петербурге более чем в 2 раза уступает солнечной энергии Сочи, но, заметим, что максимальная эффективность солнечных панелей достигается при температуре ниже 25°C, поэтому не смотря на меньшее количество солнечной энергии по сравнению с Сочи, Санкт-Петербург будет иметь преимущество за счет низкой среднесуточной температуры.

Для расчета потребления электроэнергии в жилом доме выберем частный дом площадью 100 м<sup>2</sup>, в котором проживают 2 взрослых и 1 ребенок. В табл. 2 и 3 представлены суточные потребления энергии с часу ночи до 12 часов дня и с 12 часов дня до полуночи, соответственно.

Таблица 2

**Суточное потребление энергии в ночное время**

Потребитель	Потребляемая мощность (Вт)	Потребляемая энергия (кВт·ч)											
		1 <sup>00</sup>	2 <sup>00</sup>	3 <sup>00</sup>	4 <sup>00</sup>	5 <sup>00</sup>	6 <sup>00</sup>	7 <sup>00</sup>	8 <sup>00</sup>	9 <sup>00</sup>	10 <sup>00</sup>	11 <sup>00</sup>	12 <sup>00</sup>
Компьютер	350												
Холодильник	200	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Чайник	1000							0,1	0,1				0,1
Телевизор	150×2							0,15	0,15				
Лампы	11×10							0,11	0,11	0,11			
Стиральная машина	1500												
Посудомоечная машина	1000								0,5				
Утюг	1500							0,15					
Микроволновка	1500								0,15				
Пылесос	700												
Кухонный комбайн	800												

Таблица 3

**Суточное потребление энергии в дневное время**

Потребитель	Потребляемая мощность (Вт)	Потребляемая энергия (кВт·ч)											
		13 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	15 <sup>00</sup>	16 <sup>00</sup>	17 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	19 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	23 <sup>00</sup>	0 <sup>00</sup>
Компьютер	350				0,35				0,35				
Холодильник	200	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Чайник	1000				0,1		0,1		0,1				0,1
Телевизор	150×2					0,15			0,150	0,15	0,3		
Лампы	11×10						0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,055	
Стиральная машина	1500								0,15				
Посудомоечная машина	1000		0,5						0,5				
Утюг	1500										0,3		
Микроволновка	1500			0,15					0,15				
Пылесос	700							0,35					
Кухонный комбайн	800						0,8						



Расчет суммарной нагрузки потребления:

Суммарная энергия за период с 1<sup>00</sup> до 12<sup>00</sup>:

$$\sum_{i=1}^n W_1 = W_1 + W_2 + \dots + W_{12} = 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + \\ + (0,2 + 0,1 + 0,15 + 0,11 + 0,15) + (0,2 + 0,1 + 0,15 + 0,11 + 0,5 + 0,15) + \\ + (0,2 + 0,11) + 0,2 + 0,2 + (0,2 + 0,1) = 4,13 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Суммарная энергия за период с 13<sup>00</sup> до 0<sup>00</sup>:

$$\sum_{i=1}^n W_2 = W_{13} + W_{14} + \dots + W_{24} = 0,2 + (0,2 + 0,5) + (0,2 + 0,15) + (0,35 + 0,2 + 0,1) + \\ + (0,2 + 0,15) + (0,2 + 0,1 + 0,11 + 0,8) + (0,2 + 0,11 + 0,35) + \\ + (0,35 + 0,2 + 0,1 + 0,15 + 0,11 + 0,15 + 0,5 + 0,15) + (0,2 + 0,15 + 0,11) + \\ + (0,2 + 0,3 + 0,11 + 0,3) + (0,2 + 0,055) + (0,2 + 0,1) = 7,45 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Общая энергия, потребляемая домом за весь день:

$$\sum W_0 = \sum W_1 + \sum W_2 = 4,13 + 7,75 = 11,88 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Из табл. 2 и 3 видно, что наиболее активное время использования электроприборов и другой техники в период с 7 до 9 утра и с 18 до 23. Ночью из приборов работает холодильник, а в период с 9 утра до 6 вечера зачастую взрослые находятся на работе и дома остаются только школьники, которые потребляют меньше электроэнергии.

Вычислим среднюю мощность нагрузки за весь день:

$$P_{cp} = \frac{\sum W_1}{t_1} + \frac{\sum W_2}{t_2} = \frac{4,13}{12} + \frac{7,45}{12} = 0,965 \text{ кВт} \approx 1 \text{ кВт}$$

Средняя мощность в будний день составила 1кВт, но, например, в выходной день потребление электроэнергии становится больше, следовательно, и средняя мощность за день увеличится на 30% и будет равна 1,3 кВт.

Существует два вида батарей: монокристаллические, которые отличаются большей эффективностью, работоспособностью, но, при этом, имеют и высокую стоимость, и обычно больше подвержены влиянию температуры, и поликристаллические модули [4-8]. Рассмотрим поликристаллические панели. Поликристаллические панели имеют меньшую стоимость, чем монокристаллические, а, следовательно, более быструю окупаемость. КПД этих панелей не превышают 15-20%.

Рассмотрим поликристаллическую панель с параметрами:

- максимальная мощность 340 Вт;
- общая площадь 19,305 м<sup>2</sup>;
- КПД 18%.



Тогда средняя мощность солнечной батареи будет равна:

$$\bar{P} = P_{\max} * \frac{t_{\text{день}}}{t_{\text{день}} + t_{\text{ночь}}} = 340 \text{Вт} * \frac{12 \text{ч}}{24 \text{ч}} = 170 \text{Вт}.$$

Площадь солнечной батареи будет равна отношению средней мощности нагрузки и средней мощности батареи:

$$S = \frac{P_{\text{сп}}}{P} = \frac{1300 \text{Вт}}{170 \text{Вт}} = 7,65 \text{м}^2.$$

На один дом будет требоваться 8 м<sup>2</sup> солнечных панелей. По параметрам выбранной батареи видно, что для поддержания электроэнергии нужно иметь не менее четырех батарей.

Климат в Санкт-Петербурге не устойчив, а в Сочи не редко могут быть высокие температур и дожди. Поэтому, более рационально увеличить количество батарей в два раза, так как эти факторы могут значительно повлиять на эффективность батарей.

Установка солнечных батарей может быть выполнена, как на участке, если позволяет территория, так и на крыше дома, что является более затратным. Но и в том, и в другом случае обязательно соблюдать угол наклона к солнечным лучам. Оптимальным будет угол наклона равный 40°.

## Выводы

1. Таким образом, несмотря на различия в эффективности, установка солнечных батарей может быть выгодна в обоих городах, поскольку они могут помочь в снижении расходов на электроэнергию и в защите окружающей среды.

2. В зонах с высокой солнечной активностью они могут обеспечить значительную энергию и иметь высокую производительность, в то время как в менее солнечных районах и при пасмурной погоде их эффективность может быть ниже. Тем не менее, технологии солнечных батарей улучшаются, что делает их более адаптивными и эффективными в условиях низкой солнечной активности. При правильном планировании и установке, а также использовании систем хранения энергии, солнечные батареи могут успешно использоваться в различных климатических условиях, демонстрируя потенциал как чистый и устойчивый источник энергии.

3. Солнечные батареи играют важную роль в обеспечении чистой и возобновляемой энергии, снижении зависимости от традиционных источников энергии и сокращении выбросов парниковых газов. Они предоставляют эффективный и экологически устойчивый способ генерации электрической энергии. Однако для максимальной производительности и эффективности использования солнечных батарей необходимо учитывать различные факторы, такие как климатические условия, угол установки и регулярное обслуживание.

В целом, солнечные батареи представляют собой технологию для сокращения негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения стабильного источника чистой энергии.

## Библиографический список

1. Григорян Д.К., Микаева С.А., Журавлева Ю.А. Применение фотоэлектрического эффекта в солнечных батареях // Наукосфера. – 2023. – № 5-2. – С. 246-249.



2. Петрушкин А.А., Савилов А.В. Инновации в разработке солнечных элементов // Молодой ученый. – 2017. – № 18 (152). – С. 70-78.
3. Альшариф А.Г. Перспективы использования солнечной энергии для отопления дома в России // Молодой ученый. – 2014. – № 6 (65). – С. 127-131.
4. Яптуев Т.А. Влияние промышленной эксплуатации солнечных батарей на окружающую среду // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – № 1-2. – С. 310-312.
5. Охотник Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 1. – С. 222-230.
6. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В.В. Елистратов, Е.М. Акентьева, М.М. Борисенко и др. – СПб.: Наука, 2010. – 98 с.
7. Калагиян М.С., Попель О.С., Шпильраин Э.Э. Экспериментальный жилой дом с системой солнечного теплоснабжения в поселке Мерцаван Армянской ССР // Гелиотехника. – 1986. – № 3. – С. 66-71.

## References

1. Grigoryan, D., Mikaeva, S., & Zhuravleva, Yu. (2023). Application of the photoelectric effect in solar panels. *Naukosphere*, 5-2, 246-249.
2. Petrushkin, A., & Savilov, A. (2017). Innovations in the development of solar cells. *Young Scientist*, 18(152), 70-78.
3. Al-Sharif, Al. (2014). Prospects of using solar energy for home heating in Russia. *Young Scientist*, 6(65), 127-131.
4. Yaptuev, T. (2023). The impact of industrial operation of solar panels on the environment. *Collection of selected articles of the scientific session of TUSUR*, 1-2, 310-312.
5. Okhotnik, G. (2013). Method of calculating the capacity of solar power plants. *Bulletin of the Chuvash University*, 1, 222-230.
6. Elistratov, V., Akentieva, E., Borisenko, M., Kobysheva, N., Sidorenko, G., & Stadnik, V. (2010). *Climatic factors of renewable energy sources*. Nauka.
7. Kalagiyan, M., Popel, O., & Shpilrain, E. (1986). Experimental residential building with a solar heat supply system in Mertsavan Arm SSR. *Helioelektronika*, 3, 66-71.

## Сведения об авторах

**Егоров Михаил Юрьевич**, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, e-mail: [mikhail.yu.egorov@gmail.com](mailto:mikhail.yu.egorov@gmail.com)

**Антипина Анна Вячеславовна**, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

## Authors about

**Mikle Yu. Egorov** – Associate Professor, PhD (Tech.), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg State Forest Technical University.

**Anna V. Antipina** – bachelor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.



## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОВООРУЖЁННОСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Егоров М.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Антонов Н.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГУАП, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ПГУПС, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

### Аннотация

Авторами выполнен анализ проблем применения беспилотных летательных аппаратов. Актуальность темы обусловлена высоким развитием беспилотных летательных аппаратов и расширением сфер их применения. Это обстоятельство обеспечивает усиленный рост требований к беспилотному летательному аппарату. Проблема связана с ограничением применения по времени беспилотных летательных аппаратов и сужением круга их задач. Обсуждаются предложенные решения. На основе решений рассмотрены возможности применения гибридных силовых установок для беспилотного летательного аппарата с целью достижения длительного пребывания в воздухе и выполнения широкого спектра задач. Предложены и проанализированы различные источники энергии. Приведены примеры летательных аппаратов с различными энергетическими установками. Составлены лётные технические характеристики для беспилотных летательных аппаратов. Сделано сравнение характеристик энергоёмкости, коэффициента полезного действия, цены и экологичности источников энергии. По результатам сравнения были предложены концепции гибридных силовых установок. Также проведён расчёт с целью нахождения оптимальной гибридной силовой установки и рассмотрены графики границ применения гибридных силовых установок. Проанализированы графики зависимости области применения гибридных силовых установок от суммарного коэффициента полезного действия и скорости полёта.

**Ключевые слова:** время полёта, беспилотный летательный аппарат, гибридные силовые установки, источник энергии, энергоёмкости, коэффициент полезного действия.

## POSSIBILITIES TO PROVIDE ADDITIONAL POWER TO THE UNMANNED AERIAL VEHICLE BY USING DIFFERENT POWER SOURCES

Mikle Egorov<sup>1,2,3</sup>, Nikita Antonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg

<sup>3</sup>Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirova, Saint-Petersburg

### Abstract

The problem of using unmanned aerial vehicles was selected and considered. The problem is connected with time limitation of unmanned aerial vehicles application and narrowing of the range of their tasks. Solutions to this problem are proposed. On the basis of the solutions the possibilities of application of hybrid propulsion systems for unmanned aerial vehicle to achieve a long stay in the air and to perform a wide range of tasks are considered. Various power sources are proposed and analyzed. Examples of aircrafts with different power plants are given. The flight technical characteristics of unmanned aerial vehicles are compiled. Comparison of characteristics: energy intensity, efficiency, price and environmental friendliness of energy sources is made. Hybrid propulsion system concepts were proposed based on the comparison results. The calculation for the purpose of finding the optimum hybrid power plant has been carried out and the graphs of hybrid power



*plants application limits have been analyzed. The graphs of dependence of hybrid propulsion systems application area on the total efficiency and flight speed have been analyzed. The study of the topic is connected with the high development of unmanned aerial vehicles and the expansion of their application. This leads to an increase in the requirements for unmanned aircraft.)*

**Keywords:** *flight time, unmanned aerial vehicle, hybrid propulsion systems, energy source, energy intensity, efficiency.*

## Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛТА) применяются в вооружённых силах, промышленности, экологии, мониторинге, обеспечении связи и других сферах [1].

С каждым годом область применения возрастает как и задачи, возложенные на БПЛА. Но также растут требования для выполнения поставленных задач, когда беспилотнику необходимо отработать длительное время, без посадок и подзарядки. Необходим экономный мотор и надёжный источник питания.

Для работы потребляется электричество и топливо. Электричество расходуется не только мотором, но и электрооборудованием. Следовательно, не обеспечивается длительный полёт. Использование топлива при сгорании влечёт вред экологии [2, 3]. Поэтому для беспилотников необходима восполняемая энергия: использование солнца, ветра и воды. Можно воспользоваться гибридностью, когда двигатель питается не только от основного аккумулятора, но и от аккумулятора, заряженного солнечными панелями. Так же возможна альтернатива, использование двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя в одном аппарате. Создание подобных концепций позволит беспилотникам находиться в воздухе дольше и выполнять свои задачи с большей эффективностью. Но такие гибриды мало применяют, так как необходимо поставить на беспилотник сразу два и более источника энергии. Это влечёт повышенные габариты и изменения привычных конструкций летательных аппаратов.

**Целью работы** является анализ различных источников питания для БПЛА, возможности их применения, оценка использования альтернативной энергии, её влияния на конструкцию аппарата.

**Задача исследования** – найти дополнительный источник энергии для длительной работы беспилотного летального аппарата.

## Материалы и методы

Основные источники энергии беспилотного аппарата:

- батареи;
- водородные топливные элементы;
- бензин, керосин, метанол, этанол, пропан;
- газозлектрические гибриды;
- солнечная энергия;
- солнечные гибриды;
- лазер.

### Батареи

Это распространённый источник энергии для дронов, питающий бесколлекторный электродвигатель. Применяют два вида батарей: Li-Po (литий-полимерные) и Li-ion (литий-ионные). Бесколлекторный двигатель – это двигатель переменного тока, у которого коллекторно-щеточный узел заменен бесконтактным полупроводниковым коммутатором, управляемым датчиком положения ротора. На рис. 1 приведены аппараты с бесколлекторным двигателем.







Рис. 1. Беспилотники марки «Mavic» и «Тахion»

Летные характеристики БЛА «Mavic»:

- масса 734 г;
- скорость 65 км/ч;
- высота полета 5000 м;
- время полета 46 мин;
- радиус действия 30 км.

Летные характеристики БЛА «Тахion»:

- длина 610 мм;
- размах крыльев 2000 мм;
- масса 25 кг;
- вес полезной нагрузки 5 кг;
- скорость полета 65 – 120 км/ч
- время полета 2 ч;
- радиус действия 40 км;
- высота полета максимальная 4000 м.

#### Водородные топливные элементы

Представляют электрохимические устройства типа батарейки, которые вырабатывают электричество посредством химической реакции между кислородом и водородом, продуктом химической реакции является чистая вода [4]. КПД топливного элемента выше КПД аккумулятора и составляет 45%. По сравнению с батареей, которая имеет удельную электрическую мощность около 280 Ватт·час/кг, водородный топливный элемент имеет 500 Ватт·час/кг. БПЛА, работающий на водородном топливе, приведен на рис. 2.



Рис. 2. Беспилотник марки «Инспектор-402»

Летные характеристики БЛА «INSPECTOR 402»

- масса 14 кг;
- размах крыла 4 м;
- дальность полета 400 км;
- скорость 55 - 100 км/ч;
- практический потолок 4000 м;
- продолжительность полета 40-45 ч.

#### Бензин, керосин, метанол, этанол, пропан

Жидкое и газообразное топлива применяют в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и в турбореактивных двигателях [5].

ДВС – вид теплового двигателя, в котором топливная смесь сгорает непосредственно в рабочей камере двигателя.

Турбореактивный двигатель основан на затягивании воздуха внутрь установки посредством компрессора с рядами рабочих лопаток на оси. После этого воздух сжимается. Далее в камере сгорания воздух смешивается с продуктами горения топлива, нагревается и расширяется. Затем расширенный газ на значительной скорости подается в турбину, также оснащенную лопатками, которая вращает компрессор. После этого раскаленный газ вырывается наружу через реактивное сопло, толкая самолет вперед. Беспилотники, использующие горючее топливо, приведены на рис. 3.



**Рис. 3. БПЛА «Орлан-10» и БПЛА-мишень «Дань»**

Лётные характеристики БПЛА «Орлан-10»:

- длина корпуса 1,80 м;
- размах крыльев 3,10 м;
- масса 18 кг
- двигатель ДВС, бензин А-95;
- предельная высота полета 5 км;
- практический потолок 6 км;
- радиус действия 200 км;
- скорость полета 160 км/ч;
- продолжительность полета 18 ч.

Лётные характеристики БПЛА «Дань»:

- размах крыла 2,70 м;
- длина 4,60 м;
- высота 0,815 м;
- масса 345 кг;
- двигатель: 1хТРД МД-120;
- тяга 1х120 кгс;
- скорость полета 400-750 км/ч;
- продолжительность полета 25-70 мин;
- минимальная высота полета 50 м;
- практический потолок 9000 м.

### **Солнечная энергия**

С помощью солнечных батарей преобразуется в постоянный электрический ток. БПЛА с применением солнечных батарей преимущественно являются аппараты планерного типа, см. рис. 4. Из-за значительного размаха крыла появляется возможность установить большее количество солнечных панелей. Так же возможность планировать позволяет длительное время экономить энергию и питаться от солнечных батарей.

Лётные характеристики БЛА «Сова»:

- размах 28 м;
- высота полёта 18 км;
- дальность 80 км;
- скорость 150-210 км/ч;
- масса 1000 кг.



Рис. 4. БПЛА «Сова»

### Лазер

С помощью лазера создается мощный пучок света, который фокусируется на приемнике энергии. В результате энергия лазерного пучка преобразуется в электрическую или другую форму энергии, используемую для питания различных устройств. Беспилотник, питаемый от лазерного луча, приведен на рис. 5.



Рис. 5. Беспилотник «Сталкер»

Лётные характеристики БПЛА «Сталкер»:

- масса 6 кг;
- размах 3 м;
- высота полёта 4500 м;
- подпитка батареи на высоте 60 м;
- время полёта 48 ч и более;
- скорость 80 км/ч.

Характеристики источников энергии приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Характеристики источников энергии

Источники энергии	Энергоёмкость, Вт·ч/кг	КПД, %	Стоимость, Р	Экологичность
Батареи	165-280	более 70	1 200...150 000	+
Водородные топливные элементы	500-900	45	50 000...1 000 000	+
Бензин, Керосин, Метанол, Этанол, Пропан	260-800	40	20000...120000	-
Солнечная энергия	175-280	26	5000...70000	+
Лазер	150-280	20	12000...80000	+

### Концепции

Множество источников энергии позволяет создавать гибриды [6]. Они позволят аппарату летать с использованием различных источников питания. Благодаря таким возможностям можно применить газозлектрические и солнечные гибриды. В случае истощения одного источника энергии можно воспользоваться альтернативой, либо



использовать сразу оба источника для достижения большего КПД. Полученное множество позволяет определить максимальную дальность крейсерского полета для силовых установок различных схем, уровня ёмкости аккумуляторных батарей, а также условий полета. В качестве ограничения области применимости гибридной силовой установки (ГСУ) выбрана дальность полета, при которой АКБ обеспечивает достаточное количество энергии для компенсации веса электрической части силовой установки [7].

При установке ГСУ на летательный аппарат его масса возрастает прямо пропорционально мощности электрической части и обратно пропорционально удельным параметрам электрических машин

$$\Delta M = \frac{N_{эд}}{N_{уэд}} + \frac{N_{эд}t}{N_{уа}}, \quad (1)$$

где  $\Delta M$  – прирост массы БЛА, кг;  $N_{эд}$  – мощность электродвигателя, Вт;  $t$  – время работы электродвигателя, с;  $N_{уэд}$  – удельная мощность электродвигателя, Вт/кг;  $N_{уа}$  – удельная энергоемкость аккумулятора, Вт ч/кг.

Возросшая масса компенсируется увеличением подъёмной силы за счет увеличения угла атаки БЛА. При этом пропорционально аэродинамическому качеству БЛА увеличивается сила аэродинамического сопротивления, которая компенсируется увеличением тяги воздушного винта. В случае малого относительного веса ГСУ можно пренебречь изменением аэродинамического качества, тогда из прироста тяги и массы (1) следует

$$\frac{\Delta M g}{k} = \frac{N_{эд} \eta_v \eta_{эд}}{V}; \quad (2)$$

$$\frac{\frac{g N_{эд}}{N_{уэд}} + \frac{g N_{эд} t}{N_{уа}}}{k} = \frac{N_{эд} \eta_v \eta_{эд}}{V}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент аэродинамического качества БЛА;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\eta_{эд}$  – КПД электрической машины;  $\eta_v$  – КПД воздушного винта.

Из уравнения (3) можно выразить максимальную продолжительность полета, при которой прирост массы за счет аккумуляторной батареи и электрической машины будет компенсироваться приростом тяги воздушного винта, или дальности полета, если умножить обе части уравнения на скорость полета

$$t = \frac{\eta_v \eta_{эд} k N_{уа}}{g V} - \frac{N_{уа}}{N_{уэд}}; \quad (4)$$

$$S = \frac{\eta_v \eta_{эд} k N_{уа}}{g} - \frac{V N_{уа}}{N_{уэд}}, \quad (5)$$

где  $S$  – дальность полета, м.

