



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Энергетический факультет

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ



**Материалы
80-й научно-технической
конференции студентов
и аспирантов**

Апрель 2024 г.

**БНТУ
Минск
2024**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Энергетический факультет

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Материалы
80-й научно-технической конференции
студентов и аспирантов

Апрель 2024 г.

Минск
БНТУ
2024

УДК 620.9(06)
ББК 31я43
А43

Составитель:
И. Н. Прокопеня

В сборник включены материалы 80-й научно-технической конференции студентов и аспирантов БНТУ «Актуальные проблемы энергетики» (апрель 2024 г.).

Статьи печатаются в авторской редакции.

Требования к системе: IBM PC-совместимый ПК стандартной конфигурации, дисковод CD-ROM. Программа работает в среде Windows.

Открытие электронного издания проводится посредством запуска файла Aktualnye_problemy_energetiki_2024.pdf. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 27.11.2024. Объем издания: 9,11 Мб. Заказ 632

Белорусский национальный технический университет

Пр-т Независимости, 65/2, г. Минск, Республика Беларусь

Тел (017) 293-92-16, факс 292-71-73

ISBN 978-985-31-0093-8

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ – ЭЛЕКТРОДИАЛИЗ	7
Д. О. Маер Научный руководитель – В. А. Романко, старший преподаватель	
ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	11
З. В. Ковганов, К. А. Габибова Научные руководители – С. И. Ракевич, старший преподаватель, А. А. Павловская, старший преподаватель	
ФУНКЦИЯ ОБОБЩЕНИЙ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ	15
П. А. Болбас, А. Д. Яковенко Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д. т. н., профессор	
ЦИКЛ АЛЛАМА КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЭС	21
А. И. Сироткин Научный руководитель – Н. В. Пантелей, старший преподаватель	
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	25
А. В. Геут, Г. Ю. Витецкая Научный руководитель – В. В. Кравченко, к. э. н., доцент	
ОСОБЕННОСТИ ДИММИРОВАНИЯ ВО ВНУТРЕННЕМ ОСВЕЩЕНИИ	29
Д. В. Лагунов, Д. А. Козловская Научный руководитель – В. Н. Калечиц, старший преподаватель	
ДАТЧИКИ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ	33
А. П. Буйвол, И. М. Гаращя, Е. С. Халецкий Научный руководитель – С. В. Константинова, к. т. н., доцент	
ЛОГИЧЕСКАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ В СЕТЯХ ДО 1 КВ	41
С. В. Копко, Я. А. Семенчук Научный руководитель – А. Ю. Капустинский, старший преподаватель	
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВЕТИЛЬНИКОВ РКУ21 ГЕЛИОС И ДКУ72	47
Е. А. Прищепов Научный руководитель – Т. М. Ярошевич, старший преподаватель	

РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ В СРЕДЕ DIALUXEVO	52
Е. А. Прищепов Научный руководитель – Т. М. Ярошевич, старший преподаватель	
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ	58
А. П. Каменко Научный руководитель – И. Н. Прокопеня, старший преподаватель	
НУЛЕВОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ – «PRO ET CONTRA»	63
М. С. Войлоков Научный руководитель – Ю. П. Ярмольчик, к. т. н., доцент	
ТОПОЛОГИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБМОТОК ПЕЧАТНЫХ СТАТОРОВ АКСИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	66
М. А. Мойсееня, А. А. Радкевич Научный руководитель – Т. Е. Жуковская, старший преподаватель	
ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКОВ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЕГО НА ХОЛОСТОЙ ХОД И ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ	72
К. И. Савицкий, Д. А. Степанов, М. Р. Хританьков, Д. С. Чурко Научный руководитель – И. В. Новаш, к. т. н., профессор	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ЭКРАНОВ ОДНОФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА	78
М. Э. Высоцкий Научный руководитель – М. А. Короткевич, д. т. н., профессор	
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ	84
Р. С. Борисюк, К. Д. Короткевич, А. В. Никиперович Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель	
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ НУЛЕВОГО И ПЕРВОГО ПОРЯДКА РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕЙЛОРА ФУНКЦИЙ НЕБАЛАНСА	90
К. С. Мордвинцев Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель	
САМОРАСКАЧИВАНИЕ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА	94
А. С. Падрез Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель	

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРЕДПРИЯТИЯ «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД».....	99
Д. В. Телица, С. Ю. Паншин Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к. т. н., доцент	
ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ КЭС 1200 МВТ	103
И. Н. Адамович, К. Д. Сырцов, И. С. Вабищевич Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к. т. н., доцент	
ЯДЕРНЫЕ БАТАРЕИ	108
К. В. Макаренко, П. В. Зайцев, А. М. Колбасич Научный руководитель – С. В. Константинова, к. т. н., доцент	
ОСОБЕННОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДКИ С КОЗЛОВЫМ КРАНОМ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 30 ТОНН.....	113
Д. В. Лагунов, Д. А. Козловская Научный руководитель – В. Н. Калечиц, к. т. н.	
РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ.....	118
П. А. Крупень Научный руководитель – В. Б. Козловская, к. т. н., доцент	
ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ КАК ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ.....	123
В. И. Хамицкая Научный руководитель – В. В. Кравченко, к. э. н., доцент	
ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧНОСТИ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ	127
А. О. Боровикова Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д. т. н., профессор	
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ СТАВЯТ РЕКОРДЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ	132
Н. Д. Рудаков, И. Г. Черенкевич Научный руководитель – С. А. Качан, к. т. н., доцент	
СОВРЕМЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН.....	136
Г. Ю. Витецкая, А. И. Сироткин Научный руководитель – Е. В. Пронкевич, старший преподаватель	
ТУРБОУСТАНОВКА TWIN CA56 GT7	140
В. В. Бакалова, В. Д. Лукьяненко Научный руководитель – Н. В. Пантелей, старший преподаватель	

РАСПЫЛЕНИЕ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ГЕНЕРАТОРОМ ГАРТМАНА	145
А. В. Казейка Научный руководитель – М. А. Ярмольчик, старший преподаватель	
ОСОБЕННОСТИ И УСТРОЙСТВО КОЛПАКОВОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ	148
А. С. Шенец Научный руководитель – И. Л. Иокова, к. т. н., доцент	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.....	152
А. П. Каменко, Е. А. Русакевич Научный руководитель – З. Б. Айдарова, старший преподаватель	
УВЕЛИЧЕНИЕ КПД СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ.....	157
Д. В. Ридель, А. В. Чернушевич Научный руководитель – И. Н. Прокопеня, старший преподаватель	
МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ.....	159
П. Д. Кагочкин Научный руководитель – И. Л. Иокова, к. т. н., доцент	

УДК 628.16

**ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ –
ЭЛЕКТРОДИАЛИЗ
A PROMISING METHOD OF WATER DESALINATION –
ELECTRODIALYSIS**

Д. О. Маер

Научный руководитель – В. А. Романко, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

D. Maer

Supervisor – V. Romanko, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье рассмотрена технология электродиализного обессоливания воды.*

***Abstract:** the article considers the technology of electro dialysis water desalination.*

***Ключевые слова:** электродиализ, соли, мембрана, обессоливание, примеси, ионы.*

***Keywords:** electro dialysis, salts, membrane, desalination, impurities, ions.*

Введение

Наличие примесей солей в воде приводит к образованию отложений кальция и магния на стенках трубопроводов и другого теплоэнергетического оборудования. В качестве современных и более экономичных методов обессоливания применяются мембранное разделение растворов. Примерами таких методов являются: обратный осмос, ультра- и микрофльтрация, а также электромембранные процессы.

Основная часть

В основе электромембранных процессов положен принцип разделения, основанный на разности электрических потенциалов, провоцирующий движение ионов к электродам через специальные мембраны. Главной особенностью данных процессов, в сравнении с баромембранными, является движение через сами мембраны: в случае использования баромембранного метода, мембрана служит для задержки примесей и является практически непроницаемой для них, в то время как в электромембранном методе она должна задерживать молекулы воды.

Электродиализ – один из методов обессоливания воды, суть которого заключается в перемещении анионов и катионов через непроницаемые для воды мембраны [1].

Электродиализная установка в частном случае представляет собой разделенный на секции резервуар с электродами в крайних камерах. Внутри находятся две мембраны, способные пропускать только либо анионы (отрицательно заряженные частицы), либо катионы (положительно заряженные частицы).