Помимо этого, подстановка в уравнение (2) полной массы летательного аппарата позволяет получить ограничение на использование электрических силовых установок

$$S = \frac{\eta_v \eta_{эд} k \Delta M N_{уа}}{M_{\Sigma} g} - \frac{V N_{уа}}{N_{уэд}}, \quad (6)$$

где  $M_{\Sigma}$  – масса летательного аппарата, кг.



Уравнения (5) и (6) формируют ограничения на множество полетных задач, при которых эффективно применение гибридных силовых установок и область рационального применения ГСУ.

Уравнение расхода топлива газотурбинного двигателя (ГТД) (7) и, с учетом прироста массы, расхода топлива ГСУ (8) за полетный цикл имеют вид

$$G_T = \frac{C_{уд} M_{п} g S}{k * \eta_B}; \quad (7)$$

$$G_T = C_{уд} S \left( \frac{M_{п} g}{k \eta_B} + \frac{\Delta M}{\left( \frac{1}{N_{уэд}} + \frac{S}{V N_{ya}} \right)} \left( \frac{g}{k \eta_B N_{уэд}} \left( 1 + \frac{S}{V} \right) - \frac{\eta_{эд}}{V} \right) \right); \quad (8)$$

где  $C_{уд}$  – удельный расход топлива ГТД, кг/(Вт ч);  $M_{п}$  – масса летательного аппарата с ГТД, кг;  $G_T$  – расход топлива за полетный цикл, кг/ч.

Отношение уравнений (7) и (8) позволяет определить максимальное снижение расхода топлива и оценить величину снижения расхода топлива в зависимости от дальности полета (рис. 6).

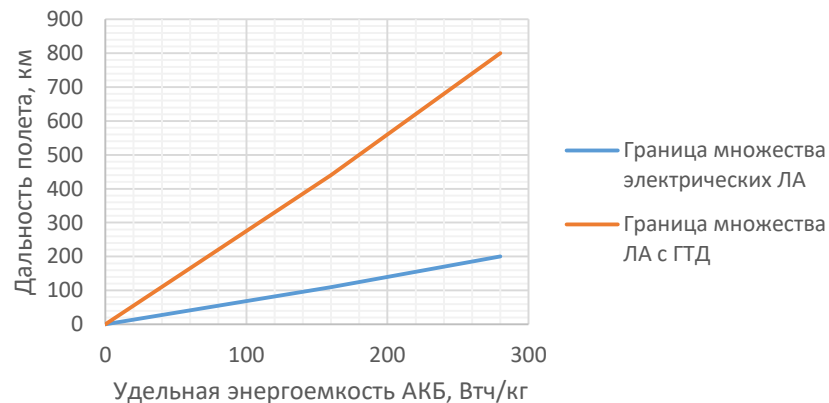


Рис. 6. Границы области применения ГСУ

Помимо удельной энергоёмкости аккумуляторной батареи на дальность полета летательного аппарата с ГСУ существенно влияет КПД электродвигателя (рис. 7).

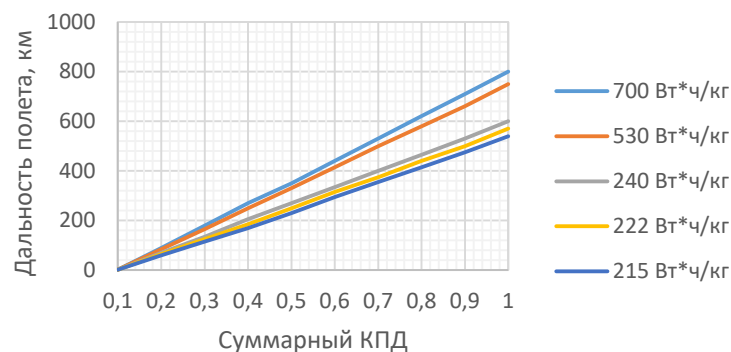
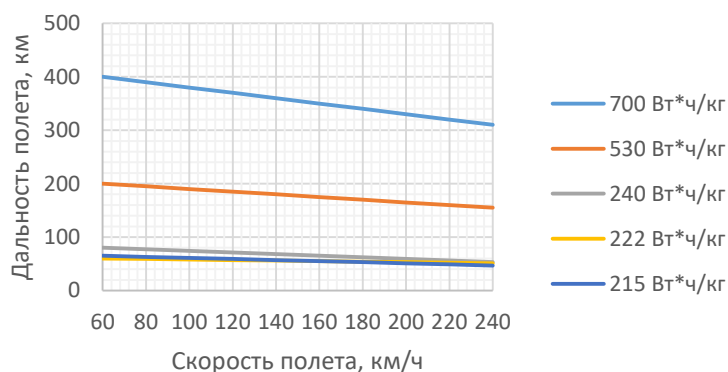


Рис. 7. Зависимость максимальной продолжительности полета летательного аппарата с ГСУ от КПД электрической машины

Скорость полета незначительно влияет на максимальную дальность полета с ГСУ. Эксплуатация летательного аппарата с ГСУ на малых скоростях полета позволяет по-

лучить небольшое уменьшение расхода топлива за счет снижения потребляемой мощности на валу воздушного винта для обеспечения необходимого прироста тяги (рис. 8).



**Рис. 8. Зависимость максимальной продолжительности полета ЛА с гибридной силовой установкой от скорости полета**

### Обсуждение результатов

Из полученных результатов следует, что для обеспечения продолжительности полёта подходит гибридная силовая установка с использованием водородного топливного элемента и горючего топлива. Вследствие достижения большей экологичности, следует выбрать аккумуляторную батарею, которая будет подзаряжаться от солнечной энергии, но, в случае неблагоприятных условий, воспользоваться водородным топливным элементом. При применении ГСУ и достижения длительности полёта следует применить летательный аппарат планерного типа [8].

### Выводы

Выполненный анализ показал, что для длительного полёта БПЛА следует применять с ГСУ планерного типа.

### Библиографический список

1. Абрамов М. М. Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 227-232. – DOI: [10.24412/2071-6168-2022-3-227-233](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-3-227-233).
2. Абрамов М. М., Кириченко А. А., Черепкина М. Ю. Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов // Технологии искусственного интеллекта в интересах развития вооружения, военной и специальной техники. Вопросы прототипирования и апробации: Сб. ст. научно-техн. конф. – Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. – С. 131-140.
3. Андреев П.С., Селин А.И. К вопросу выбора аккумуляторных батарей беспилотного летательного аппарата при условии групповой работы // Universum: технические науки. – 2023. – № 6. – С. 111. DOI: [10.32743/UniTech.2023.111.6.15693](https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.111.6.15693)
4. Юрескул А. Г., Анисимов Е. А., Иванов Ю. И. Система энергоснабжения на основе топливных элементов для беспилотных летательных аппаратов // Морской вестник. – 2020. – № 3(75). – С. 87-89.
5. Бурцев Ю. А., Павленко А. В., Васюков И. В. Понижающий преобразователь энергетической установки на базе топливных элементов для беспилотного летательного аппарата // Электротехника. – 2021. – № 10. – С. 81-85.

6. Плевако С. Ю., Зиненков Ю. В. Перспективы гибридных силовых установок для беспилотных летательных аппаратов // Авиакосмические технологии (АКТ-2018): Тез. XX Межд. научно-техн. конф. и шк. мол. уч., асп. и студ. – Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2019. – С. 161- 163.
7. Боровиков Д. А. Разработка гибридного реактивного двигателя для сверхмалых БПЛА / Авиация и космонавтика: Тез. 19-ой Межд. конф. – М.: Перо, 2020. – С. 43-44.
8. Агульник А. Б. Методика определения оптимального облика гибридных силовых установок с воздушным винтом в системе летательного аппарата. Дис. ... канд. техн. наук: 2.5.15. – М.: МЭИ, 2022. – 113 с.

## References

1. Abramov, M. (2022). New and promising areas of application of unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 3, 227-232. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-3-227-233>
2. Abramov, M., Kirichenko, A., & Cherapkina, M. (2021). New and promising areas of application of unmanned aerial vehicles. In *Proc. of Technologies of artificial intelligence in the interests of the development of weapons, military and special equipment. Prototyping and testing issues* (pp. 131-140). Voennyj` innovacionnyj` texnopolis "ERA".
3. Andreev, P., & Selin, A. (2023). On the issue of choosing batteries for an unmanned aerial vehicle under the condition of group work. *Universum*, 6, 111.
4. Yureskul, A., Anisimov, E., & Ivanov, I. (2020). Power supply system based on fuel cells for unmanned aerial vehicles. *Marine Bulletin*, 3(75), 87-89.
5. Burtsev, Yu., Pavlenko, A., & Vasyukov, I. (2021). Step-down converter of a fuel cell-based power plant for an unmanned aerial vehicle. *Electrical engineering*, 10, 81-85.
6. Plevako, S., & Zinenkov, Yu. (2019). Prospects of hybrid power plants for unmanned aerial vehicles. In *Proc. of Aerospace technologies (ACT-2018)* (pp. 161-163). Elist.
7. Borovikov, D. (2020). Development of a hybrid jet engine for ultra-small UAVs. In *Proc. of Aviation and Cosmonautics* (pp. 43-44). Pero.
8. Agulnik, A. (2020). *Methodology for determining the optimal appearance of hybrid power plants with an air propeller in an aircraft system* [Cand. of Tech. Sciences dissertation]. MPEI.

## Сведения об авторах

**Егоров Михаил Юрьевич**, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, e-mail: [mikhail.yu.egorov@gmail.com](mailto:mikhail.yu.egorov@gmail.com)

**Антонов Никита Сергеевич**, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

## Authors about

**Mikle Yu. Egorov** – Associate Professor, PhD (Tech.), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg State Forest Technical University.

**Nikita S. Antonov** – bachelor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВЫХ ТОКОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ДВУХУРОВНЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Зубко Д.А., Ястребов А.В.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Скурятин Ю.В.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

### Аннотация

Электроприводы находят все большее применение во многих коммерческих и промышленных решениях. Однако в большинстве электроприводов преобразователи частоты с высокочастотными коммутационными устройствами, такими как биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). В результате высокочастотных переключений возникает синфазное напряжение, которое вызывает нежелательное напряжение на валу и, как следствие, токи в подшипниках. Паразитные емкости создают путь для протекания тока в роторе и подшипниках, что приводит к преждевременному выходу подшипников из строя. В литературе были предложены различные методы уменьшения тока в подшипниках, каждый из которых имеет определенные ограничения. Передовые методы уменьшения токов включают в себя двухмостовые и многоуровневые преобразователи частоты. В данной статье представлены моделирование и симуляция подшипниковых токов с использованием синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ) для управления преобразователем частоты, подключенному к асинхронному двигателю. Моделирование проводится с использованием программного обеспечения MATLAB / Simulink для трехфазного асинхронного двигателя мощностью 3 л.с. (2,2 кВт) и частоты переключения в преобразователе частоты 2 кГц.

**Ключевые слова:** подшипниковый ток, синфазное напряжение, преобразователь частоты, синфазный ток, синусоидальная широтно-импульсная модуляция.

## MODELING OF BEARING CURRENTS IN INDUCTION MOTOR WITH TWO-LEVEL FREQUENCY CONVERTER

Daniil Zubko, Alexander Yastrebov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

### Abstract

Electric drives are increasingly used in many commercial and industrial applications. However, most drives utilize PWM inverters with high frequency switching devices such as insulated gate bipolar transistors (IGBTs). High-frequency switching results in in-phase voltage, which causes undesired shaft voltages and consequent bearing currents. Parasitic capacitance creates a path for current flow in the rotor and bearings, leading to premature bearing failure. Various methods of reducing bearing current have been proposed in the literature, each with certain limitations. Advanced current reduction techniques include dual-bridge and multi-level inverters. This paper presents modeling and simulation of bearing currents using sinusoidal pulse width modulation (SPWM) to control a frequency inverter connected to an induction motor. The simulation is carried out using MATLAB / Simulink software for a three-phase induction motor of 3 hp (2.2 kW) and inverter switching frequency of 2 kHz.

**Keywords:** bearing current, common-mode voltage, frequency converter, common-mode, sinusoidal pulse width modulation.





## Введение

Проблема подшипниковых токов в асинхронных двигателях известна десятилетиями. Alger [1] в 1920 годах написал, что причиной этих токов является асимметричное распределение потока внутри двигателя. Проблема была решена с появлением современных методов проектирования и производства двигателей. Однако эта проблема вернулась с появлением частотно регулируемых электроприводов. Из-за того, что в частотных преобразователях транзисторы работают на частотах переключения до 20кГц, то синфазное напряжение, вызванное этими переключениями, имеет такую же частоту, что вызывает синфазные токи, текущие через подшипники. Они оказывают неблагоприятное воздействие и повреждают подшипники. [2-5].

Неисправности, связанные с подшипниковыми токами, наиболее часто возникают в приводах с ШИМ, почти 30%. Подшипниковые токи приводят к преждевременному выходу из строя подшипников, в течение 1-6 месяцев после установки. Для защиты инвестиций в регулируемых приводах рекомендуется использовать прогнозирующее техническое обслуживание для раннего выявления и планомерной замены дефектных подшипников, чтобы избежать скрытых затрат, связанных с простоем и потерей продукции.

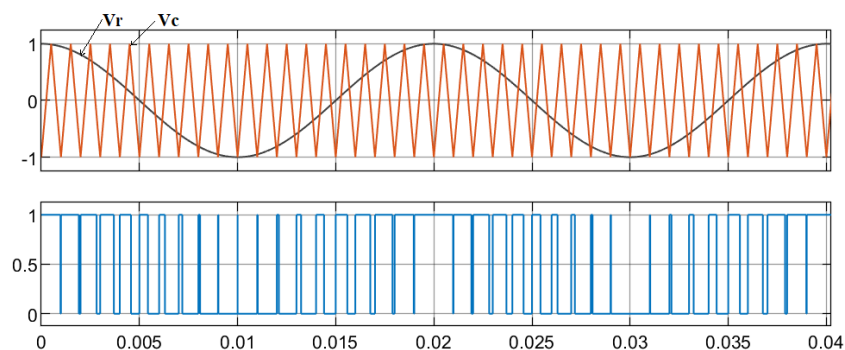
Целью данной статьи является разработка модели для анализа влияния на подшипниковые токи разных методов управления преобразователем частоты.

## Материалы и методы

Для внутреннего управления преобразователем частоты будет использован метод широтно-импульсной модуляции [6]. Он использует схему переключения для изменения формы сигнала выходного напряжения. Выходным напряжением можно легко управлять, изменяя длительность импульсов.

В синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ) используется несколько импульсов на полупериод. Вместо того чтобы поддерживать одинаковую ширину всех импульсов, ширина каждого импульса изменяется пропорционально амплитуде синусоиды [6].

В СШИМ используется высокочастотное опорное напряжение, и его величина сравнивается с опорным моделирующим синусоидальным напряжением. Путем сравнения генерируются управляющие импульсы, которые затем подаются на коммутационные устройства (рис. 1).



**Рис. 1. Синусоидальная широтно-импульсная модуляция:**  
 $V_c$  - опорное напряжение,  $V_r$  - моделирующее синусоидальное напряжение

Техника СШИМ используется с целью снижения гармонического содержания выходного напряжения и получения электрического напряжения, близкого к синусоиде

[7]. Электрическое напряжение, близкое к синусоиде, особенно желательно в высоко-мощных решениях [8].

Для управления IGBT-транзисторами, используется блок синусоидальной широтно-импульсной модуляции, его реализация изображена на рис. 2.

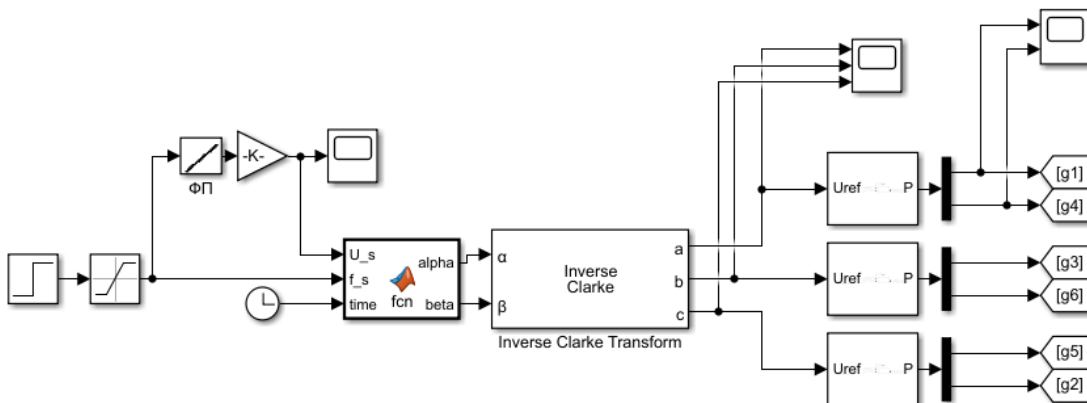


Рис. 2. Блок генерации управляющих сигналов

На вход блока (рис. 2) подаётся частота требуемого напряжения, далее обратным преобразованием Кларка получают три опорных синусоидальных сигнала. Потом они подаются в блоки генерации управляющих сигналов, в которых опорная синусоида сравнивается с треугольным сигналом. Результатом этого сравнения служат управляющие сигналы для транзисторов.

На выходе преобразователя частоты мгновенная сумма напряжений всех трех фаз не равна нулю, и среднее напряжение относительно земли создает так называемое синфазное напряжение.

$$V_{cm} = \frac{V_{an} + V_{bn} + V_{cn}}{3} \quad (1)$$

где  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  и  $V_{cn}$  – это фазные напряжения, генерируемые преобразователем частоты с ШИМ. Синфазное напряжение представляет собой функцию "лестницы" с амплитудой, равной напряжению на шине постоянного тока, и частотой, равной частоте переключения преобразователя частоты. Осциллограмма синфазного напряжения показана на рис. 3.

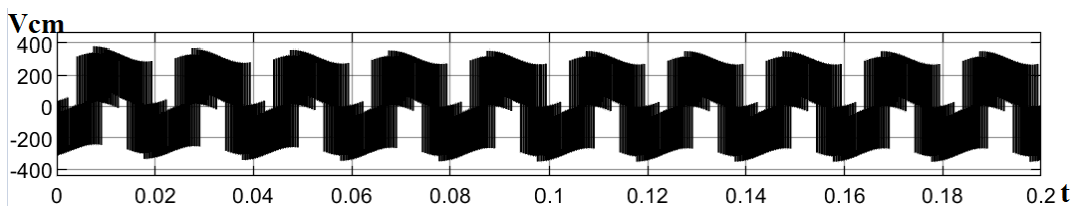


Рис. 3. Осциллограмма синфазного напряжения

Напряжение на валу имеет ту же форму, что и синфазное напряжение, поскольку напряжение на валу формируется в результате воздействия синфазного напряжения на емкостной делитель. Источником синфазного напряжения на выходе преобразователя частоты является появление напряжения на валу из-за распределения паразитных емкостей внутри двигателя. Они создают внутренний емкостной делитель, и ко-

эффицент напряжения на подшипнике (Bearing Voltage Ratio-BVR) может быть выра-  
жен, как в [6, 9]:

$$BVR = \frac{V_{sh}}{V_{cm}} = \frac{C_{sr}}{C_{sr} + C_{rf} + C_b} \quad (2)$$

где  $V_{sh}$  – напряжение на валу;  $C_{sr}$  – емкость между статорной обмоткой и ротором;  $C_{rf}$  – емкость между статором и ротором или емкость воздушного зазора ( $C_g$ );  $C_b$  – ем-  
кость подшипника.

Отношение  $V_{sh}/V_{com}$  обычно находится в диапазоне 1:10, потому что значение  $C_g$  намного больше, чем у  $C_{sr}$ . Значение  $C_{sr}$  невелико по сравнению с другими емкостями из-за относительно большого расстояния и небольшой площади между статором и ротором. Тем не менее, оно оказывает значительное влияние на значение BVR. Рис. 4 показывает эквивалентную цепь синфазного напряжения с различными паразитными емкостями в электрическом двигателе, которые становятся актуальными при работе двигателя с преобразователя частоты с ШИМ [6, 9].

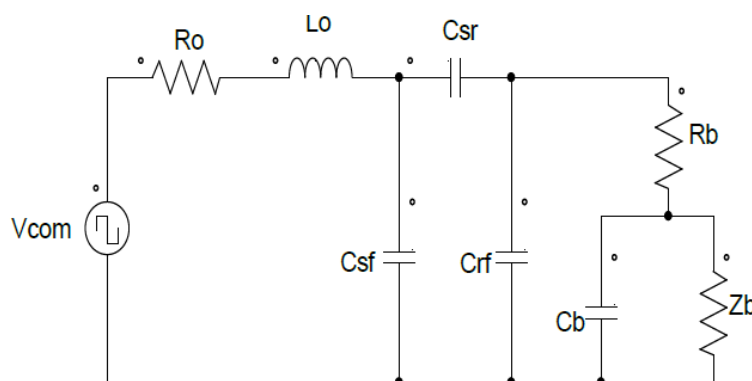


Рис. 4. Схема замещения синфазного режима

Асинхронный двигатель, использованный в статье, имеет мощность 2,2 кВт (3 л.с.) и питается от трехфазного преобразователя частоты с ШИМ. Параметры эквивалентной электрической цепи индукционного двигателя определяются методом двух ваттметров, то есть при проведении испытаний без нагрузки и с заторможенным ротором. Эти данные взяты из [9].

Характеристики асинхронного двигателя: номинальная мощность 3 л. с. (2,2 кВт); номинальное напряжение 440 В/50 Гц (Δ); количество полюсов 4; номинальный ток 5 А; номинальная скорость 1500 об/мин. Характеристики преобразователя частоты: мощность 2,2 кВт; частота переключения 2 кГц; выходная частота 50 Гц; используется метод модуляции синусоидальной ШИМ. Параметры эквивалентной электрической цепи определены (на фазу) и представлены в табл. 1. На рис. 5 показана, используемая в симуляции схема замещения асинхронного двигателя.