Под действием электрического поля, анионы и катионы проходят через мембраны и попадают в секции, расположенные по бокам установки. Последствием такого перехода солей является накопление щелочей и кислот рядом с электродами и обессоленная вода между мембранами. Электролиз можно отнести, своего рода, к ионному обмену, с разницей лишь в том, что в качестве ионита выступает специальная мембрана (рис. 1).



Рисунок 1 – Пример электродиализной установки [2]

Самым важным элементом данной установки являются мембраны, вследствие чего к ним предъявляются следующие требования: высокая избирательность, механическая прочность, непроницаемость для молекул воды. Классифицировать мембраны можно по преобладающему иону, а также по технологии изготовления. Гетерогенные мембраны представляют собой слой ионообменного материала, располагающегося на пленке. Состоящие исключительно только из ионита гомогенные мембраны имеют электрохимические свойства, однако больше подвержены воздействию механических примесей. Структура пропиточных мембран представляет собой пористый материал, пропитанный веществами, обладающими ионообменной способностью. Гетерогенные мембраны представляют собой слой ионообменного материала, располагающегося на пленке.

С недавних пор в эксплуатацию начали вводить электродиализные установки, имеющие несколько камер. Установка разделена на несколько

секций пластинами, выступающими в роли катода и анода. Между этими пластинами зажата сама мембрана. Исходная вода, поступающая в четные камеры, при прохождении освобождается от солей, в то время как в нечетных камерах наблюдается концентрация рассола (рис. 2).