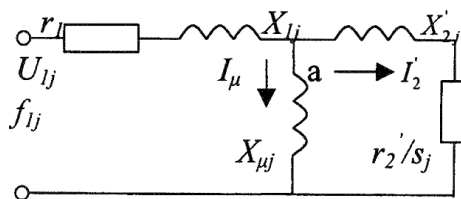


Рис. 5. Схема замещения асинхронного двигателя

## Значения в схеме замещения

Элемент	Значение
$C_{sf}$	11 нФ
$C_{rf}$	1,1 нФ
$C_{sr}$	100 пФ
$C_b$	200 пФ
$Z_b$	7e6 Ом
$R_b$	10 Ом

Значения паразитных емкостей асинхронного двигателя получены из кривых, представленных на рисунке (Calculated Motor and Bearing Capacitance Values) в статье [9].

Вариации емкостей в зависимости от мощности двигателя в лошадиных силах (H.P) определены также с использованием уравнений характеристики емкости, представленных в [6, 9]. Эти уравнения показывают, что паразитные емкости зависят только от физических и конструктивных характеристик двигателя. Электрическая схема резко упрощается, поскольку, импеданс между статорной обмоткой и ротором  $Z_{sr}$  при частотах менее 200 кГц обладает емкостным характером, а импеданс между статорной обмоткой и статором  $Z_{sf}$  представляет собой последовательный RC-контур. При частотах переключения преобразователя частоты паразитные импедансы двигателя обладают чисто емкостным характером, и поэтому эквивалентная электрическая цепь асинхронного двигателя на высоких частотах упрощается [9].

На рис. 6 представлена силовая часть модели системы в среде Simulink для асинхронного двигателя с использованием синусоидальной ШИМ (СШИМ). Частота переключения преобразователя частоты составляет 2 кГц, а выходная частота 50 Гц.

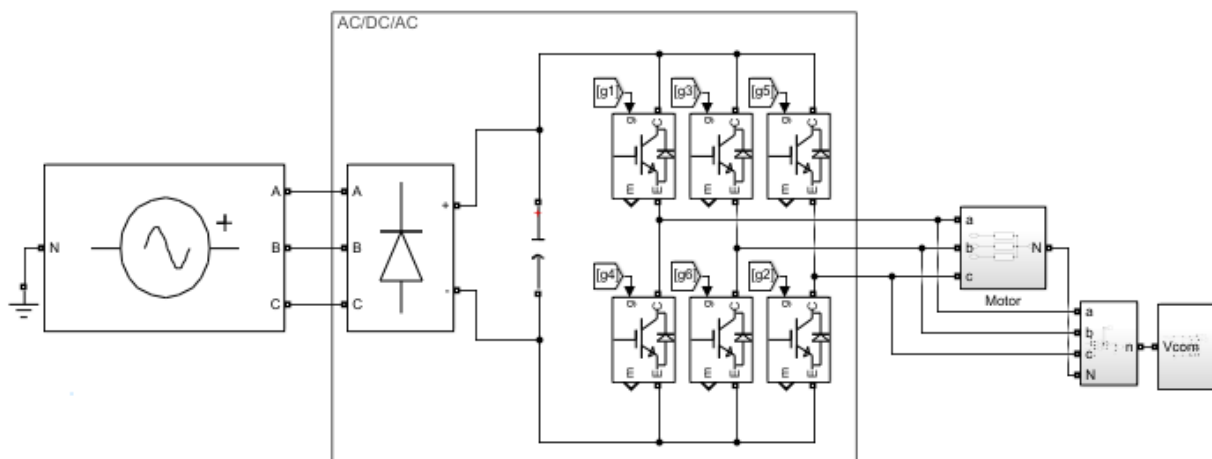


Рис. 6. Силовая часть модели асинхронного двигателя с СШИМ в среде Simulink

На рис. 7-8 представлены осциллограммы токов и напряжений на обмотках двигателя. Также на рис. 9-10 представлены напряжение на роторе и подшипниковый ток.



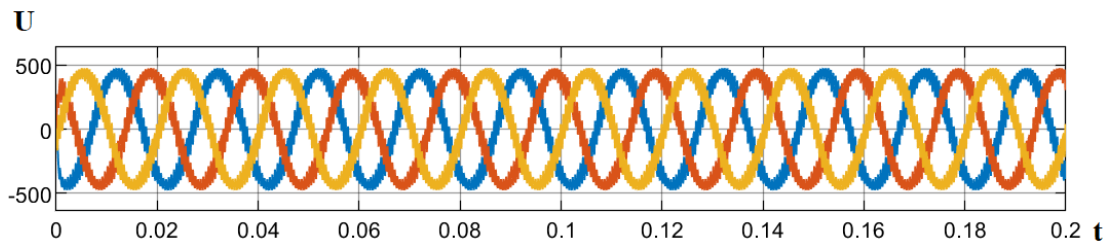


Рис. 7. Осциллограмма напряжения на обмотках двигателя

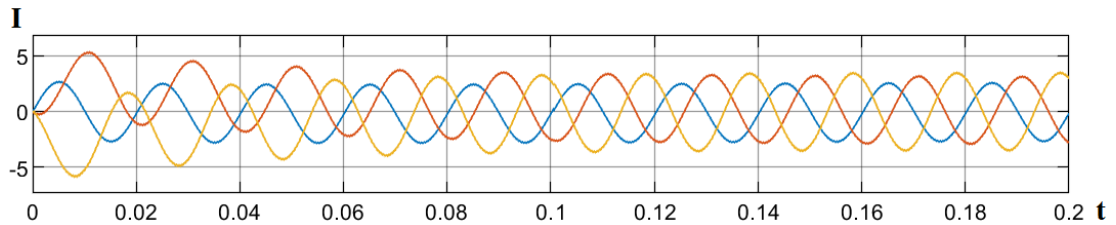


Рис. 8. Осциллограмма токов на обмотках двигателя

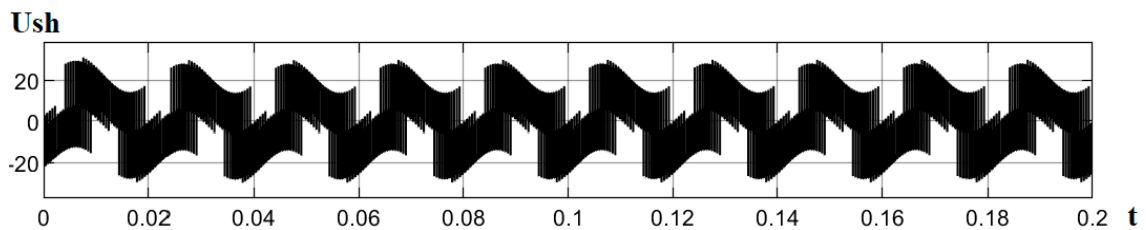


Рис. 9. Осциллограмма напряжения на роторе

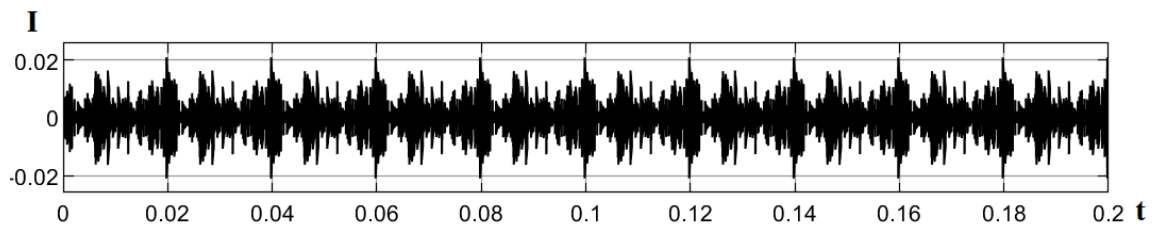


Рис. 10. Осциллограмма подшипникового тока

В табл. 2 представлены амплитуды подшипниковых токов и синфазных напряжений.

Таблица 2

**Значения подшипникового тока в зависимости от синфазного напряжения**

Синфазное напряжение, В	Подшипниковый ток, А
376	0,02
338	0,018
282	0,0157
207	0,0115
188	0,01
$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-9}$



## Выводы (Conclusion)

В данной статье представлено моделирование и симуляции напряжения на валу и подшипникового тока для асинхронного двигателя, питаемого преобразователем частоты с СШИМ. Проведено упрощенное моделирование асинхронного двигателя и эквивалентной цепи синфазного напряжения. Из табл. 2 видно, что при снижении синфазного напряжения уменьшается и подшипниковый ток. Данная модель поможет в дальнейшем исследовании влияния алгоритмов управления преобразователем частоты на подшипниковые токи.

*Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова*

## Библиографический список

1. Alger P., Samson H. Shaft Currents in Electric Machines // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1924. – Vol. XLIII. – P. 235-245.
2. Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages / J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel, G. Skibinski // Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95. – Dallas (TX, USA): IEEE, 1995 – P. 24 -33.
3. System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents / D. Busse, J. Erdman, R.J. Kerkman et al. // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – Vol. 33, Issue 2. – p. 577-584.
4. Bearing currents and their relationship to PWM drives / D. Busse, J. M. Erdman, R. J. Kerkman, et al. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1997. – Vol. 12, Issue 2. – P. 243 – 252.
5. Muetze A., Binder A. Calculation of motor capacitances for prediction of discharge bearing currents in machines of inverter-based drive systems // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. – San Antonio (TX, USA): IEEE, 2005. P. 264-270.
6. Lakshmikhandan K., Srinivasan A., Dharani M. Improved SPWM Modulation Technique to Reduce Harmonic Distortion in Voltage Source Converter // International Journal of Innovation and Scientific Research. – 2016. –Vol. 25, No. 1. – P. 8-14.
7. Modeling of a high-power heating unit with pulse-width modulated control / Y.A. Goltsov, A.S. Kizhuk, V.G. Rubanov, O.O. Yanochkina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 033098.
8. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г. Нелинейные явления в широтно-импульсной системе управления теплотехническим объектом // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 9. – С. 188-192.
9. Ribeiro R., Ruppert E. A Simplified Method for Determining the High Frequency Induction Motor Equivalent Electrical Circuit Parameters to be Used in EMI Effect // 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Seoul: IEEE, 2007. – P. 1244-1248.

## Сведения об авторах

**ЗУБКО Даниил Анатольевич, Ястребов Александр Владимирович**, магистранты направления «Электроэнергетика и электротехника» кафедры Электроэнергетики и автоматики.



## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКИМ (УФ) МЕТОДОМ

Кочеткова А.А., Шакирзянов М.А.

Научный руководитель: д-р техн. наук, доцент Иванов Д.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

### Аннотация

Ежегодно из-за снижения качества передачи электроэнергии фиксируются большие финансовые потери. Эксплуатационная нагрузка повышается, тем самым увеличиваются и аварийные режимы. Каждый второй аварийный режим вводится из-за повреждения изоляции. Дефект изоляции происходит не только ввиду старения оболочек, но также из-за частичных разрядов. Частичный разряд – это небольшой разряд сверхмалой мощности, который возникает в корпусах электроустановок. Своевременная диагностика позволяет обнаруживать частичные разряды. Существует три метода изучения разрядных процессов: акустический, оптический и электромагнитный. Данные способы помогают фиксировать текущее состояние. Поэтому актуальной задачей является разработка портативных и бесконтактных способов мониторинга высоковольтной изоляции. Одним из методов диагностики высоковольтной изоляции является оптический метод. Он основан на использовании оптических датчиков, которые способны обнаруживать дефекты изоляции путем измерения светового излучения, испускаемого из поврежденных участков изоляции. Этот метод позволяет обнаруживать места возможных проблем с изоляцией, такие как трещины, воздушные промежутки или другие дефекты, которые могут привести к утечке тока или короткому замыканию, что впоследствии приведет к разрушению высоковольтной изоляции.

**Ключевые слова:** оптический детектор, УФ камера, разрядные процессы, высоковольтная изоляция, мониторинг.

## STUDY OF DISCHARGE PROCESSES IN HIGH-VOLTAGE INSULATION BY OPTICAL (UV) METHOD

Azaliya Kochetkova, Marat Shakirzyanov

Scientific supervisor: Doctor of Technical Sciences, Associate Professor Ivanov D.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan

### Abstract

Every year, specialists record large financial losses due to the fact that the quality of electricity transmission is decreasing. The operational load increases, thus the emergency modes also increase. Every second emergency mode is introduced due to insulation damage. The insulation defect occurs not only due to the aging of the shells, but also due to partial discharges. A partial discharge is a small discharge of ultra-low power that occurs in the housings of electrical installations. Timely diagnostics allows detecting partial discharges. There are three methods of studying discharge processes: acoustic, optical and electro-magnetic. These methods help to capture the current state. Therefore, an urgent task is to develop portable and contactless methods for monitoring high-voltage insulation. One of the diagnostic methods of high-voltage insulation is the optical method. It is based on the use of optical sensors that are able to detect insulation defects by measuring the light radiation emitted from damaged sections of insulation. This method allows you to



*detect places of possible insulation problems, such as cracks, air gaps or other defects that can lead to current leakage or short circuit. The optical method of diagnostics of high-voltage insulation has high sensitivity and accuracy, which makes it an effective tool for the examination of electrical systems. In addition, the optical method allows for isolation diagnostics without disconnecting equipment from the network, which reduces downtime and increases the efficiency of the examination. Thus, this method is an important tool for preventing accidents and ensuring reliable operation of electrical systems.*

**Keywords:** optical detector, UV camera, discharge processes, high-voltage isolation, monitoring.

## Введение

Оптический метод диагностики высоковольтной изоляции обладает высокой чувствительностью и точностью, что делает его эффективным инструментом для обследования электрических систем. Кроме того, оптический метод позволяет проводить диагностику изоляции без отключения оборудования от сети, что сокращает время простоя и повышает эффективность обследования. Таким образом, этот метод является важным инструментом для предотвращения аварий и обеспечения надежной работы электрических систем.

Оптический метод основан на использовании оптических датчиков, которые могут обнаруживать дефекты изоляции путем измерения светового излучения, испускаемого из поврежденных участков изоляции. Оптический метод обладает высокой чувствительностью и точностью, что позволяет обнаруживать места возможных проблем с изоляцией, такие как трещины, воздушные промежутки или другие дефекты. Этот метод также позволяет проводить диагностику изоляции без отключения оборудования от сети, что сокращает время простоя и повышает эффективность обследования. Таким образом, оптический метод является важным инструментом для предотвращения аварий и обеспечения надежной работы электрических систем.

Целью эксперимента является изучение разрядных процессов оптическим методом. Актуальной задачей исследований является разработка портативного оптического детектора разрядных процессов в высоковольтной изоляции на основе полученных результатов.

## Материалы и методы

Существует несколько методов исследования разрядных процессов на высоковольтной изоляции, включая:

1. Электронно-микроскопический анализ - для изучения структуры и состава разрядов на микроуровне.
2. Спектральный анализ - для изучения спектров свечения разрядов.
3. Измерение электрических параметров - для изучения тока, напряжения и других электрических параметров разрядов.
4. Термография - для измерения температуры разрядов и их распределения в пространстве.
5. Изучение химических реакций - для изучения химических процессов, происходящих в разрядах. Эти методы могут использоваться отдельно или в комбинации для изучения разрядных процессов на высоковольтной изоляции. В данном случае используется оптический метод изучения высоковольтной изоляции с помощью ультрафиолетовой камеры CogoSAM 7.

Использование оптического метода позволяет получить дополнительную информацию о разрядных процессах, такую как скорость распространения разряда, форми-





рование плазменных облаков, взаимодействие разрядов с поверхностью изолятора и другие оптические свойства разрядов.

Ультрафиолетовая камера - это еще один метод диагностики разрядных процессов, который использует специальные камеры для наблюдения и изучения ультрафиолетового излучения, испускаемого разрядами. Этот метод позволяет исследовать различные аспекты разрядных процессов, такие как распределение интенсивности ультрафиолетового излучения, временная динамика разрядов и взаимодействие разрядов с окружающей средой. Данный метод также может использоваться для определения химических реакций, происходящих в результате разрядных процессов, и для исследования влияния ультрафиолетового излучения на материалы, с которыми взаимодействуют разряды. Ультрафиолетовая камера является мощным инструментом для получения информации о физических и химических процессах, происходящих в разрядных системах.

Таким образом, для проведения эксперимента и реализации метода, была создана лабораторная установка (рис. 1), состоящая из следующих элементов:

- источника высокого напряжения АИД-70М (максимальное переменное напряжение 50 кВ);
- испытуемого стеклянного ВИ (ПС70Е);
- контактного датчика для измерения кажущегося заряда электрическим методом;
- цифрового осциллографа TBS2204В;
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (National Instruments USB-6351) и персонального компьютера (ПК) с разработанным программным обеспечением (ПО);
- калибратора кажущегося заряда для калибровки измерительной системы CAL1В;
- датчика температуры и относительной влажности (CENTER 310);
- ультрафиолетовой камеры CoroCAM 7.



**Рис. 1. Экспериментальная установка**

Причиной частичных разрядов служат загрязнения или дефекты на поверхностях изолятора. Немало важную роль играет также влажность поверхности изоляторов.

Таким образом, были подготовлены стеклянные высоковольтные изоляторы ПС70Е. Суспензия, которая являлась «загрязнителем» изоляторов состояла из: 40 грамм связующего вещества каолина, 1000 мл воды и соли (NaCl), в зависимости от степени загрязнения. На рис. 2 изображены изоляторы в разных состояниях. Суспензия наносилась слоями, которые просыхали в течение определенного времени.

Дефектоскопом в эксперименте являлась ультрафиолетовая камера CoroCAM 7, с помощью которой можно было визуализировать частичные разряды. А именно на экране камеры при появлении частичных разрядов на дисплее визуализировались в красные «пятна». После чего можно было использовать данные для определения зависимости разрядных процессов от дефектов на высоковольтных изоляторах.



**Рис. 2. Искусственно загрязненные изоляторы и разбитый изолятор:**  
1 - «нормальное» состояние изолятора (плотность покрытия  $0,06 \text{ мг/см}^2$ );  
2 - «ухудшенное» состояние изолятора (плотность покрытия  $0,2 \text{ мг/см}^2$ );  
3 - «предаварийное» состояние изолятора (плотность покрытия  $0,4 \text{ мг/см}^2$ )

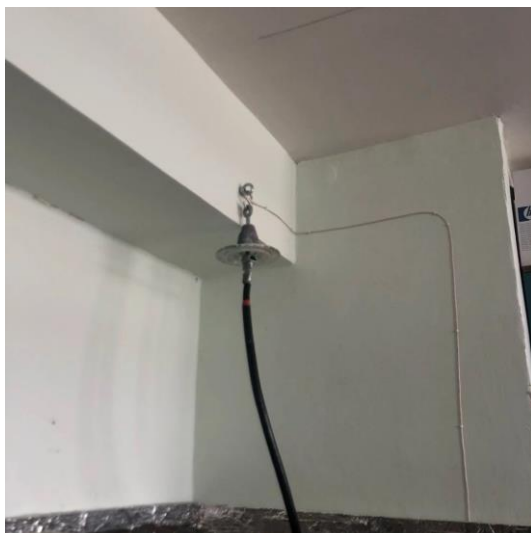
Этот метод основан на использовании ультрафиолетовой камеры для наблюдения разрядных процессов в изоляции. Ультрафиолетовая камера (рис. 3) способна обнаруживать разрядные явления, которые могут указывать на дефекты изоляции, такие как короткие замыкания или пробои.



**Рис. 3. Ультрафиолетовая камера CoroCAM 7**

Использование ультрафиолетовой камеры позволяет оперативно обнаруживать потенциально опасные места на изоляции и проводить предупредительную диагностику перед возможным возникновением аварии. Этот метод также позволяет проводить обследование оборудования под напряжением, что уменьшает время простоя и повышает безопасность работ. Таким образом, изучение разрядных процессов с помощью ультрафиолетовой камеры является важным инструментом для обеспечения надежной работы электрических систем и предотвращения аварийных ситуаций.

В эксперименте использовались три изолятора. Установив рабочее переменное напряжение на источнике АИД-70М, которое было неизменным на протяжении всего эксперимента, на испытуемом «чистом» изоляторе было зафиксировано минимальное количество разрядов, т.е. «красные пятна» были небольшими. На рис. 4 изображен испытуемый изолятор в «нормальном» состоянии.



**Рис. 4. Испытуемый изолятор в «нормальном» состоянии а (плотность покрытия 0,06 мг/см<sup>2</sup>)**

После чего был взят испытуемый высоковольтный стеклянный изолятор, покрытый одним слоем суспензии. Так называемый «ухудшенный» изолятор. Количество красных пятен становилось больше, таким образом, при установленном напряжении можно было наблюдать и увеличение красных пятен, т.е. частичных разрядов.

На «предаварийном» изоляторе, точнее грязном, при 5 мВ разряды визуализировались на весь дисплей камеры. Можно сделать вывод, что при увеличении дефектов на высоковольтных изоляторах увеличивается и количество разрядов.

Помимо ультрафиолетовой камеры существуют также и другие оптические устройства для контроля разрядных процессов в высоковольтной изоляции. Например, оптические детекторы, которые позволяют производить мониторинг и диагностику ЛЭП.

### **Результаты (Results)**

Таким образом, можно сделать вывод, что количество разрядов при постоянном напряжении на «предаварийном» изоляторе больше, чем на изоляторе в «нормальном» состоянии. В зависимости от загрязнения зависит количество разрядов. То есть чем «грязнее» изолятор, тем больше разрядов при увеличении напряжении.

### **Выводы (Conclusion)**

Основываясь на результатах изучения высоковольтной изоляции, реальна разработка оптического детектора разрядных процессов в высоковольтной изоляции.

Оптический детектор - это устройство, способное обнаруживать и регистрировать различные разрядные явления, такие как короткие замыкания, пробой или другие дефекты изоляции, с использованием оптических методов. Работа оптического детектора разрядных процессов основана на использовании оптических сенсоров или камер, способных регистрировать световые вспышки, которые возникают в результате разрядных процессов. Эти световые вспышки могут быть вызваны искровыми разрядами, плазменными выделениями или другими электрическими явлениями, которые указывают на наличие дефектов в изоляции. Оптический детектор разрядных процессов может быть установлен на оборудовании или инфраструктуре электрических систем для постоянного мониторинга и обнаружения потенциально опасных явлений. Это позво-

ляет оперативно реагировать на возможные проблемы и предотвращать аварийные ситуации. Таким образом, оптический детектор разрядных процессов является важным инструментом для обеспечения безопасности и надежности работы электрических систем.

Портативный оптический детектор разрядных процессов может использоваться для мониторинга состояния высоковольтной изоляции в различных условиях, включая наружную среду и внутренне помещения. Он может быть особо полезен в областях, где высоковольтные системы используются для передачи электроэнергии на большие расстояния, например, в электрических подстанциях или на линии электропередач.

### Библиографический список

1. Получение и интерпретация изображений электрических разрядов для дефектоскопистов. [Сайт]: ООО «ПАНАТЕСТ». – URL: [http://corocam-uv.ru/menu\\_6\\_1.html](http://corocam-uv.ru/menu_6_1.html) (Дата обращения: 25.11.2022)
2. Лазерно-электрический метод контроля дефектности высоковольтных диэлектрических элементов / В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Голенищев-Кутузов, А.В. Семенников и др. // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2022. – Т. 86, № 11. – С. 1660-1663. DOI: 10.31857/S0367676522110151. EDN: LJURTO.
3. Иванов Д.А. Экспериментальная система мониторинговой диагностики высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 6. – С. 15-23. DOI: 10.25791/pribor.6.2022.1342. EDN: BOUKJH.
4. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 9-16.
5. Пат. 2 359 280 Рос. Федерация. МПК G01R 31/12. Способ бесконтактного и дистанционного контроля состояния гирлянд изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередачи / М.Н. Бадретдинов, А.М. Гатауллин, В.Л. Матухин, Д.Ф. Губаев; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ)». Заявка № 2007133044/28, 03.09.2007; Оpubл.: 20.06.2009.
6. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах / Д.А. Поляков, К.И. Никитин, Н.А. Терещенко и др. // Омский научный вестник. – 2020. – № 1 (169). – С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38.
7. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 370 с.

### Сведения об авторах

**Иванов Дмитрий Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Промышленной электроники, КГЭУ, ORCID: [0000-0003-1344-7453](https://orcid.org/0000-0003-1344-7453)

**Кочеткова Азалия Адиповна**, магистрант, инженер-исследователь НИЛ «БРПЭ», КГЭУ, e-mail: [azalkakarimova.16@mail.ru](mailto:azalkakarimova.16@mail.ru).

**Шакирзянов Марат Альбертович**, магистрант, КГЭУ, e-mail: [maratlol2@mail.ru](mailto:maratlol2@mail.ru)

### Authors about

**Ivanov Dmitry Alekseevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial electronics, KSPEU.

**Kochetkova Azaliya Adipovna**, Master's student, research engineer of the NIL "BRPE", KSPEU, e-mail: [azalkakarimova.16@mail.ru](mailto:azalkakarimova.16@mail.ru)

**Shakirzyanov Marat Albertovich**, Master's student, KSPEU, e-mail: [maratlol2@mail.ru](mailto:maratlol2@mail.ru)



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И РЕАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ТЕПЛОВОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ШКОЛЫ

Кутилина К. А.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Абасев Ю. В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

### **Аннотация**

*Данное исследование посвящено анализу результатов тепловой модернизации школ, с целью выявления влияния этого процесса на теплотехнические характеристики зданий и качество образования. В рамках проекта были использованы различные методы, включая измерения энергопотребления, теплотеря и оценку комфорта внутри школьных помещений. Результаты анализа выявили существенное улучшение энергетической эффективности школ после модернизации, что сопровождается улучшением условий обучения и комфорта внутри зданий. В рамках данного исследования было проведено исследование эффектов тепловой модернизации школьных зданий. Мы применили подход, который включает в себя анализ теплотехнических параметров до и после модернизации, измерение энергопотребления, а также оценку комфорта для обучающихся и преподавателей. Результаты исследования позволяют не только сделать выводы о снижении энергозатрат, но и выделить положительное влияние модернизации на образовательный процесс и общую атмосферу в учебных заведениях. Обсуждение включает анализ социальных и экономических аспектов, подчеркивая важность подобных проектов для будущего образования и устойчивого развития.*

**Ключевые слова:** экономия, потеря тепла, отопительный сезон, энергопотребление, анализ.

## THEORETICAL AND REAL EFFECT OF THE SCHOOL'S THERMAL MODERNIZATION

Kutilina K. A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan

### **Abstract**

*This study is devoted to analyzing the results of thermal modernization of schools, in order to identify the impact of this process on the thermal characteristics of buildings and the quality of education. The project used comprehensive methods, including measuring energy consumption, heat loss and assessing comfort inside school buildings. The results of the analysis revealed a significant improvement in the energy efficiency of schools after modernization, which is accompanied by an improvement in learning conditions and comfort inside the buildings. This study conducted a comprehensive study of the effects of thermal retrofitting of school buildings. We applied an integrated approach, including analysis of thermal parameters before and after modernization, measurement of energy consumption, and assessment of comfort for students and teachers. The results of the study allow us not only to draw conclusions about reducing energy costs, but also to highlight the positive impact of modernization on the educational process and the general atmosphere in educational institutions. The discussion includes analysis of social and economic aspects, highlighting the importance of such projects for the future of education and sustainable development.*

**Keywords:** savings, heat loss, heating season, energy consumption, analysis.



В наше время, когда стремительные изменения в климате и повышенные требования к энергоэффективности становятся фундаментальными проблемами нашего общества, важность проведения исследований в области энергосбережения и повышения устойчивости зданий становится более чем очевидной. В этом контексте, тепловая модернизация школьных зданий привлекает внимание как один из ключевых аспектов улучшения энергетической эффективности и обеспечения комфортных условий для обучающихся и педагогов, тенденция к росту спроса на энергию сохранится в будущем [1].

Существующее положение в области энергосбережения и теплоснабжения школьных учреждений выдвигает на повестку дня проблему дефицита эффективных систем отопления и устаревших теплоизоляционных технологий. Многие школы сталкиваются с высокими энергозатратами, неудовлетворительными условиями внутренней среды и недостаточной устойчивостью к внешним климатическим воздействиям. Это влечет за собой не только финансовые издержки, но и негативно сказывается на уровне комфорта и обучаемости внутри учебных заведений.

В свете этих вызовов и ограничений, проведение научного исследования, посвященного тепловой модернизации школ, становится насущной необходимостью. Предполагается, что результаты данного исследования не только предоставят конкретные данные о технических и энергетических аспектах модернизации, но и поддержат формирование нового понимания о влиянии таких мероприятий на образовательный процесс, здоровье обучающихся и общественные аспекты.

Актуальность данного исследования заключается в его потенциальной способности предложить определенный подход к решению проблемы. Разработка новых подходов к тепловой модернизации школьных зданий может быть не только техническим вкладом в область инженерии, но и внести существенный вклад в научное понимание того, каким образом физическое окружение воздействует на обучение и образование.

Целью нашего исследования является анализ эффекта тепловой модернизации школ. Мы стремимся выявить изменения в теплотехнических параметрах зданий, энергопотреблении [2], а также оценить влияние модернизации на образовательный процесс и обучающую среду.

Гипотеза данного исследования основывается на предположении, что тепловая модернизация школ, внедряемая с использованием современных технологий, оказывает положительное влияние не только на энергетическую эффективность зданий, но и на условия обучения и общий комфорт обучающихся. Ожидается, что модернизированные школьные здания снизят энергопотребление, улучшат внутреннюю среду и способствуют более эффективному обучению. Где объектом исследования являются школьные здания, подвергшиеся тепловой модернизации. Исследование охватывает широкий спектр характеристик, включая теплотехнические параметры, энергопотребление, качество внутренней среды и образовательные показатели. Проводится анализ энергетических характеристик до и после модернизации с использованием данных счетчиков энергопотребления. Оценивается уровень освещенности, влажности, температуры и концентрации вредных веществ. Используются портативные измерительные приборы. Проводится анализ успеваемости и активности обучающихся до и после модернизации с использованием школьных архивов и статистических данных.

Для проведения измерений и оценок используются современные тепловизоры, датчики температуры и влажности, портативные приборы для измерения концентрации вредных веществ, а также системы автоматического учета энергопотребления. Используются приборы от ведущих производителей, обеспечивающие точность и достоверность результатов. Также энергетический аудит является одним из полезных инструментов повышения энергоэффективности [3].



Некоторые меры достижения энергосбережения: проведение тепловой модернизации предположительно должно сопровождаться снижением энергопотребления для отопления школьных зданий. Результаты могут включать конкретные цифры по сокращению затрат на энергию в теплосезон. Измерение параметров, таких как влажность, температура, освещенность, позволит оценить, насколько тепловая модернизация влияет на комфорт внутри школьных помещений. Анализ данных образовательных показателей может выявить изменения в успеваемости и активности учащихся после внедрения модернизации, подчеркивая влияние комфортных условий на обучающий процесс. Расчеты экономической эффективности могут демонстрировать окупаемость вложений в тепловую модернизацию и перспективы дальнейших экономических выгод [4].

Эти ожидаемые результаты предполагают, что тепловая модернизация оказывает положительное воздействие на различные аспекты школьных зданий и образовательной среды. Полученные данные подтверждают существенное снижение энергопотребления после тепловой модернизации школьных зданий. Это свидетельствует о успешной реализации энергосберегающих технологий и эффективности внедренных изменений.

Анализ параметров внутренней среды показывает положительные изменения в условиях обучения. Уровень влажности, температура и освещенность соответствуют стандартам, что сказывается на общем комфорте в учебных помещениях.

Наблюдается улучшение успеваемости и активности учащихся после тепловой модернизации. Это может быть связано с созданием более комфортной и благоприятной образовательной среды.

Анализ экономических показателей демонстрирует, что вложения в тепловую модернизацию окупаются за относительно короткий период времени. Это подчеркивает не только энергосберегающий, но и экономический эффект проекта.

Результаты исследования указывают на положительное воздействие тепловой модернизации школ на несколько ключевых аспектов. Энергетическая эффективность повышается, что является важным шагом в сторону устойчивого развития. Улучшение теплотехнических параметров свидетельствует о правильном выборе технологий теплоизоляции.

Влияние на качество внутренней среды и образовательный процесс подчеркивает необходимость в комфорте учащихся для эффективного обучения. Успех в экономическом плане также является заметным плюсом, демонстрируя не только заботу о здоровье и комфорте, но и практическую целесообразность внедрения подобных проектов [5].

Однако, несмотря на положительные результаты, следует учитывать, что эффекты могут различаться в зависимости от конкретных условий каждого учебного заведения. Также важно обеспечить правильное техническое обслуживание систем и теплообменников для поддержания долгосрочной эффективности модернизированных систем. Эти соображения могут служить базой для дальнейших исследований и разработки наилучших практик в области тепловой модернизации школьных зданий.

Цель нашего исследования заключалась в проведении анализа воздействия тепловой модернизации школ, с целью выявления изменений в теплотехнических характеристиках, энергопотреблении, образовательном процессе и качестве внутренней среды. Решение поставленной цели позволило получить целый ряд важных результатов, подчеркивающих научную новизну и практическую значимость данного исследования.



Экспериментальные данные подтверждают существенное снижение энергопотребления после внедрения тепловой модернизации. Сокращение затрат на отопление свидетельствует о высокой эффективности новых технологий и инженерных решений.

Измерение параметров внутренней среды подтверждает положительные изменения в условиях обучения. Уровень влажности, температура и освещенность соответствуют стандартам, что сказывается на общем комфорте в учебных помещениях.

Наблюдается улучшение успеваемости и активности учащихся после тепловой модернизации. Это свидетельствует о позитивном влиянии комфортных условий на образовательный процесс и обучаемость на местах. Существуют научные исследования, доказывающие, что улучшение процесса запоминания школьниками материала и достижение хороших показателей в учебе напрямую связано с микро-климатом в помещениях школы [6].

Научная новизна данного исследования заключается в анализе эффекта тепловой модернизации школ, как процесса обновления объекта, объединяя технические, энергетические и образовательные аспекты. Полученные результаты вносят вклад в понимание воздействия тепловой модернизации на различные аспекты школьных зданий, что может послужить основой для разработки более эффективных и устойчивых решений в сфере образования и энергосбережения. Практическая значимость работы заключается в том, что представленные данные и выводы могут быть использованы административными органами и инженерами для оптимизации процессов модернизации школьных зданий, с учетом не только технических, но и социально-экономических аспектов [7].

#### Библиографический список

1. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. – 2008. – Vol. 40, Issue 3. – P. 394-398.
2. Гусева А.А., Абасев Ю.В. Пути повышения энергоэффективности зданий и сооружений // *Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Мат-лы VII Нац. научно-практ. конф.* – Казань: КГЭУ, 2022. – С. 287-289.
3. Butala V., Novak P. Energy consumption and potential energy savings in old school buildings // *Energy and Buildings*. – 1999. – Vol. 29, Issue 3. – P. 241-246.
4. Никитин В.Е. Пути сохранения энергии в системах теплоснабжения // *Эпоха науки*. – 2015. – № 4. – С. 115.
5. Зачем нужна тепловая модернизация и почему нельзя упускать шанс заплатить за это меньше [Электронный ресурс] // *Звезда* [12 февраля 2020 г.]. URL: <https://zviazda.by/ru/news/20200212/1581491726-zachem-nuzhna-teplovaya-modernizaciya-i-pochemu-nelzya-upuskat-shans>. (дата обрац. 15.11.2023)
6. Гертис К., Зедльбауэр К. Повышение энергоэффективности школьных зданий // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2010. – № 3. – С. 544-552.
7. Krawczyk D.A. Teoretical and real effect of the school's thermal modernization – A case study // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 81. – P. 30-37.





## УСТРАНЕНИЕ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРОФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 25 КВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ СТРУКТУРЫ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРА

Назаров Ж.И., Пушмина А.Н.

Научный руководитель: ассистент Рыжов Н.А.

Красноярский институт железнодорожного транспорта  
(филиал ИрГУПС), г. Красноярск

### Аннотация

Тиристорные выпрямители широко применяются в области железнодорожной инфраструктуры. В результате их использования в дополнение к значительному входному току в сеть попадает огромное количество гармоник. Чтобы избежать таких гармоник, а также для компенсации реактивной мощности, используются гибридные фильтры, состоящие из активных и пассивных фильтров. Что касается подключения различных пассивных и активных фильтров в гибридном фильтре, возможны различные конфигурации гибридных фильтров. Каждая из этих конфигураций имеет разные функции устранения гармоник и компенсации реактивной мощности. Поскольку электрофицированная железная дорога имеет нелинейный и переменный характер, разработана новая структура гибридного фильтра, которая компенсирует реактивную мощность и устраняет гармоники для достижения желаемого уровня относительно обычных стандартов допустимого уровня гармоник.

**Ключевые слова:** пассивный фильтр, активный фильтр, переменный ток, реактивная мощность, фильтр гармоник, гармонические искажения.

## ELIMINATION OF HARMONICS IN ELECTRIFIED 25 KV AC RAILWAYS USING A NEW HYBRID FILTER STRUCTURE

Jan Nazarov, Arina Pushmina

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk

### Abstract

Thyristor rectifiers are widely used in the field of railway infrastructure. As a result of their use, in addition to a significant input current, a huge number of harmonics enter the network. To avoid such harmonics, as well as to compensate for reactive power, hybrid filters consisting of active and passive filters are used. As for the connection of various passive and active filters in a hybrid filter, various configurations of hybrid filters are possible. Each of these configurations has different harmonics elimination and reactive power compensation functions. Since the electrified railway

**Keywords:** passive filter, active filter, alternating current, reactive power, harmonic filter, harmonic distortion.

### Введение

Развитие современных густонаселенных городов делает общественный транспорт неизбежным. Среди всех транспортных средств все большее развитие получают электрофицированные железные дороги, имеющие такие преимущества, как высоко-



скоростная транспортировка, безопасность, экологическая устойчивость, и экологически чистое производство. Тиристорные выпрямители, имеют нелинейную характеристику, приводящую к гармоническим искажениям тока. Учитывая импеданс системы, такие выпрямители приводят еще и к гармоническим искажениям напряжения. С точки зрения электросетей электрофицированная железная дорога представляет собой нелинейно-переменную нагрузку и считается одной из наиболее благоприятных нагрузок.

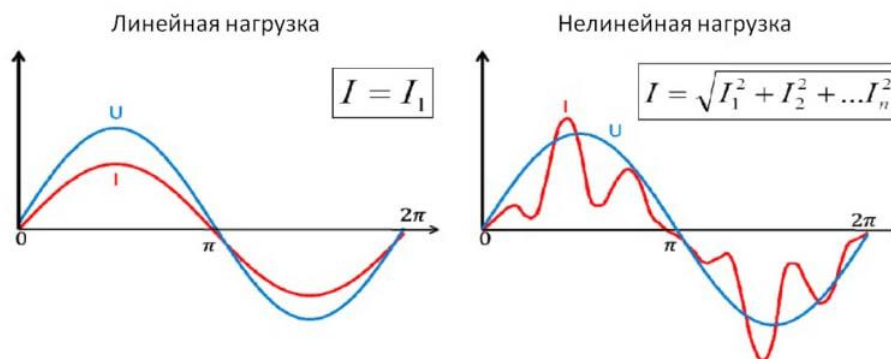


Рис. 1. Сравнение временных диаграмм линейной и нелинейной нагрузки

Помимо высокого потребления реактивной мощности, электрофицированная железная дорога излучает огромное количество гармонического тока, который почти в 2-3 раза превышает допустимый уровень гармоник системы. Гармоники вызывают множество проблем, таких как чрезмерные потери в системе, неподходящее функционирование систем управления и неправильное срабатывание реле. Чтобы компенсировать реактивную мощность и устранить гармоники, необходимо применить соответствующий фильтр. Существует три типа фильтров: пассивный, активный и гибридный фильтр, представляющий собой комбинацию активных и пассивных фильтров. Каждый из пассивных и активных фильтров имеет свои плюсы и минусы. Однако гибридные фильтры имеют преимущества как активных, так и пассивных фильтров, но, с другой стороны, имеют ряд недостатков по сравнению с этими двумя фильтрами.

### Материалы и методы

Структура пассивных фильтров проста и состоит из таких элементов, как катушка индуктивности, конденсатор и резистор. Этот фильтр был впервые использован в 1940 году для устранения гармоник. Пассивные фильтры делятся на резонансные и демпферные. В резонансном типе катушка индуктивности и конденсатор соединены таким образом, что резонансная частота практически не имеет импеданса. Фактически на этой частоте происходит короткое замыкание. Демпферный тип имеет низкий импеданс в диапазоне гармонических частот. Резонансные пассивные фильтры используются для устранения основных гармоник, таких как гармоники 5-го и 7-го порядка, а демпферные фильтры используются для устранения гармоник более высокого порядка. Пассивные фильтры также используются для коррекции коэффициента мощности системы и обеспечения реактивной мощности сети. Фактически, наиболее важным параметром пассивного фильтра является количество подаваемой в сеть реактивной мощности на основной частоте. Хотя разработка пассивного фильтра стоит недорого, она может вызвать некоторые проблемы. Одной из проблем является изменение его параметров, вызванное нагревом или сроком службы, что постепенно приводит к изменению функциональности фильтра. К другим недостаткам пассивных фильтров от-

носятся возможность резонанса, необходимость проектирования для каждой частоты гармоник, недостаточность из-за случайного изменения амплитуды и зависимость характеристики фильтрации от импеданса системы.

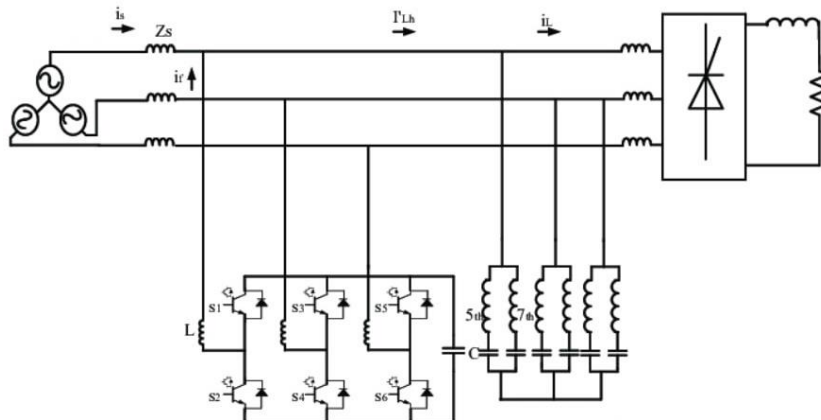


Рис. 2. Параллельное подключение пассивного и активного фильтров

В результате развития силовой электроники и проблем с пассивными фильтрами в 1970-х годах были введены активные фильтры. Эти фильтры имеют инверторы и считаются силовым электронным оборудованием, что приводит к более высокой стоимости. Преимущества активных фильтров заключаются в одновременном устранении множества гармоник и предотвращении резонанса с системой. Поскольку эти фильтры напрямую связаны с сетью, их электронное оборудование должно выдерживать большую мощность, что приводит к высокой стоимости, которая считается одним из наиболее важных недостатков активных фильтров. Активные фильтры в основном используются в ситуациях, когда пассивные фильтры не могут работать из-за резонанса. Активные фильтры играют роль источника тока, который подает в сеть ток той же амплитуды и противоположного направления. Активные фильтры состоят из различных компонентов, включая инвертор, который является источником тока или источником напряжения. Инвертор напряжения наиболее предпочтителен из-за меньшего размера, особенно конденсатора постоянного тока, меньшей стоимости и большей эффективности по сравнению с инвертором тока. На рис. 3 показан инвертор напряжения.

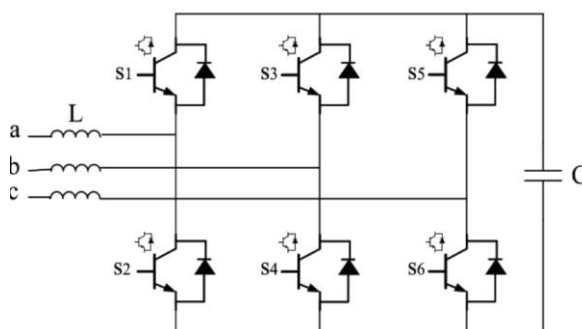


Рис. 3. Инвертор напряжения

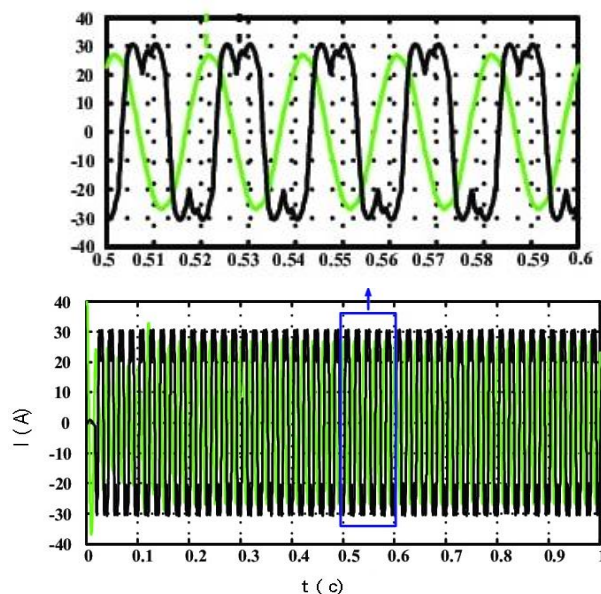
Этот фильтр способен выполнять различные функции в электрической системе, помимо контроля гармоник. Функциональность активного фильтра сильно зависит от импеданса системы. С другой стороны, чтобы устранить каждую гармоническую составляющую, необходим пассивный фильтр. Также в случае случайных изменений амплитуды и фазы гармонической составляющей этот фильтр перестанет быть эффек-

тивными. Кроме того, активные фильтры имеют множество преимуществ, таких как отсутствие резонанса с сопротивлением сети, отсутствие необходимости рассчитываться для каждой гармоники и компенсация нескольких гармоник одновременно, компенсация мерцания, компенсация реактивной мощности и компенсация несимметрии напряжений. Поскольку номинальная мощность их переключателей пропорциональна мощности сети, необходимо использовать переключатели большой мощности, что увеличивает стоимость таких фильтров. По сравнению с пассивными фильтрами активные фильтры очень дороги.

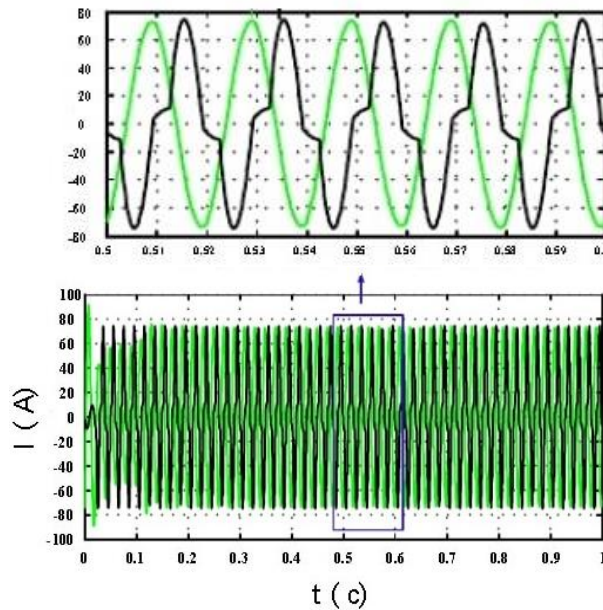
Поэтому, чтобы воспользоваться преимуществами как пассивных, так и активных фильтров и использовать экономичный фильтр, гибридные фильтры стали очень распространены. Гибридные фильтры состоят из активных и пассивных фильтров, соединенных друг с другом. Таким образом, каждый из активных и пассивных фильтров перекрывает недостатки другого. Как следствие, характеристики гармоник пассивного фильтра увеличиваются, а номинальная мощность активного фильтра снижается. Однако основной причиной применения гибридных фильтров является снижение номинальной мощности активного фильтра. Таким образом, номинальное напряжение и номинальный ток активного фильтра уменьшаются, а также снижается стоимость фильтра, что было наиболее важной проблемой. Это обусловило разнообразие конструкций гибридных фильтров.

Схема этой конфигурации показана на рис. 2. Пассивный фильтр настроен на устранение желаемых гармоник, которые обычно являются основными гармониками, а активные фильтры подают необходимый ток гармоник для компенсации в сеть. В этой конфигурации активный фильтр действует как источник тока. Активный фильтр управляется таким образом, что он действует как бесконечный импеданс на основной частоте и показывает низкое сопротивление на частоте гармоник. Функциональность параллельного фильтра обуславливает эффективность этой конфигурации при компенсации асимметричного тока (рис. 4-6).

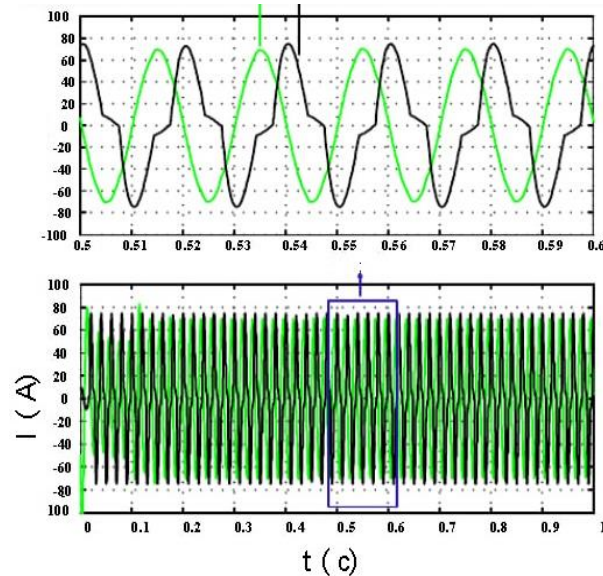
Такая конфигурация приводит к улучшению характеристик пассивного фильтра. С другой стороны, по мере снижения мощности активного фильтра снижается и его стоимость. Поскольку активный фильтр устанавливается на клеммах пассивных фильтров, компенсационные характеристики и гибкость фильтра улучшаются.



**Рис. 4. Сила тока фаз А до (черная линия) и после (зеленая линия) применения гибридного фильтра**



**Рис. 5. Сила тока фаз В до (черная линия) и после (зеленая линия) применения гибридного фильтра**



**Рис. 6. Сила тока фазы С до (черная линия) и после (зеленая линия) применения гибридного фильтра**

Наилучшей конструкцией гибридного фильтра является та, у которой номинальная мощность активной части невелика, а эффективность компенсации гармоник и улучшения качества электроэнергии находится на лучшем уровне. Обычно при проектировании гибридного фильтра пассивная часть предназначена для компенсации гармоник низкого порядка (5-й и 7-й) с большими амплитудами, а активная часть — для компенсации гармоник более высокого порядка с меньшими амплитудами. Электрическая железная дорога не только подает в сеть большое количество тока гармоник, но и потребляет высокую реактивную мощность. Следовательно, предлагаемая конструкция должна обеспечивать необходимую реактивную мощность.

Сравнение значений до и после применения гибридного фильтра представлено в табл. 1, что демонстрирует эффективность предлагаемого гибридного фильтра.

**Сравнение значений гармоник до и после применения гибридного фильтра**

Фаза	Гармоническое искажение	
	До фильтрации	После фильтрации
А	33,72	1,35
В	30,52	1,20
С	29,89	1,30

**Результаты**

В данной статье было рассмотрено применение гибридных фильтров гармоник. Эти фильтры представляют собой модернизированную версию традиционных фильтров гармоник, обладающих улучшенными характеристиками и способностью обработки большего диапазона частот.

Одним из основных преимуществ гибридных фильтров гармоник является их способность эффективно снижать гармонические искажения, возникающие в электроэнергетических сетях. Они могут успешно удалять гармоники, порождаемые современной электроникой, что является особенно актуальным в наше время, когда использование электронных устройств и технологий становится все более распространенным.

**Выводы**

Разработанная модель способна не только устранять гармоники, но и компенсировать необходимую реактивную мощность на электрофицированной железной дороге. В представленной модели недостатки пассивного фильтра перекрыты возможностями активного фильтра, а активная мощность настолько мала, что приводит к низкой стоимости активного фильтра. Предложенная модель должным образом решает проблемы активных и пассивных фильтров, а также демонстрирует необходимые соответствующие характеристики и эффективность.

**Библиографический список**

1. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
2. Ермоленко Д.В., Павлов И.В. Исследование волновых процессов в устройствах тягового электроснабжения // Сб. науч. тр. № 819. – М.: МИИТ, 1990. С. 93-100.
3. Ермоленко Д.В. Исследование эффективности многофункциональных компенсирующих устройств в эксплуатационных условиях // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 44 -47.
4. Ермоленко Д.В. Анализ потерь электроэнергии от высших гармоник в системе тягового электроснабжения // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 6. – С. 15 -18.
5. Черемисин В. Т., Кващук В. А., Бренков С. Н. Двухрезонансные фильтрокомпенсирующие устройства электрифицированных железных дорог // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2008. – б/н. – С. 48 -51.
6. Герман Л. А., Серебряков А. С., Якунин Д. В. Новая схема поперечной емкостной компенсации в тяговой сети // Локомотив. – 2012. – № 8. – С. 39 -40.
7. Ермоленко Д. В. Анализ потерь электроэнергии от высших гармоник в системе тягового электроснабжения // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 6. – С. 15 -18.



## ВАКУУМНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА СТАНДАРТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Садретдинов И.И.

Научный руководитель: канд. тех. наук, доцент Закиров Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

### Аннотация

В статье рассматривается стандартная изоляция с использованием минеральной ваты, которая используется для теплоизоляции тепловых сетей, и вакуумная изоляция, как альтернатива стандартному методу. Для начала рассказывается о изоляции из минеральной ваты. Далее повествуется строение вакуумной изоляции, ее конструктивные особенности. Для сравнения двух типов изоляции были выбраны два участка тепловых сетей: участок паропровода и участок теплопровода с некоторыми параметрами. При сравнении использовались одни и те же участки, но с разным типом теплоизолятора. Производится расчет, в котором выявляется изменение теплопотерь. При их уменьшении это должно проявить преимущество вакуумной изоляции над стандартной. После рассчитываются расходы на вакуумную изоляцию, экономия энергии и срок окупаемости данного метода. Приводятся две таблицы в которых показан расчет для теплопотерь и экономический расчет. В конце приводится вывод о перспективности вакуумной изоляции и ее развитии.

**Ключевые слова:** теплопотери, вакуумная изоляция, паропровод, теплопровод, минеральная вата, экономия.

## VACUUM INSULATION AS AN ALTERNATIVE TO STANDARD INSULATION OF HEAT PIPELINES

Ilnaz Sadretdinov

Kazan State Power Engineering University, Kazan

### Abstract

The article discusses standard insulation using mineral wool, which is used for thermal insulation of heat pipelines, and vacuum insulation as an alternative to the standard method. First, we talk about mineral wool insulation. The following describes the structure of vacuum insulation and its design features. To compare two types of insulation, two sections of heating networks were selected: a section of a steam pipeline and a section of a heat pipeline with some parameters. The comparison used the same areas, but with different types of thermal insulation. A calculation is made in which the change in heat loss is revealed. When they are reduced, this should demonstrate the advantage of vacuum insulation over standard insulation. Afterwards, the costs of vacuum insulation, energy savings and the payback period of this method are calculated. Two tables are given that show the calculation for heat loss and the economic calculation. At the end, a conclusion is drawn about the prospects of vacuum insulation and its development.

**Keywords:** heat loss, vacuum insulation, steam pipe, heat pipe, mineral wool, saving

### Цель работы

Выявить преимущества вакуумной изоляции перед стандартной изоляцией из минеральной ваты, используемой для теплоизоляции тепловых сетей и рассчитать экономическую составляющую данного метода изоляции.



## Ход работы

Стандартная теплоизоляция представляет собой рулон из минеральной ваты, на основе базальтового волокна, который обворачивается вокруг трубопровода. Данный метод довольно дешевый, изоляция имеет низкие показатели теплопроводности, однако у него имеются свои минусы: при попадании влаги в теплоизоляционный слой, он разрушается, портится, и его свойства теряются, и для того, чтобы этого не происходило дополнительно у минеральной ваты устанавливается защитный кожух, что имеет свои сложности в монтаже [1]. Это покрытие в нашем случае будет из оцинкованной стали, так как она надежна и имеет низкую теплопроводность [2]. Собственно, в этом и заключаются все особенности такого типа изоляции.

Вакуумная изоляция состоит из двух труб: внутренняя – сам трубопровод, и внешняя – защитный кожух, который обеспечивает сохранность вакуума. Вакуум же образуется между двумя трубами. Для опоры внутренней трубы используется опорное кольцо, сделанное из газобетона. Оно ставится на расстоянии метра от предыдущего кольца на протяжении всего трубопровода. Для создания вакуума удельно на 100 метров приходится один вакуумный насос. Для его подсоединения имеется специальный отвод. Важным критерием всей конструкции является герметичность всей тепловой сети. При нарушении состояния герметичности теплопроводность вакуумной среды повышается, что делает ее неэффективной. Главным плюсом вакуумной изоляции является многократное использование. Нужно просто включить насос. В то время как обычная изоляция требует смены по мере износа [3].

Для сравнения двух типов теплоизоляции были выбраны два участка тепловой сети: паропровод и теплопровод, оба имеющие длину 100 м, и оба сделанные из стали.

Паропровод имеет следующие характеристики: диаметр внутренний – 506 мм, диаметр внешний – 530 мм [4], диаметр оболочки внутренний – 550 мм, диаметр оболочки внешний – 560 мм. Температура теплоносителя 550°C, внешняя температура принята за 55°C.

Теплопровод имеет характеристики: диаметр внутренний – 307 мм, диаметр внешний – 325 мм, диаметр оболочки внутренний – 345 мм, диаметр оболочки внешний – 355 мм. Температура теплоносителя 150°C, внешняя температура 55°C.

Стандартная теплоизоляция из минеральной ваты имеет теплопроводность 0,048 Вт/(м\*°C). Вакуумная теплоизоляция считается равной нулю, однако опорное кольцо из газобетона имеет свою теплопроводность в 0,12 Вт/(м\*°C). Толщина изоляции в обоих случаях будет составлять 10 мм. Так же длина опорного кольца составляет 100 мм.

Для расчета теплотерь воспользуемся формулой удельного теплового потока, рассчитав теплотери на 1 м трубопровода в обоих случаях [5]:

– для стандартной изоляции

$$q = \frac{2\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{внеш}})}{\frac{1}{\lambda_{\text{сталь}}} \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\lambda_{\text{мин.ваты}}} \ln \frac{d_2}{d_3} + \frac{1}{\lambda_{\text{сталь}}} \ln \frac{d_3}{d_4}}$$

– для вакуумной изоляции

$$q = \frac{0,1 * 2\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{внеш}})}{\frac{1}{\lambda_{\text{сталь}}} \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\lambda_{\text{газобетона}}} \ln \frac{d_2}{d_3} + \frac{1}{\lambda_{\text{сталь}}} \ln \frac{d_3}{d_4}}$$

Результаты вычислений представлены в табл. 1





Таблица 1

**Параметры трубопроводов и их удельный тепловой поток**

Наименование	Паропроводы	Вакуумная изоляция	Трубопроводы тепловой сети	Вакуумная изоляция
Температура внутренняя, °С	550	550	150	150
Температура на поверхности теплоизоляционной конструкции, °С	55	55	55	55
Диаметр трубопровода внутренний, м	0,506	0,506	0,307	0,307
Диаметр трубопровода внешний, м	0,530	0,530	0,325	0,325
Толщина стенки трубы	0,012	0,012	0,009	0,009
Диаметр теплоизолятора внутренний, м	0,530	0,530	0,325	0,325
Диаметр теплоизолятора внешний, м	0,550	0,550	0,345	0,345
Диаметр оболочки внешний, м	0,560	0,560	0,355	0,355
Диаметр оболочки внутренний, м	0,55	0,55	0,345	0,345
Теплопроводность трубопровода Вт/(м·°С)	47	47	47	47
Теплопроводность минваты, Вт/(м·°С)	0,048		0,048	
Теплопроводность газобетон, Вт/(м·°С)		0,12		0,12
Теплопроводность оболочки Вт/(м·°С)	200	200	200	200
Линейная плотность теплового потока Вт/м	4022,7	1003,6	479,0	119,6

Как можно заметить, линейная плотность теплового потока в обоих случаях как на паропроводе, так и на теплопроводе снизилась на 75 %. Далее рассмотрим экономическую составляющую замены традиционной изоляции вакуумной изоляцией.

Для начала рассмотрим экономию на теплопотерях, которую мы получаем за год. Экономия основывается на том, какой сейчас действует тариф на тепловую энергию, и сколько составляет разница в тепловых потерях между вакуумной и стандартной теплоизоляциями. Тариф был взят за 2023 год для г. Казани.

Затраты же основываются на стоимости вакуумного насоса, электроэнергии, затраченной на создание вакуума и соответственно ее тарифа, стоимость газобетонного кольца, стоимость внешней трубы и небольшая прибавка на зарплату для организации производства. По итогу были получены данные экономии, затрат и срока окупаемости вакуумной изоляции. В табл. 2 представлены все данные.



**Экономический расчет замены традиционной изоляции вакуумной изоляцией**

Наименование	Значение
Линейная плотность теплового потока Гкал/(ч·м)	0,0011672
Стоимость тепловой энергии, руб	2,08
Тариф, руб/Гкал	1780,5
Длина трубы, м	100
Часов в году	7860
Экономия, руб	1 633 402,1
Затраты, всего, руб	646 334
Насосы, руб	23 861
Труба, руб	600 780
Затраты электроэнергии 100м трубы, руб	7 293
Тариф электроэнергии, руб/(кВт·ч)	4,68
Газобетонные кольца, руб	14 400
Срок окупаемости, год	0,39

**Вывод**

Вакуумная изоляция является перспективной альтернативой обычной теплоизоляции тепловых сетей, таких как паропроводы и теплопроводы. По расчетам было выявлено, что теплопотери снизились на 75 %, а окупаемость данного метода составляет приблизительно 5 месяцев. Стоит более подробно рассматривать данный метод, произвести практические опыты, дабы убедиться в перспективах вакуумной изоляции.

**Библиографический список**

1. Финагин В. Как выбрать оптимальную теплоизоляцию труб для проекта и не допустить ошибок при монтаже// С.О.К. – 2023. – №1. – С. 78-81.
2. Технология изоляции трубопроводов сталь оцинкованной стали [Сайт]: Сварка-Профи. [22.05.2021]. URL: <https://fgpip.ru/svarka/tehnologiya-izolyatsii-truboprovodov-stal-otsinkovannoj-stali.html> (дата обр. 15.11.2023 г.).
3. Экранно-вакуумная изоляция - где применяется и какое оборудование требуется [Сайт]: Вакуум Трейд [05.04.2023]. URL: <https://vacuum-trade.ru/blog/ekranno-vakuumnaya-izolyaciya-gde-primenyaetsya-i-kakoe-oborudovanie-trebuetsya> (дата обр. 15.11.2023 г.).
4. ГОСТ 10704-91 Трубы стальные электросварные.
5. Синицын В.А., Алиферов А.И. Теория электронагрева и теплопередачи: электронный учебно-методический комплекс [Электронный ресурс]. Новосибирск: НГТУ, 2015. URL: <https://elibrary.nstu.ru/source?id=45003> (режим доступа: по регистр.)



## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ SMARTGRID ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ STATCOM

Селиванова В.А.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Амузаде А.С.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

### Аннотация

Данная статья посвящена анализу применения устройств STATCOM для регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности. Рассмотрены основные причины падения напряжения в распределительных сетях, перечислены традиционные методы регулирования напряжения, обозначена актуальность применения интеллектуальных систем в электроэнергетике и их элементов для повышения надежности и качества электрической энергии, проанализирован выбор устройств STATCOM как средство компенсации реактивной мощности для регулирования напряжения, преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** SmartGrid, регулирование напряжения, компенсация реактивной мощности, STATCOM.

## APPLICATION OF SMARTGRID ELEMENTS FOR VOLTAGE REGULATION BY REACTIVE POWER COMPENSATION USING STATCOM

Viktoriya Selivanova

Siberian Federation University, Krasnoyarsk

### Abstract

This article is devoted to the analysis of the use of STATCOM devices for voltage regulation by reactive power compensation. The main reasons for the voltage drop in distribution networks are considered, traditional methods of voltage regulation are listed, the relevance of the use of intelligent systems in the electric power industry and their elements to improve the reliability and quality of electrical energy is indicated, the choice of STATCOM devices as a means of reactive power compensation for voltage regulation, advantages and disadvantages are analyzed.

**Keywords:** SmartGrid, voltage regulation, reactive power compensation, STATCOM.

### Введение

Основными причинами падения напряжения в распределительных сетях являются: большие токи нагрузки, неправильный выбор сечений проводников и мощностей трансформаторов, неправильная топология распределительных сетей [1].

Чтобы поддерживать уровень напряжения в заданных рамках используют регулирование напряжения. Традиционными средствами регулирования являются устройства РПН, ПБВ в трансформаторах, регуляторы возбуждения генераторов на станциях, вольто-добавочные трансформаторы, средства поперечного и косвенного регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности и т.д. Но в крупных энергетических системах эти способы регулирования напряжения оказываются недостаточно эффективными. На Западе давно ведутся разработки интеллектуальных энергосистем - Smart Grid [2].



## Актуальность

Интеллектуальные сети обладают многими преимуществами, такими как повышение надежности и качества электроэнергии (отклонение напряжения от номинального, несинусоидальность и несимметрия напряжения, колебания напряжения и т.д. согласно ГОСТ 32144-2013), повышение безопасности и информационной безопасности защита окружающей среды и энергосбережение.

В активно-адаптивных сетях для регулирования напряжения и оптимизации потери мощности используются управляемые устройства компенсации реактивной мощности, которые и определяют адаптивные свойства системы [3].

## Применение элементов SmartGrid для регулирования напряжения компенсацией реактивной мощности с помощью STATCOM

В рамках активно-адаптивных сетей для регулирования напряжения и оптимизации потерь мощности применяются управляемые устройства компенсации реактивной мощности. Эти устройства играют ключевую в интеллектуальных энергосистемах роль в поддержании баланса реактивной мощности на основных шинах и предотвращая нестабильность напряжения.

STATCOM - Статический Компенсатор Реактивной Мощности - это блочно-модульная система с динамической компенсацией реактивной мощности, в качестве основного элемента которого используется полностью управляемый инвертор, построенный на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором. Стабильности напряжения обычно поддерживается за счет обеспечения необходимой компенсации реактивной мощности на основной системе шин [4].

На рис. 1 показано, как система STATCOM определяет параметры сетевого тока и задаёт такой ток в фазах, который компенсирует реактивную мощность и даже несимметричную составляющую, что показано на осциллограмме после подключения устройства.

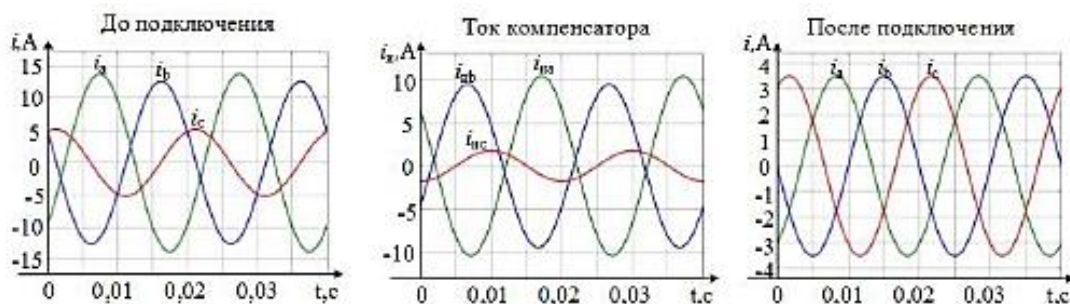


Рис. 1. Результат применения компенсатора STATCOM [5]

Экономический эффект применения компенсатора проявляется и у потребителя электрической энергии, и на электростанциях, и в электросетевом хозяйстве. В конечном итоге данный эффект заключается в экономии затрат на реконструкцию, планово-предупредительные и восстановительные ремонты всех видов оборудования; сокращении ущербов от безвозвратных потерь средств производства:

$$З = E_n \cdot K \downarrow + И \downarrow + У \downarrow \quad (1)$$

где  $Z$  – затраты, тыс. руб.;  $E_n$  – коэффициент, привязанный к дисконтированному доходу;  $K$  – сумма капитальных затрат, тыс. руб.;  $И$  – издержки на амортизацию/реконструкцию, тыс. руб.;  $У$  – ущерб от недоотпуска электрической энергии, тыс. руб. [6].



В определённых случаях устройства SmartGrid являются альтернативой сооружению дополнительных линий электропередач при выполнении заданных требований по надёжности.

### Обсуждение

Согласно исследованиям, в области применения устройств FACTS (flexible alternating current transmission system – гибкая система передачи переменного тока) в ЕНЭС России срок окупаемости, индекс доходности и внутренняя норма доходности на устройства STATCOM находятся в диапазонах 24,6 – 77,6 млн. [7].

Главным недостатком STATCOM является высокая стоимость и долгий срок окупаемости. Поэтому эффект от данного устройства целесообразно рассматривать в перспективе на несколько лет.

### Выводы

Таким образом, STATCOM представляет собой новое поколение устройств регулирования напряжения, ориентированных на компенсацию реактивной мощности. Несмотря на высокие затраты, статические компенсаторы STATCOM могут быть выгодным вложением, экономя на строительстве новых линий, снижая затраты на аварийный резерв и компенсационные выплаты за недоотпуск энергии.

### Библиографический список

1. Воронин В., Гаджиев М., Шамонов Р. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС [Электронный ресурс] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2012. – № 2(11). URL: <https://eepir.ru/article/napravlenija-razvitija-sistemy-reguli/>.
2. Кубарьков Ю.П., Кулаев И.С., Алехин Р.А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2018. – Т. 26, № 3. – С. 154-164.
3. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью / Р.Н. Бердников, Ю.А. Дементьев, Ю.И., Моржин, Ю.Г. Шакарян // Интеллектуальные системы. – 2012. – № 4 (4). С. 4-11.
4. Gellings C. Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid: Technical report. – Palo Alto: EPRI, 2011. – 162 с.
5. Уваров Г.Г., Зацепин Е.П. Статком как средство решения вопросов энергосбережения // Агротехника и энергосбережение. – 2018. – № 4 (21). – С. 157-163.
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
7. СТО 56947007-29.240.019-2009. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2009. 36 с.

### Сведения об авторах

**Селиванова Виктория Андреевна**, кафедра Электроэнергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета.

### Authors about

**Viktoriya Andreevna Selivanova**, Department of Electric Power Engineering, Polytechnic Institute of Siberian Federal University.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ EXCEL ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Смирнов Д.А.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Созинова Т.Е.

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново

### Аннотация

В инженерных расчётах теплотехнического оборудования, например, паровых котлов, рекуператоров, ядерных реакторов и т.п., необходимо определять коэффициент теплоотдачи и тепловой поток в условиях естественной конвекции. Расчёт ведётся путём вычисления критерия Нуссельта по критериальным уравнениям с последующей его подстановкой в формулу определения коэффициента теплоотдачи. В данной работе, используя математические функции программной среды «Excel», был организован последовательный автоматический расчёт, с помощью которого возможно быстро и корректно вычислить коэффициент теплоотдачи, тепловой поток и количество переданной теплоты по известным. Вычисляется коэффициент теплоотдачи для вертикальных и горизонтальных пластин и цилиндров, шаров и щелевых пространств для следующих текучих сред: воздух, вода, трансформаторное масло, масло МС-20, масло МК, жидкий аммиак и дымовые газы. В программе предусмотрен расчёт коэффициента теплоотдачи от горизонтальной пластины, обращенной теплоотдающей поверхностью вниз, с учётом угла наклона и расчётом коэффициента теплоотдачи объекта реальной формы.

**Ключевые слова:** теплоэнергетика, теплотехника, теплообмен, теплоотдача, свободная конвекция

## USING EXCEL MATHEMATICAL FUNCTIONS TO SOLVING FREE CONVECTION PROBLEMS

Smirnov D.A.

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo

### Abstract

In engineering calculations of heating equipment, for example, steam boilers, recuperators, nuclear reactors, etc., it is necessary to determine the heat transfer coefficient and heat flow under conditions of natural convection. The calculation is carried out by calculating the Nusselt criterion using criterion equations and then substituting it into the formula for determining the heat transfer coefficient. In this work, using the mathematical functions of the Excel software environment, a sequential automatic calculation was organized, with the help of which it is possible to quickly and correctly calculate the heat transfer coefficient, heat flow and the amount of heat transferred according to the known methods. The heat transfer coefficient is calculated for vertical and horizontal plates and cylinders, balls and slot spaces for the following fluids: air, water, transformer oil, MS-20 oil, MK oil, liquid ammonia and flue gases. The program provides for calculating the heat transfer coefficient from a horizontal plate with the heat-transferring surface facing downwards, taking into account the angle of inclination and calculating the heat transfer coefficient of an object of real shape.

**Keywords:** heat power engineering, heat engineering, heat exchange, heat transfer coefficient, free convection



## Введение

Инженерные расчёты теплотехнических устройств включают в себя определение коэффициента теплоотдачи и теплового потока в условиях свободной конвекции. Ручной расчёт одной задачи занимает небольшое количество времени, но решение большого количества вариантов влечёт за собой огромные затраты временных ресурсов и вероятность допустить ошибку в вычислениях.

Цель работы: создать программу на базе «Excel», позволяющую быстро и корректно рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловые потоки в условиях естественной конвекции.

## Материалы и методы

Методология: в процессе исследования данного вопроса были использованы методы сравнения и анализа.

## Результаты

Для расчёта необходимо выбрать в раскрывающемся списке (рис.1) наименование текучей среды, методику для расчёта коэффициента теплоотдачи, а также тип объекта, около которого происходит перенос теплоты конвекцией (для горизонтальной пластины дополнительно определить сторону обращения теплоотдающей поверхности). Далее пользователю необходимо вручную ввести температуру теплоносителя, температуру и размеры поверхности теплообмена, выбрать определяемую физическую величину (коэффициент теплоотдачи или тепловой поток).

Дано:	
Текучая среда	Воздух
Тип объекта	Горизонтальная труба
Методика расчёта	Формула Михеевой И.М.
Температура текучей среды $T_f$	$T_f = 360 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура стенки $T_w$	$T_w = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Диаметр и длина	$d = 1,5 \text{ м}$
	$l = 4 \text{ м}$
Теплоотдающая поверхность обращена (только для горизонтальной пластины):	
Вверх	
Необходимо найти:	$\alpha$
<input type="button" value="Получить решение"/> <input type="button" value="Новая задача"/>	

Рис. 1. Внешний вид ввода исходных данных

Для удобства пользователя приведены дополнительные указания, помеченные красными флажками, в которых перечислены возможные комбинации методик и текучих сред и т.п.

После ввода исходных данных автоматически будут вычислены определяющая температура  $T_0$ , определяющий размер  $R_0$  и площадь поверхности объекта  $F$ . С помощью встроенных в программу таблиц теплофизических свойств текучих сред будут определены при определяющей температуре: критерий Прандтля  $Pr_f$ , коэффициент кинематической вязкости  $\nu$ , коэффициент объемного расширения  $\beta$ , коэффициент теплопроводности текучей среды  $\lambda_f$  и критерий Прандтля  $Pr_w$ , соответствующий температуре твердой поверхности и используемый для вычисления температурной поправки  $\varepsilon_t$  (для методик Исаченко и Михеевой). При необходимости значения физических параметров будут проинтерполированы. На рис. 2 представлена выведенная таблица полученных теплофизических свойств.



Решение:		
Определяющий размер	$R_0=$	1,5 м
Определяющая температура	$T_0=$	360 °C
Критерий Прандтля при температуре стенки $T_w$	$Pr_w=$	0,703
Площадь объекта	$F=$	18,8496 м
Параметры при определяющей температуре:		
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu=$	$56,986 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Коэффициент объемного расширения	$\beta=$	$15,794 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$
Коэффициент теплопроводности флюида	$\lambda_f=$	$4,97 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{мК})$
Критерий Прандтля текучей среды	$Pr_f=$	0,6764
Температурная поправка $\epsilon_t$ (для ф-л Исаченко В.П и Михеевой И.М)	$\epsilon_t=$	0,9904

Рис. 2. Таблица определяющих параметров и теплофизических свойств

Пользователю будет представлено пошаговое решение задачи (рис. 3). В случае выбора расчёта по методикам Исаченко, Михеева, Михеевой рассчитывается критерий Рэлея, указывается диапазон значений, в котором получена конкретная формула в соответствии с выбранной методикой. На экран выводятся эмпирические коэффициенты  $C$  и  $n$ , подставляемые в зависимость критерия Нуссельта от критерия Рэлея вида

$$Nu = C Ra^n \epsilon_t.$$

Далее определяется коэффициент теплоотдачи и остальные физические величины, необходимые пользователю.

При расчёте щелевого канала будет вычислен коэффициент конвекции  $\epsilon_k$ , эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$ , поверхностная плотность теплового потока  $q$ , а также, по указанию пользователя, тепловой поток  $Q$  и количество переданной теплоты  $Q_t$ .

Методики Цветкова, Кириллова и Леонтьева отличаются от вышеперечисленных тем, что критерий Нуссельта рассчитывается не по зависимости вида  $Nu = C Ra^n \epsilon_t$ , поэтому таблица со значениями коэффициентов  $C$  и  $n$  не выводится.

Если критерий Рэлея не входит в необходимый для расчёта по соответствующей авторской методике диапазон, появится предупреждающее сообщение. Методика Кириллова получена только для воздуха и воды. Если пользователь выбрал в исходных данных другой теплоноситель, то также появится предупреждающее сообщение о невозможности расчёта.

Критерий Рэлея:	
$Ra=$	1,460E+10
Режим течения:	Турбулентный, $Ra > 2 \cdot 10^7$
Коэффициенты $C$ и $n$ в формуле $Nu = C Ra^n \epsilon_t$ (для универсальной формулы Михеева М.А. поправка $\epsilon_t$ не учитывается)	
$C=$	0,135
$n=$	1/3
Критерий Нуссельта:	
$Nu=$	329,9545128
Коэффициент теплоотдачи:	
$\alpha=$	8,490829463 Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)
Поверхностный тепловой поток:	
$q=$	2886,882017 Вт/м <sup>2</sup>
Количество теплоты	
$Q_t=$	62356651,58 Дж

Рис. 3. Пошаговый расчёт коэффициента теплоотдачи, поверхностного теплового потока и количества теплоты

Справа от основной таблицы представлены дополнительные настройки (рис. 4). С их помощью возможно принять температурную поправку, учитывающую изменение





температуры текучей среды в тепловом пограничном слое, равной единице (для газообразных сред); рассчитать тепловой поток для объекта реальной формы, состоящего из вышеперечисленных (например, от стен прямоугольного здания); рассчитать количество теплоты; для методик Леонтьева А.И., Кириллова П.Л., ввести значение угла наклона пластины, обращенной теплоотдающей поверхностью вниз.

Принять за единицу температурную поправку $\epsilon_t$ (для ф-л Исаченко В.П. и Михеевой И.М.) ?	Нет	Время, сек (если количество теплоты $Q_t$ считать не нужно, поставить в ячейку "0")	3600
Площадь считать по стандартным формулам (для объекта реальной формы, состоящего из простейших объектов, необходимо ввести значение самостоятельно в ячейку ниже) ?	Да	Теплоотдающая поверхность горизонтальной пластины наклонна под углом? (расчёт производится только по формулам Леонтьева или Кириллова; необходимо ввести угол наклона в ячейку ниже)	Нет
Площадь объекта:	<input type="text" value=""/>	Угол наклона, град:	<input type="text" value="0"/>

Рис. 4. Дополнительные настройки

Для более удобного использования в программе предусмотрены макросы. Кнопка “Новая задача” (см рис. 1) предназначена для очистки всех полей ввода, выбора первоначальных настроек в ячейках с раскрывающимися списками, а также полного удаления решения и таблицы с определяющими параметрами. Кнопка “Получить решение” выводит данную таблицу и пошаговый расчёт необходимых физических величин. Если необходимости в данных функциях нет, можно их игнорировать, либо самостоятельно удалить кнопки.

На рис. 5 представлен внешний вид расчётного файла в полном формате.

Дано:		Принять за единицу температурную поправку $\epsilon_t$ (для ф-л Исаченко В.П. и Михеевой И.М.) ?		Нет	Время, сек (если количество теплоты $Q_t$ считать не нужно, поставить в ячейку "0")		3600
Текучая среда	Воздух	Площадь считать по стандартным формулам (для объекта реальной формы, состоящего из простейших объектов, необходимо ввести значение самостоятельно в ячейку ниже) ?		Да	Теплоотдающая поверхность горизонтальной пластины наклонна под углом? (расчёт производится только по формулам Леонтьева или Кириллова; необходимо ввести угол наклона в ячейку ниже)		Нет
Тип объекта	Вертикальная пластина	Площадь объекта:		<input type="text" value=""/>	Угол наклона, град:		<input type="text" value="0"/>
Методика расчёта	Универсальная формула Михеева М.А.						
Температура текучей среды $T_f$	$T_f = 350$ °C						
Температура стенки $T_w$	$T_w = 20$ °C						
Высота и ширина	$h = 1.5$ м $b = 4$ м						
Теплоотдающая поверхность обращена (только для горизонтальной пластины):							
Необходимо найти:	$q$						
Получить решение		Новая задача					
Решение:							
Определяющий размер	$R_0 = 1.5$ м						
Определяющая температура	$T_0 = 190$ °C						
Критерий Прандтля при температуре стенки $T_w$	$Pr_w = 0.703$						
Площадь объекта	$F_s = 6$ м						
Параметры при определяющей температуре:							
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu = 33.67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$						
Коэффициент объемного расширения	$\beta = 21.5913 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$						
Коэффициент теплопроводности флюида	$\lambda_f = 3.86 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(МК)}$						
Критерий Прандтля текучей среды	$Pr_f = 0.681$						
Температурная поправка $\epsilon_t$ (для ф-л Исаченко В.П. и Михеевой И.М.)	$\epsilon_t = 0.99208$						
Критерий Раля:							
$Ra = 1.460E+10$							
Режим течения: Турбулентный, $Ra > 2 \cdot 10^7$							
Коэффициенты $C$ и $n$ в формуле $Nu = CRa^n$ (для универсальной формулы Михеева М.А. поправка $\epsilon_t$ не учитывается)							
$C = 0.135$							
$n = 1/3$							
Критерий Нуссельта:							
$Nu = 329.9545128$							
Коэффициент теплоотдачи:							
$\alpha = 8.490829463$ Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)							
Поверхностный тепловой поток:							
$q = 2886.882017$ Вт/м <sup>2</sup>							
Количество теплоты:							
$Q_t = 62356651.58$ Дж							

Рис. 5. Внешний вид расчётного файла

## Обсуждение

Во время расчёта в определенных ситуациях могут возникнуть некоторые сложности. Расчёт определенных задач может быть верным по одним методикам и некорректным по другим. При расчёте теплоотдачи от стенки к воде, либо наоборот, определяющая температура воды должна быть больше или равна пяти градусам Цельсия, иначе коэффициент объемного расширения будет отрицательным, а, соответственно, и



критерий Рэлея, что неверно. Для формул Исаченко определяющая температура равна температуре флюида, что означает, что если температура воды будет равна 5 градусов, а температура стенки ниже 5, расчёт окажется верным. Но если выбрать определение коэффициента теплоотдачи по методике Михеева, критерий Рэлея окажется отрицательным, а режим течения будет определен как “плёночный”, что некорректно.

Похожую ситуацию можно смоделировать и с маслом МС-20. Для масла марки МС-20 определяющая температура должна быть от десяти и выше градусов, так как при температуре ниже этого значения масло затвердевает. Если температура стенки будет 20 градусов, а масла 0, то по методике Михеева расчёт получится верным, а по формулам Исаченко нет. Для возможности расчёта коэффициента теплоотдачи в данных ситуациях определенные части таблиц не были вырезаны из программы. В этих случаях пользователю необходимо самостоятельно проверять ход решения.

### Анализ расчёта коэффициента конвекции по различным методикам

Определение коэффициента конвекции при расчёте теплообмена в ограниченном пространстве при  $Ra > 10^3$  ведётся по формулам, предназначенным для точного расчёта [2], приведённым для диапазонов  $10^3 > Ra > 10^6$  и  $10^6 > Ra > 10^{10}$ . Также, приведена формула для всего диапазона значений  $Ra > 10^3$ , предназначенная для приближенного расчёта, которую можно было бы использовать для расчёта при  $Ra > 10^{10}$ , так как для этого диапазона больше не приведено никаких формул.

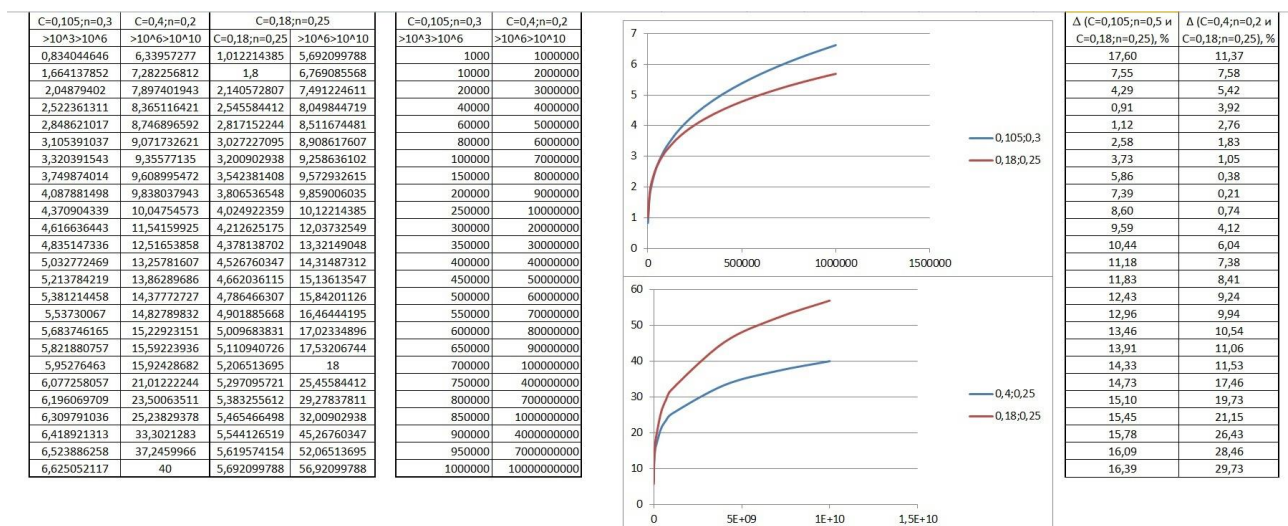


Рис. 6. Сравнение расчёта коэффициента конвекции в ограниченном пространстве при использовании формул точного и приближённого расчётов

На рис. 6. представлено определение погрешности расчёта по обоим вариантам формул для разных значений критерия Рэлея в диапазоне  $10^3 > Ra > 10^{10}$ . Для каждого из данных значений был вычислен коэффициент конвекции по формулам, приведенным Михеевым М.А. для точного расчёта в диапазонах  $10^3 > Ra > 10^6$  и  $10^6 > Ra > 10^{10}$ . Для этих же точек был вычислен коэффициент конвекции по формуле, предназначенной для приближенного расчёта, и выполнено сравнение полученных значений. Анализируя полученные графики, можно сделать вывод о том, что значение коэффициента конвекции при расчёте по приближённым формулам в диапазоне  $10^3 > Ra > 10^6$  ниже, чем при расчёте по точным, в диапазоне же  $10^6 > Ra > 10^{10}$  наблюдается противоположная ситуация. С удалением от значения  $Ra \approx 9 \cdot 10^6$  разница в значениях коэффициентов конвекции становится всё выше и выше, следовательно, погрешность постепенно увеличивается. В точке  $Ra = 10^{10}$  погрешность составляет около 30%. Можно сделать вы-



вод о том, что далее погрешность будет только увеличиваться, следовательно, мы будем удаляться от точного значения, что делает расчёт даже по приближенной формуле при значениях критерия Рэлея  $Ra > 10^{10}$  нецелесообразным. Но на практике довольно сложно встретиться с подобной ситуацией. Поэтому в данной программе формула, приведённая Михеевым для приближенного расчёта, не используется, а пользователь будет оповещён о невозможности вычисления коэффициента конвекции при значении  $Ra > 10^{10}$ .

Пользователи, которым недостаточно предоставленных методик или вариантов текучих сред, могут самостоятельно вносить изменения в программу путём добавления дополнительных условий с помощью функции «ЕСЛИ». Для этого необходимо на боковой панели, на которой расположены названия строк, выделить диапазон от 12 до 23 и выставить значение их высоты на «15» или выше (либо, если это непринципиально, в любом другом месте). Пользователю будут представлены все алгоритмы расчёта, использованные в программе. Правее методики Кириллова необходимо добавить методики расчёта по каким-либо другим формулам и внести правки в «видимую» часть программы (добавить её в перечень остальных методик, изменить условия в ячейках с нахождением определяющих параметров и в самом расчёте). Для добавления таблиц теплофизических свойств необходимо проделать те же действия, но с диапазоном 34-150 и изменить условия в ячейках таблицы (рис. 2) ниже надписи «Параметры при определяющей температуре» и сделать автоматическую интерполяцию любым удобным способом. В данной программе она сделана с помощью функций «ПОИСКПОЗ» и «ИНДЕКС». Но они не всегда верно производят расчёт в случае повторения в таблице одного и того же значения какого-либо параметра, такой случай встречается довольно редко, поэтому может быть исправлен введением дополнительной интерполяции, по результату которой будет искажаться верное интересующее значение. При возникновении ситуации, когда дополнительная интерполяция не помогает, следует обратиться к программному комплексу VBA.

## Выводы

Создана программа автоматического расчёта коэффициента теплоотдачи и теплового потока в электронных таблицах Microsoft Excel для любого теплотехнического оборудования в энергетике, промышленности и ЖКХ, где происходит процесс теплообмена с жидкой или газообразной средой.

## Библиографический список

1. Бухмиров В.В. Теплообмен. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2014. – 360 с.
2. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Теплообмен». – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2017. – 120 с.
3. Кириллов П.Л. Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках / 2-е изд., перераб. – М.: ИздАт, 2008. – 256 с.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи / 2-е изд., стереот. – М.: Энергия, 1977. – 314 с.
5. Теория теплообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высш. школа, 1979. – 495 с.
6. Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И. Задачник по теплообмену / 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. — 196 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов / 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.



## ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Тарасова М.В.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Закиров Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

### Аннотация

Целью данной статьи является проведение анализа научно-технической информации о конструкции топливных элементов, принципе работы, их уникальности и значимости в современном мире для повышения экологичности окружающей среды, изучение практического опыта внедрения топливных элементов, в том числе использования топливных элементов на электростанциях в России и за рубежом, исследование возможности внедрения установки на основе топливных элементов для генерации электрической энергии на промышленном предприятии. Для решения поставленных целей была изучена актуальная научно-техническая литература, применялся метод сравнения видов топливных элементов. В статье описана актуальность цели исследования, приведены виды топливных элементов, дана их краткая характеристика, преимущества и недостатки, условия эксплуатации, изучены сферы применения топливных элементов. Представленный в статье сравнительный анализ позволит предложить экологичный способ генерации электрической энергии для внедрения на промышленных предприятиях в России.

**Ключевые слова:** топливный элемент, электрохимический генератор, электрохимическая реакция, электрическая энергия, гибридная энергоустановка, генерация.

## FUEL CELLS FOR GENERATION OF ELECTRIC POWER IN AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Maria Tarasova

Kazan State Power Engineering University, Kazan

### Abstract

The purpose of this article is to analyze scientific and technical information about the design of fuel cells, the principle of operation, their uniqueness and significance in the modern world to improve the environmental friendliness of the environment, to study practical experience in the implementation of fuel cells, including the use of fuel cells in power plants in Russia and abroad, research into the possibility of introducing a fuel cell-based installation for generating electrical energy at an industrial enterprise. To achieve these goals, current scientific and technical literature was studied, and a method was used to compare types of fuel cells. The article describes the relevance of the research goal, lists the types of fuel cells, gives their brief characteristics, advantages and disadvantages, operating conditions, and studies the scope of application of fuel cells. The comparative analysis presented in the article will make it possible to propose an environmentally friendly method of generating electrical energy for implementation at industrial enterprises in Russia.

**Keywords:** fuel cell, electrochemical generator, electrochemical reaction, electric energy, hybrid power plant, generation.

В настоящее время во всем мире остро стоит проблема экологической составляющей энергетической системы и истощения запасов топлива. Потребление энергии с каждым годом растет и вызывает потребность в расширении производства тепловой и электрической энергии, что в свою очередь ведет к пропорциональному увеличению



выбросов вредных веществ в окружающую среду. Сжигание твердого, жидкого и газообразного топлива негативно сказывается на экологии и большинство стран начали вести политику декарбонизации.

Декарбонизация энергетической системы подразумевает снижение выбросов углекислого газа на единицу вырабатываемой энергии [1]. Предполагается замена ископаемого топлива на низкоуглеродистые ресурсы и последующее расширение мощностей с использованием возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной, гидроэлектрической, геотермальной, энергии океана и приливов, а также биомассы). Альтернативные источники энергии имеют много преимуществ: возобновляемость, снижение затрат на получение энергии, отсутствие выбросов парниковых газов. Но стоит отметить, что данные установки применимы не везде. Предприятие промышленности может располагаться в не солнечной местности, где отсутствует ветер, да и такие установки вырабатывают небольшое количество электроэнергии в сравнении с размерами потребления энергии предприятием. Другие способы использования альтернативной энергии также могут быть затруднительны.

Наряду с основными возобновляемыми источниками энергии в развивающихся странах, в первую очередь, Германии, США, Южной Кореи и Японии популярность набирает водородная энергетика, предполагающая снижение выбросов парниковых газов в атмосферу посредством использования химической энергии топлива. Топливом в данном случае выступает водород и водородосодержащие ресурсы. Водородная энергетика основана на отсутствии сжигания углеводородного топлива и создании электрохимической реакции для выработки электроэнергии в топливных элементах. Именно поэтому данная тема по изучению топливных элементов является актуальной.

Топливные элементы представляют собой передовую технологию в области энергетики, обещающую эффективное и экологически чистое производство электроэнергии. Топливные элементы работают на основе электрохимических процессов: катализатор на аноде разделяет водород на протоны и электроны, а кислород направляется через электролит к аноду, где соединяется с водородом, образуя воду. Реакция сопровождается выделением электроэнергии и тепла. Наиболее эффективно данный метод можно использовать на промышленных предприятиях, использующих в технологическом процессе тепловую энергию. Рассмотрим характеристики видов ТЭ для определения наилучшего варианта при получении электрической энергии на промышленном предприятии.

На сегодняшний день можно отметить 8 видов топливных элементов, различающихся между собой составом электролита, рабочей температурой, типом топлива, КПД, мощностью и сроком службы. В зависимости от данных параметров топливные элементы могут использоваться в определенных сферах производственной деятельности.

Виды топливных элементов:

**1. Твердополимерный.** Получил такое название из-за использования в качестве электролита твердополимерной мембраны. Работает такой топливный элемент при рабочей температуре до 100°C с КПД до 50% и используется, как правило, в транспорте для питания электродвигателя (автомобиль на водороде – Toyota Mirai 2014 с максимальной мощностью топливных элементов 114 кВт) [2].

Достоинства – экологичность транспорта.

Недостатки – работа только на чистом водороде, малое число заправок с водородным топливом, взрывоопасность, высокая стоимость топливного элемента из-за использования платины при небольшом сроке службы.

**2. Щелочной.** называется так из-за использования в качестве электролитов щелочи (KOH, NaOH). Работает топливный элемент при рабочей температуре до 200°C с КПД до 65%. Получил распространение в системе электроснабжения космических кораблей и



производства питьевой воды (аппараты Аполлон и Спейс Шаттл производства НАСА) [3, С.197];

Достоинства – катализатором может быть любое вещество.

Недостатки – работа только на чистом водороде и кислороде, узкая сфера использования.

**3. Фосфорно-кислотный.** Используют электролит на основе фосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ). Работает при рабочей температуре до  $220^{\circ}C$  с КПД до 40%. Благодаря высокой температуре возможна комбинированная выработка электрической и тепловой энергии с КПД до 85%. Используется для стационарных источников энергии (система ONSI PC25 фирмы UTS Fuel Cells) [4, С.6];

Достоинства – возможна работа не только на чистом водороде, комбинированная выработка электрической и тепловой энергии.

Недостатки – высокая стоимость топливного элемента из-за использования платины, удорожание конструкции в связи с необходимостью проведения антикоррозионных мероприятий из-за кислотного характера электролита.

**4. На расплаве карбоната.** Данные элементы используют электролит из смеси расплавленных карбонатных солей ( $LiKCO_3$ ,  $LiNaCO_3$ ). Для расплавки карбонатных солей используется рабочая температура до  $700^{\circ}C$  с КПД до 70%. Высокая рабочая температура позволяет использовать природный газ, его риформинг происходит непосредственно в батареях топливных элементов. Применяют в средних и больших стационарных установках (теплоэнергетические установки с мощностью 2,8 МВт) [5];

Достоинства – возможно применять в качестве катализатора нержавеющую сталь и никель, комбинированная выработка электрической и тепловой энергии.

Недостатки - длительный процесс прогрева.

**5. С прямым окислением метанола.** Топливный элемент с протоннообменной мембраной, где непосредственно используется метанол, который не разлагается на водород. Рабочая температура до  $90^{\circ}C$  с КПД до 50%. Используют в области питания техники (портативное устройство «Toshiba» мощностью 100мВт) [6].

Достоинства – небольшой размер, использование жидкого топлива, а не газообразного.

Недостатки – ядовитость и огнеопасность метанола.

**6. Полимерный электролитный.** Мембрана топливного элемента состоит из полимерных волокон с водными областями. Рабочая температура  $100^{\circ}C$  с КПД до 50%. Используются в транспорте, небольших установках по производству электроэнергии.

Достоинства – работа на природном газе.

Недостатки – дорогой катализатор.

**7. Твердокислотный.** В них электролитом является бисульфат цезия ( $CsHSO_4$ ), который не содержит воды. Рабочая температура составляет до  $300^{\circ}C$ . В топливном элементе расположен очень тонкий слой твердокислотного компаунда между двумя плотно сжатыми электродами для обеспечения хорошего контакта. При нагреве органический компонент испаряется, выходя через поры в электродах, сохраняя способность многочисленных контактов между топливом (или кислородом на другом конце элементы), электролитом и электродами [5].

Достоинства – высокая рабочая температура.

Недостатки – аналогичные фосфорно-кислотным топливным элементам из-за кислотного состава электролита.

**8. Твердооксидный.** В качестве электролита используется мембрана, изготовленная из твёрдого оксида ( $ZrO_2$ ,  $SeO_2$ ,  $Y_2O_3$ ). Работает при температуре  $500-1000^{\circ}C$ , КПД достигает 70%. Из-за высокой температуры в качестве топлива может использоваться не чистый водород, а различные газы. Реакция сопровождается большим коли-



чеством тепла и газа, который можно дополнительно использовать в качестве источника топлива для выработки электрической энергии в газотурбинной или газопоршневой установке (ГТУ и ГПУ).

Достоинства – высокая рабочая температура, не нуждаются в дорогом катализаторе (платине) и могут работать на многих видах топлива.

Недостатки – длительный процесс прогрева.

В таблице приведены сравнительные характеристики рассмотренных топливных элементов.

Таблица

**Характеристики топливных элементов**

Тип	Мощность	Ресурс, ч	Температура, °С	КПД, %	Тип топлива	Материал	
						Анод	Катод
Твердополимерный	~ 100 кВт	До 20 000	30-100	35-50	Чистый водород	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C
Щелочной	~ 100 кВт	До 10 000	50-200	40-65	Чистый водород	Pt/C, Pt-Co/C, Pt-Pd/C	Ni (Pt)
Фосфорно-кислотный	~ 200 кВт	До 50 000	100-220	35-40	Чистый водород	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C, Pt-WO <sub>3</sub> /C
На расплаве карбоната	Более 1 МВт	До 20 000	550-700	50-70	Углеродное топливо	Ni-Al, Ni-Cr	LiFeO <sub>2</sub>
С окислением метанола	~ 1 кВт	5-20	20-90	20-30	Метанол	Pt-Ru	Pt
Полимерный электролитный	~ 250 кВт	До 20 000	30-100	35-50	Чистый водород	Pt/C, Pt-Ru/C, Ni (Pt), Co (Pt)	Pt
Твердокислотный	~ 250 кВт	До 20 000	200-300	До 50	Углеродное топливо	Pt/Ru	Pt
Твердооксидный	Более 1 МВт	До 60 000	450-1000	45-70	Углеродное топливо	Ni, NiO	LaSrMnO <sub>3</sub>

Широкие исследования топливных элементов проводились в СССР, в основном, для космических кораблей и подводного флота.

12 октября 2020 года Распоряжением Правительства Российской Федерации №2634-р был утвержден план мероприятий по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года, направленный на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, а также вхождение страны в число мировых лидеров по его производству и экспорту. Россия обладает важными конкурентными преимуществами по развитию водородной энергетики - наличием значительных водородных ресурсов.

В 2016 году совместно с ИФТТ РАН были созданы батареи мощностью 500 Вт и энергоустановки с твердооксидными топливными элементами мощностью 500-2000 Вт. Камский автозавод анонсирован в России первый пассажирский автобус, работаю-



щий на водородном топливе – КамАЗ-6290. Мощность энергоустановки 45 кВт, а скорость автобуса будет достигать 80 км/ч. Шесть заполненных баллонов обеспечивают запас хода в 250 километров. Но пока до крупномасштабного производства транспорта и энергоустановок дело не дошло.

Самая мощная электростанция на основе водородных топливных элементах (78,96 МВт) расположена в городе Инчхон Южной Кореи [7].

## Выводы (Conclusion)

1. Изучение водородной энергетики связано с потребностью снижения выброса загрязняющих веществ в атмосферу и решение проблемы истощения топливных месторождений. В первую очередь, в этом заинтересованы страны Европейского союза, которые имеют небольшую территорию со значительным количеством промышленных предприятий на ней и дефицит топлива. США и Китай проявляют активность в сфере водородной энергетики, так как являются лидерами по выбросу углекислого газа в атмосферу. В России в связи с огромной территорией и большим количеством топливных месторождений, которые страна поставляет на внешний рынок, только недавно началось проведение политики декарбонизации. Пока водородная энергетика остается непопулярной в России, но достаточно перспективной в ближайшем будущем.

2. Для выработки электроэнергии на предприятии целесообразнее использовать гибридные установки с твердооксидными топливными элементами, а тепло после ГПУ или ГТУ использовать в технологии, для нужд отопления и горячего водоснабжения. Энергоустановки с топливными элементами обладают многими преимуществами, такими как высокий КПД, возможность использования доступного и дешевого топлива - природного газа, экологичность. Несмотря на преимущества, топливные элементы имеют и существенные недостатки, например, высокая стоимость (примерно 5 тысяч рублей за кВт), низкий срок службы для электростанций (до 60 000 ч), отсутствие инфраструктуры для водорода.

3. Таким образом, если перед промышленным предприятием стоит первоочередная задача снизить выбросы вредных веществ в атмосферу, то гибридные установки с топливными элементами является наилучшим выбором генерации электроэнергии.

## Библиографический список

1. Декарбонизация экономики и энергетических систем [Электронный ресурс]: М.: Neftegaz.RU. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/521106-dekarbonizatsiya-ekonomiki-i-energeticheskikh-sistem/>. (дата обращения 15.11.2023 г.)
2. Toyota Ushers in the Future with Launch of 'Mirai' Fuel Cell Sedan [Электронный ресурс]: Toyota Motor Corporation. – [18 Nov. 2014]. – URL: <https://global.toyota/en/detail/4198334>. (дата обращения 15.11.2023 г.)
3. Дальков А.В. Топливные элементы // Актуальные проблемы энергетики. СНТК 69. – Минск: БНТУ, 2014. – С.195–199.
4. Твердооксидные топливные элементы: проблемы, пути решения, перспективы развития и коммерциализации. Аналитический обзор. – М.: ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2015. – 21 с.
5. Топливные элементы (топливные ячейки) [Сайт]: Интех ГмбХ. – URL: <https://energy-units.ru/toplivnye-elementy/>. (дата обращения 15.11.2023 г.)
6. Топливный элемент как альтернатива «альтернативной» энергетики [Электронный ресурс]: М.: Энека. – URL: <https://eneca.ru/novosti/energetika-i-energoeffektivnost/toplivnyy-element-kak-alternativa-alternativnoy-energetiki>. (дата обращения 15.11.2023 г.)





7. В Южной Корее заработала крупнейшая в мире водородная электростанция [Электронный ресурс]: М.: Страна Росатом. – [12.11.2021 г.]. – URL: <https://strana-rosatom.ru/2021/11/12/v-juzhnoj-koree-zarabotala-krupnejshaya-v/>. (дата обращения 15.11.2023 г.)

### Сведения об авторах

**Тарасова Мария Владимировна**, бакалавр, кафедра Атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, e-mail [mv tarasova@bk.ru](mailto:mv.tarasova@bk.ru).

**Закиров Ринат Нургалиевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра Атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, e-mail: [zakirov.kgeu@mail.ru](mailto:zakirov.kgeu@mail.ru).

### Authors about

**Tarasova Maria Vladimirovna**, Bachelor, Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Kazan State Energy University, e-mail [mv tarasova@bk.ru](mailto:mv.tarasova@bk.ru).

**Zakirov Rinat Nurgalievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Nuclear and Thermal Electric Power Plants, Kazan State Energy University, e-mail: [zakirov.kgeu@mail.ru](mailto:zakirov.kgeu@mail.ru).

УДК 537.222.2: 621.311.61

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**Титов А.С., Курганова Е.А., Плотницкий И.В.**

**Научный руководитель: д-р техн. наук, доц. Щегольков А.В.**

*Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

### **Аннотация**

*Возобновляемая энергетика (ВЭ) занимает важное значение в технологиях производства электрической энергии и постоянно интегрируется в новые объекты электросетевого хозяйства. Однако развитие ВЭ подразумевает не только увеличение объемов вводимой мощности и полученной электроэнергии, но и повышение ее качества, а также снижение себестоимость технологического оборудования, а также повышения надежности и ремонтпригодности. Одним из вариантов повышения качества электрической энергии в ВЭ является применение суперконденсаторов (СК), которые позволяют реализовать ранее недоступные режимы накопления при малых ветровых нагрузках, а также снизить нагрузку на основные аккумуляторы (АКБ). Для эффективного применения СК требуется разработка согласованного алгоритма функционирования, как отдельных блоков СК, так и при зарядке вместе или по отдельности АКБ, а также при работе на потребителя имеющего большую мощность.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, повышение качества электроэнергии, ветрогенерация, суперконденсатор



## PROSPECTS FOR THE USE OF LINEAR ELECTRIC GENERATORS IN RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES

Titov A.S. Kurganova E.A, Plotnitsky I.V.  
Tambov State Technological University, Tambov

### Abstract

Renewable energy (RE) plays an important role in electric power generation technologies and is constantly being integrated into new power grid facilities. However, the development of RE implies not only an increase in the volume of commissioned capacity and generated electricity, but also an increase in its quality, as well as a reduction in the cost of process equipment, and an increase in reliability and maintainability. One of the options for improving the quality of electrical energy in RE is the use of supercapacitors (SC), which allow to realize previously inaccessible modes of accumulation at low wind loads, as well as to reduce the load on the main accumulators (ACB). For effective application of SC it is necessary to develop a coordinated algorithm of functioning of both separate SC units and when charging together or separately the batteries, as well as when working for a consumer with a large capacity.

**Keywords:** energy efficiency, improvement of electricity quality, wind generation, super capacitor.

### Введение

Использование новых технологий возобновляемой энергетики позволяет существенно повысить эффективность электроэнергетических систем [1], улучшить их массогабаритные параметры, а так же расширить класс возможных прикладных направлений.

Системы генерации электроэнергии роторного типа показывают свою эффективность в широком спектре режимов работы ветрогенераторов, однако для ряда задач не совсем применимы, это касается слабых ветровых нагрузок, обеспечивающих малый вращательный момент и соответственно слабую эффективность системы электрогенерации [1]. При рассмотрении возможного улучшения устройств ветрогенерации внимание стоит обратить на линейный электрогенератор. Так как их принципиальное различие заключается в том, что он позволяет преобразовывать малые энергетические воздействия, что особенно касается разнонаправленных и слабых ветровых колебаний. В этом случае они показывает свою эффективность и более широкую применимость для определенного класса задач альтернативной энергетики. Следует отметить некоторый уровень универсальности линейных электрогенераторов, их применимость в технологии преобразования тепловой энергии в электрическую, за счет применения устройств основанных на испарении низкокипящих жидкостей или за счет изменения теплового объема при фазовых переходах. Все это так же может быть использовано в создании универсальной системы электрогенерации. В то же время прямое назначение таких систем для преобразования энергии ветра в электрическую энергию. Система электрогенерации с линейным электрогенератором позволяют разрабатывать такие технологические подходы, при которых эти электрогенераторы будут обладать уменьшенными массогабаритными параметрами, что позволит им более эффективно вписываться в целый ряд физических процессов и задач. К технологиям, где могут получить широкое распространение ветрогенераторы с линейными электрогенерирующими установками является сектор бытового использования, обслуживание отдельных технологических линий, где необходимы небольшие мощности электрогенерации, но при этом требуется стабильность и постоянство получаемой электроэнергии. Сле-



дует так же отметить, что на сегодняшний момент, получившие развитие суперконденсаторы [2, 3] которые так же могут быть интегрированы в такие системы, так как при использовании суперконденсатора появляется возможность накопления малых электрических колебаний с последующим формированием нужного напряжения и передачи энергии на литий-ионные накопители электроэнергии с последующим использованием в технологическом процессе. Для получения суперконденсаторов могут быть использованы такие материалы, как, активированные угли [4] или углеродные нанотрубки [5]. Важное значение также имеет технология с помощью которой получают суперконденсаторы и в первую очередь это касается электродных материалов [6, 7], что позволяет получать комплектные суперконденсаторы [8].

## Материалы и методы

На рис. 1 показана электрическая схема включения литий-ионные аккумуляторы (АКБ) и суперконденсаторов, где электрическая мощность поступает в систему от ветрогенератора и далее следует в блоки суперконденсаторов или сразу в АКБ, в зависимости от степени нагрузки или режимов работы системы ветрогенератора.

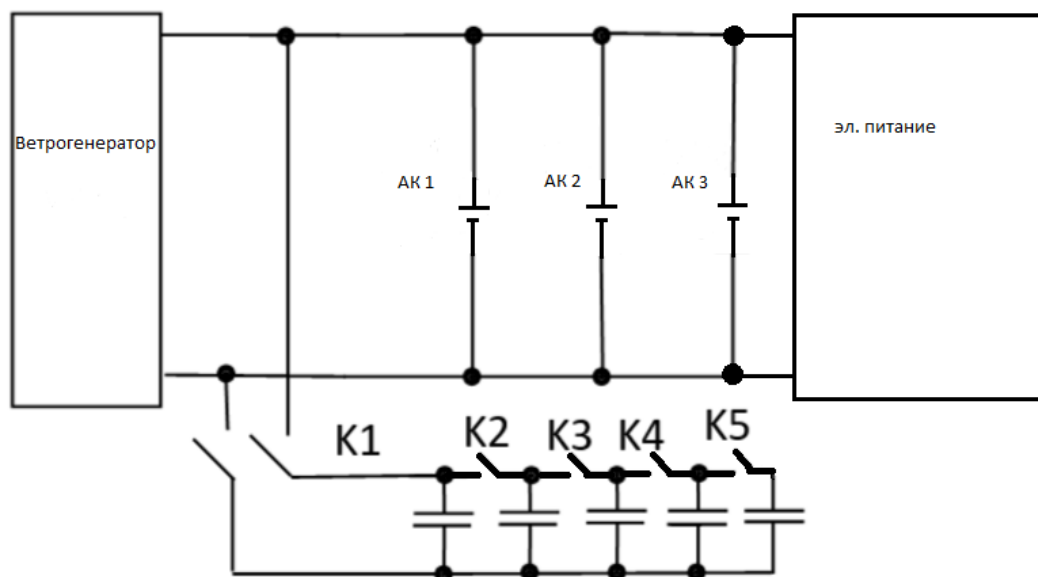


Рис. 1. Схема включения литий-ионные аккумуляторы (АКБ) и суперконденсаторов.

Оптимальным вариантом использования суперконденсаторов является использование силовых ключей в схеме электропитания (K1-K5), что позволит обеспечить формирование различных режимов работы: накопление энергии суперконденсаторами в периоды малой нагрузки, и мгновенную передачу электроэнергии литий-ионным аккумуляторам в часы пиковых нагрузок. Для управления силовыми ключами может быть использован микроконтроллер.

## Выводы (Conclusion)

Разработанная схема для суперконденсаторов и АКБ позволяет реализовать ранее недоступные режимы накопления электроэнергии при малых ветровых нагрузках, а также снизить нагрузку на основные аккумуляторы (АКБ). Для эффективного применения СК может быть использован согласованный алгоритм функционирования (управляемый заряд/разряд), как отдельных блоков СК, так и при зарядке вместе или

по отдельности для АКБ, а также при работе на потребителя имеющего большую мощность (постоянно или в пике).

### Библиографический список

1. System strength shortfall challenges for renewable energy-based power systems: A review / M.O. Qays, I. Ahmad, D. Habibi et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 183. – P. 113447. DOI: [10.1016/j.rser.2023.113447](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113447).
  2. Zhang J., Gu M., Chen X. Supercapacitors for renewable energy applications: A review // Micro and Nano Engineering. – 2023. – Vol. 21. – P. 100229. DOI: [10.1016/j.mne.2023.100229](https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100229).
  3. Supercapacitors: Review of materials and fabrication methods [Электронный ресурс] / D.J. Pandya, P.M. Pandian, I. Kumar et al. // Materials Today: Proceedings. – 2023. – DOI: [10.1016/j.matpr.2023.10.148](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.148). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323050538>.
  4. Effect of radiation on the performance of activated carbon base supercapacitor: Part I. Influence of microwave irradiation exposure on electrodes material / F. Barzegar, A. Bello, D.Y. Momodu // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 158. – P. 4554-4559. DOI: [10.1016/j.egypro.2019.01.754](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.754).
  5. Синтез и исследование катодных материалов на основе углеродных нанотрубок для литий-ионных аккумуляторов / А. В. Щегольков, Ф. Ф. Комаров, М. С. Липкин и др. // Перспективные материалы. – 2021. – № 2. – С. 66-76. DOI: [10.30791/1028-978X-2021-2-66-76](https://doi.org/10.30791/1028-978X-2021-2-66-76).
  6. Щегольков А.В., Липкин М.С., Щегольков А.В. Получение пленок WO<sub>3</sub> на титане и графитовой фольге методом электрохимического (катодного) осаждения для топливных элементов и суперконденсаторов // Российский химический журнал. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 49-55. DOI: [10.6060/rcj.2021654.8](https://doi.org/10.6060/rcj.2021654.8).
- Пат. 2774115 С2 Российская Федерация, МПК H01G 9/048, H01M 4/52. Электродный материал для суперконденсаторов, используемых для систем автономного электроснабжения и портативного пуска автотранспортной техники. / С. Ю. Колосов, А. В. Щегольков; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Энергокристалл». № 2020106756: заявл. 25.03.2020; опубл. 15.06.2022.
- Пат. 2784889 С2 Российская Федерация, МПК H01G 9/004, H01G 11/26. Суперконденсатор для систем автономного электроснабжения и портативного пуска автотранспортной техники. / С. Ю. Колосов, А. В. Щегольков. заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Энергокристалл»: № 2020106757: заявл. 25.03.2020; опубл. 30.11.2022.

УДК 681.121.4

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ С ТЕЛОМ ОБТЕКАНИЯ

**Ходыкина А.А.**

**Научный руководитель: канд. техн. наук., доц. Фролов А.С.**

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск*

### **Аннотация**

*В данной статье рассматривается вопрос ресурсосберегающих технологий, связанный с повышением точности расходоизмерительного оборудования, а в частности с измерительными характеристиками вихревых расходомеров с телами обтекания и каналом обратной связи. Повышение точности измерения такого вида расходомеров можно добиться*



ся за счет конструктивного изменения топологии формы передней грани самого тела обтекания, которое в свою очередь, связано с получением числа Струхала, а также стабильного вихреобразования за ним формирующего дорожку Кармана. Исследования проводятся с использованием методов имитационного моделирования гидродинамических процессов. По результатам исследования были получены зависимости изменения числа Струхала, а также стабильности числа Струхала в диапазоне исследуемых скоростей. Был проведен сравнительный анализ гидродинамического обтекания исследуемых тел, который показал схожесть характеристик грибовидной и треугольно формы тел обтекания, а также их отличия от характеристик трапеции. На основе проведенного анализа были сделаны выводы о перспективности применения исследуемых тел обтекания в соответствии с их индивидуальными особенностями.

**Ключевые слова:** расходомер, тело обтекания (ТО), канал обратной связи (КОС), имитационное моделирование, число Струхала (Sh).

## NUMERICAL STUDY OF MEASUREMENT CHARACTERISTICS OF VORTEX FLOWMETERS WITH A STREAMLINE BODY

Aleksandra Khodykina

Siberian State University of Science and Technology  
named after Academician M.F. Reshetnyova, Krasnoyarsk

### Abstract

*This article discusses the issue of resource-saving technologies related to improving the accuracy of flow measuring equipment, and in particular with the measuring characteristics of vortex flowmeters with flow bodies and a feedback channel. An increase in the measurement accuracy of this type of flowmeters can be achieved by constructively changing the shape topology of the front face of the flow body itself, which in turn is associated with obtaining the Strouhal number, as well as stable vortex formation of the Pocket forming the track behind it. The research is carried out using methods of simulation of hydrodynamic processes.*

*According to the results of the study, dependences of the change in the Strouhal number, as well as the stability of the Strouhal number in the range of the studied velocities were obtained. A comparative analysis of the hydrodynamic flow of the studied bodies was carried out, which showed the similarity of the characteristics of the mushroom and triangular shapes of the flow bodies, as well as their differences from the characteristics of the trapezoid. Based on the analysis, conclusions were drawn about the prospects of using the studied flow bodies in accordance with their individual characteristics.*

**Keywords:** flowmeter, streamline body, feedback channel, simulation modelling, Strouhal number (Sh).

### Введение

Ресурсосберегающие технологии используются для эффективной и безопасной эксплуатации оборудования в системах автоматического контроля и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности, а также на узлах коммерческого учета в теплоэнергетике. Объектом ресурсосберегающих технологий могут являться современные расходомеры и расходомеры-счетчики, которые бывают электромагнитными, кориолисовыми, вихревыми, ультразвуковыми и т.д., и все они основаны на различных физических принципах.



Вихревые расходомеры с телом обтекания (ТО) измеряют расход жидкости и газообразных веществ, путём измерения частоты колебания давления. Поток жидкости, огибая ТО, формирует след, состоящий из цепочки регулярных вихрей, называемой дорожкой Кармана. Внутри ТО, в канале обратной связи (КОС), устанавливается приемник-преобразователь вихревых колебаний (ППВК), с чувствительным элементом (гибким электродом), преобразующим эти колебания в электрический сигнал. Форма ТО существенно влияет на стабильность и амплитуду вихревых колебаний.

Возникающие в процессе измерения погрешности ведут к материальным затратам и снижению рентабельности производства, поэтому целью данного исследования является модернизация формы тела обтекания вихревого расходомера с целью улучшения его измерительных характеристик.

### Материалы и методы

Для реализации исследования мы воспользовались имитационным моделированием физических процессов, так как оно позволяет ещё на этапе проектирования спрогнозировать результат, а также уменьшает затраты времени и финансов, по сравнению с экспериментальными испытаниями. Нами был выбран метод численного моделирования гидродинамических процессов CFD (Computational Fluid Dynamics), реализованный в программе COMSOL Multiphysics, которая является мощной интерактивной средой для моделирования и решения научных и технических проблем, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных. Данное программное обеспечение позволяет моделировать такие задачи гидродинамики, как задачи о ламинарном и турбулентном течении различных жидкостей.

Низкая стоимость и минимальная необходимость в обслуживании сделали вихревые расходомеры привлекательными для промышленного использования, что вызвало значительный интерес со стороны научного сообщества.

Изменение формы ТО нужно для более стабильного вихреобразования, которое увеличит силовое воздействие на ППВК, а следовательно, повысит чувствительность измерительного такта вихревого расходомера. Снижение гидравлических потерь в трубопроводе достигается за счёт оптимизации передней части ТО. Наличие КОС стабилизирует вихреобразование.

Для исследования были выбраны три вида ТО с КОС. На рис.1 представлены ТО грибовидной формы (а), треугольной формы (б) и трапецеидальной формы (в).

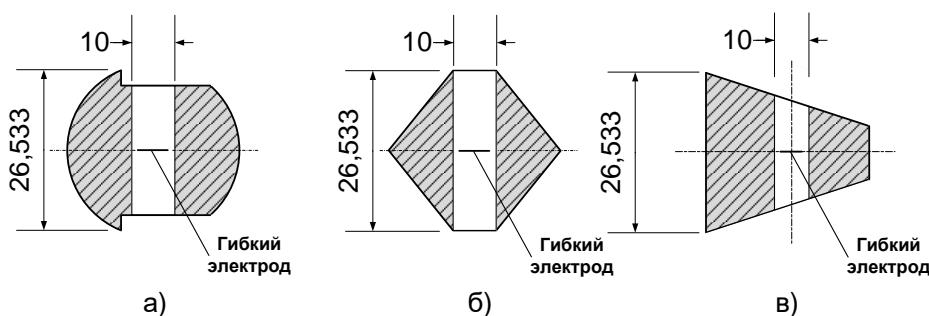


Рис. 1. Модификация форм ТО

Характерные размеры всех тел были взяты одинаковыми ( $d = 26,533$  мм) с шириной канала обратной связи 10 мм, а исследования проводились с измерительным участком трубопровода диаметром  $D = 80$  мм при скоростях ( $V$ ), равных 0,11; 0,27 и 0,44 м/с.

Расход технологической жидкости, измеренный по прибору, определяется по выражению

$$Q \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \right] = 3600 \cdot S \frac{d}{Sh} f, \quad (1)$$

где  $S$  – поперечное сечение трубопровода,  $\text{м}^2$ ;  $d$  – характерный размер тела обтекания, например диаметр для цилиндра,  $\text{м}$  (для исследуемого ТО  $d = 26,533 \text{ мм}$ );  $Sh$  – число Струхала (гидродинамическая постоянная, зависящая от формы тела обтекания);  $f$  – частота вихреобразования, Гц.

Преобразование расхода в полезный сигнал в вихревых расходомерах с ТО происходит в два этапа. Поток жидкости, пытаясь обогнуть тело, установленное в расходомере, меняет направление обтекающих струй, происходит уменьшение давления и увеличение скорости, а после прохождения, уменьшение скорости и увеличение давления. Пограничный слой потока отрывается от тела и под действием перепада давления, меняет направление своего движения, создавая завихрения, то есть зоны более низкого и высокого давления. На втором этапе чувствительный элемент преобразует энергию регулярных вихрей в электрический частотный сигнал, частота которого пропорциональна объёмному расходу в широком диапазоне скоростей.

Для каждого значения скорости  $V$  и варианта исследуемого ТО определялось среднее значения периода  $T_{cp}$  на интервале усреднения, по величине которого, согласно (2), находилось число Струхала.

$$Sh = \frac{d}{V \cdot T_{cp}}, \quad (2)$$

где  $V$  – средняя скорость потока в сечении трубопровода, в котором установлено тело обтекания,  $\text{м/с}$ ;

Данные моделирования представлены в виде графика, показанного на рис. 2.

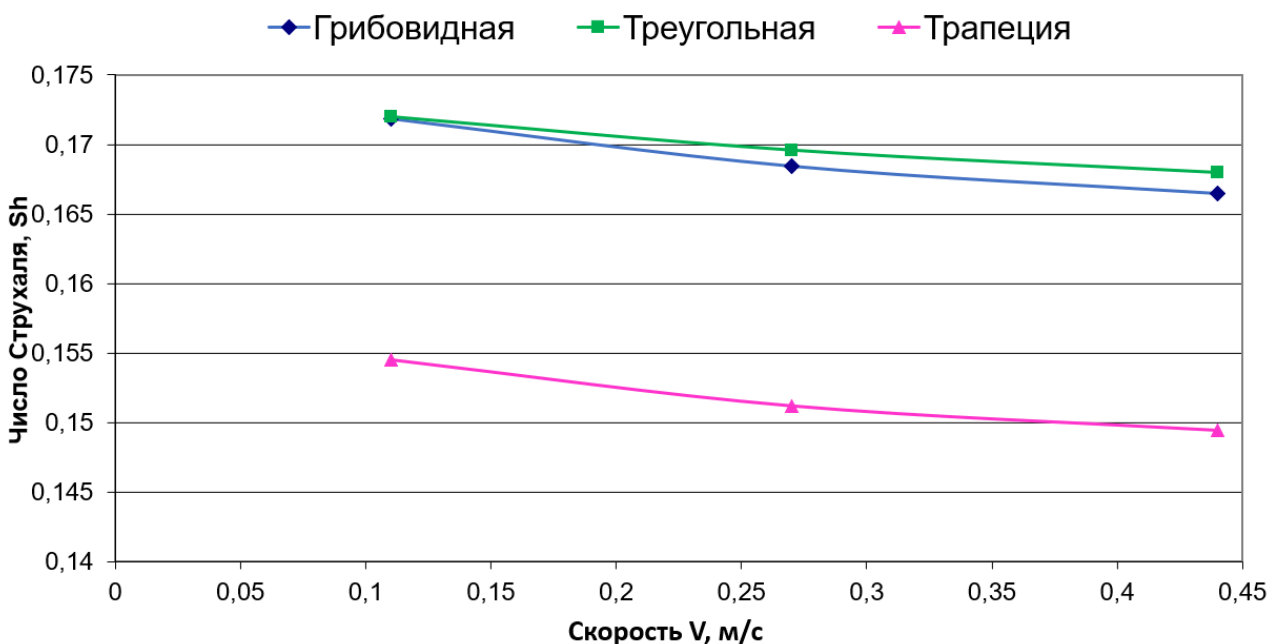


Рис. 2. Зависимость  $Sh$  от скорости  $V$  для исследуемых ТО

Для каждой исследуемой скорости ( $V$ ) и исследуемого ТО находим среднее значение числа  $Sh_{cp}$  в рабочем диапазоне скоростей ( $0,11 \leq V \leq 0,44$ ). Отклонение от среднего значения  $\Delta Sh, \%$  определяется из выражения (3).

$$\Delta Sh, \% = \frac{Sh_{cp} - Sh}{Sh_{cp}}, \quad (3)$$

Данные моделирования представлены в виде графика, показанного на рис. 3.

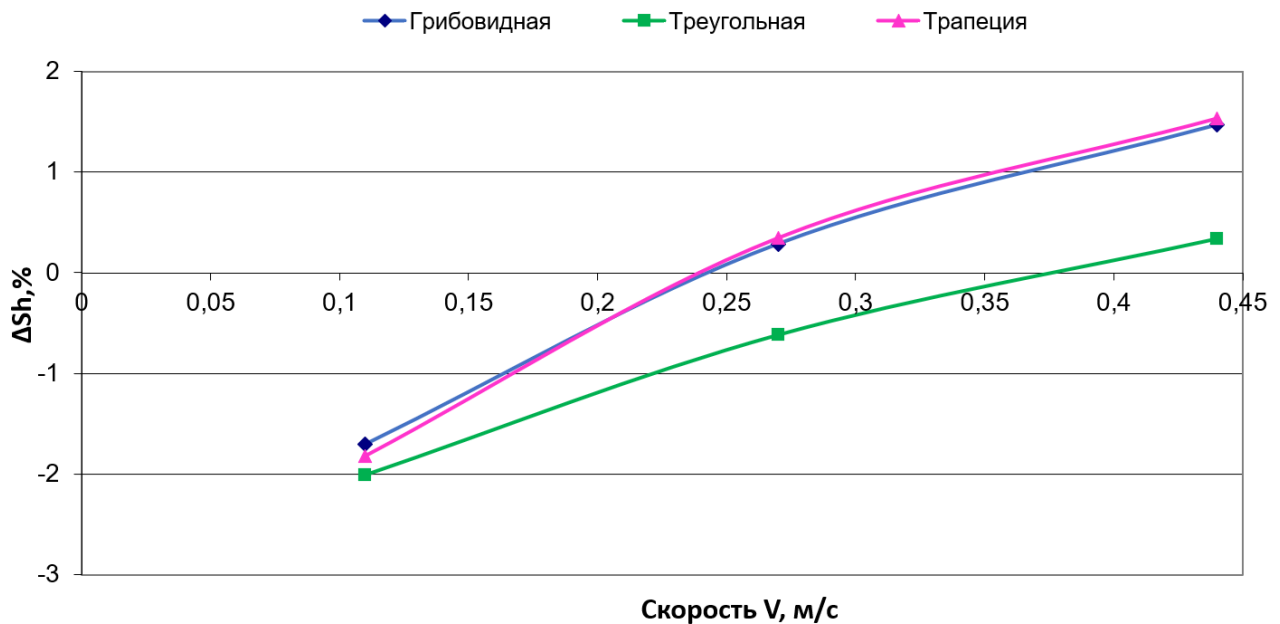


Рис. 3. Зависимость  $\Delta Sh$  от скорости потока

## Результаты (Results)

Из полученных экспериментальных данных характеристик ТО можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость чисел Струхала от скорости потока для всех исследуемых форм ТО носит в целом схожий характер, отличаясь лишь величиной.
2. Схожесть полученных характеристик тел обтекания грибовидной и треугольной формы на наш взгляд связано с фиксированными точками отрыва вихря, а соответственно и постоянство  $d$ . Напротив в ТО трапеция фиксированную точку образования вихря выносит в стороны за пределы передней грани ТО, что вызывает увеличение числа  $d$ .
3. Из всех исследуемых тел обтекания, с точки зрения стабильности числа Струхала, обладает именно ТО треугольной формы, что связано с остроконечным строением обтекателя и наличием фиксированной точки отрыва вихря.

## Выводы (Conclusion)

Таким образом, указанные характеристики ТО говорят о том, что все их формы могут быть использованы на практике, а выявленные нами особенности позволяют более эффективно использовать рассматриваемые ТО, которые широко применяются в различных вихревых расходоизмерительных приборах.



### Библиографический список

1. Лурье М.С. Вихревые расходомеры и счетчики количества жидкости с контактно кондуктометрическим приемником-преобразователем вихревых колебаний. – Красноярск: СибГТУ, 1999. – 196 с.
2. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров / В.Д. Богданов, А.В. Конюхов, А.А. Кривоногов и др. // Датчики и системы. – 2012. – № 8(159). – С. 40-43.
3. Метрологическое обеспечение расходомеров-счетчиков воды и технологических жидкостей. Проблемы коммерческого учета теплоносителей / И.В. Бикинцев, В.П. Каргапольцев, Ю.В. Кукарин, СюЛ. Буланов // Промышленная энергетика. – 2003. – № 8. – С. 14-17.
4. Петров В.Н., Шабалина О.К., Шабалин А.С. Вихревые расходомеры и многофазный поток // Приборы. – 2019. – № 2 (224). – С. 17-22.
5. Григорьева Т.А., Толубаев В.Н. Выбор вихревых расходомеров в современных системах автоматического регулирования // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 1. – С. 22—26.
6. Исследование и оптимизация гидродинамических характеристик погружных вихревых расходомеров / М.С. Лурье, О.М. Лурье, А.С. Фролов, Н.В. Бенько // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 3. – С. 44-48.
7. Альшева К.В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 119-123.

### Информация об авторах

**Фролов Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, Кафедра автоматизации производственных процессов Института информатики и телекоммуникаций, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева».

РФ, 660049, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Мира, 82.

Tel: +7 (391) 227-57-67. E-mail: [sibgtu-frolov@rambler.ru](mailto:sibgtu-frolov@rambler.ru)

**Ходыкина Александра Алексеевна**, студент четвертого курса.

### Authors about

**Alexander Frolov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Production Processes of the Institute of Informatics and Telecommunications, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnyova.

Russia, 660049, Krasnoyarsk Krai, Krasnoyarsk, ul. Mira, 82.

Tel: (8-391) 227-57-67. E-mail: [sibgtu-frolov@rambler.ru](mailto:sibgtu-frolov@rambler.ru)

**Aleksandra Khodykina**, fourth-year student, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnyova.



Научное издание

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ICES-2023В)

VIII Международная  
научно-техническая  
конференция

Секция молодых ученых

Материалы конференции



Подписано в печать 25.12.2023 г.

Объем 2 900 кб

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова»,

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46