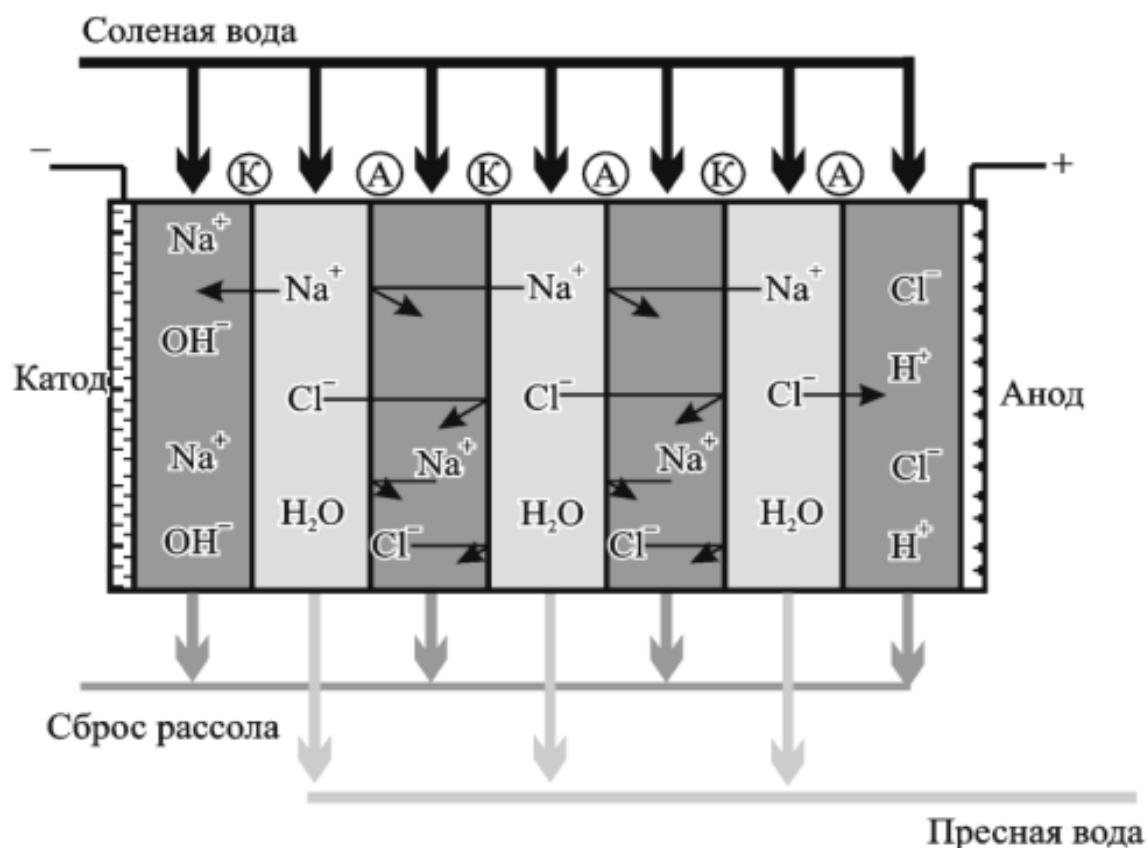


Рисунок 2 – Принципиальная схема электродиализного обессоливания [1]

Говоря о главных преимуществах электродиализа можно выделить такие пункты как: надежность и продолжительный срок службы, объясняемые отсутствием движущихся механизмов; низкая энергоемкость, так как электродиализная установка потребляет 1–3 Вт на обессоливание 1 литра воды; к качеству исходной воды не предъявляют жестких требований, достаточно фильтрации от твердых примесей, способных повредить мембрану; отсутствие реактивов, пагубно влияющих на внешнюю среду [3].

Совокупность данных преимуществ приносит экономическую выгоду путем уменьшения затрат на техническое обслуживание оборудования, отсутствия расходов на реактивы, а также их последующую нейтрализацию.

Стоит упомянуть и один из главных недостатков электродиализа: малая эффективность при недостаточном наличии электролитов, другими словами, чем чище становится вода, тем сильнее ее сопротивление, что в свое время мешает электрическому полю. Чтобы очистка проходила на должном уровне, следует поддерживать определенную плотность тока, которая может изменяться в зависимости от показателя количества солей в воде. При низком содержании солей определенной плотности тока добиваются повышением напряжения.

Дабы сгладить данный недостаток применяют метод электродеионизации, процесс которого схож с электродиализом. Существенным отличием этих процессов является то, что при электродеионизации в емкость помещают ионообменные смолы, обладающие высокой ионной проводимостью. Благодаря этому, при движении воды, происходит обмен между ионами солей и ионами водорода, что снижает электрическое сопротивление воды. Более того, в момент протекания данного процесса, возможно удаление таких примесей, как CO_2 , кремнекислота.

Заключение

Таким образом, электродиализ можно отнести к перспективным методам обессоливания воды, имеющий свои преимущества и недостатки. Данный метод позволяет повысить степень очистки воды, что немало важно для надежной работы парогенераторов на ТЭЦ. Внедрение подобных электро-мембранных установок позволит в перспективе создать технологический цикл с минимальными затратами электроэнергии, меньшим количеством отходов, а также сокращением расходов воды на собственные нужды водоподготовительных установок.

Литература

1. Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС и АЭС: учеб. пособие / В. А. Чиж [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа, 2010. – 351 с.
2. Очистка сточных вод гальванических производств [Электронный ресурс] / Электродиализные установки. – Режим доступа: <https://hydropark.ru/projects/electrodialysis.htm> /. – Дата доступа: 30.03.2023.
3. Электродиализ воды [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://diasel.ru/article/elektrodializ-vody> /. – Дата доступа: 30.03.2023.

УДК 621.184.4

**ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ
ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
PROGRAM FOR CALCULATING THE THERMAL LOAD
OF A HIGH-PRESSURE HEATER**

З. В. Ковганов, К. А. Габимова

Научные руководители – С. И. Ракевич, старший преподаватель,

А. А. Павловская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

Z. Kovganov, K. Gabibova

Supervisors – S. Rakevich, Senior Lecturer, A. Pavlovskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: тепловой расчет нагрузки подогревателя высокого давления с помощью программы, разработанной на языке C++.

Abstract: thermal calculation of high-pressure heater load using a program developed in C++.

Ключевые слова: подогреватель высокого давления (ПВД), расчет, программа, охладитель пара, собственно подогреватель, охладитель конденсата.

Keywords: high-pressure heater (HPH), calculation, program, steam cooler, actual heater, condensate cooler.

Введение

Все электростанции, которые конвертируют тепловую энергию в механическую энергию, используют принцип теплового цикла Ренкина (рис. 1) [1].

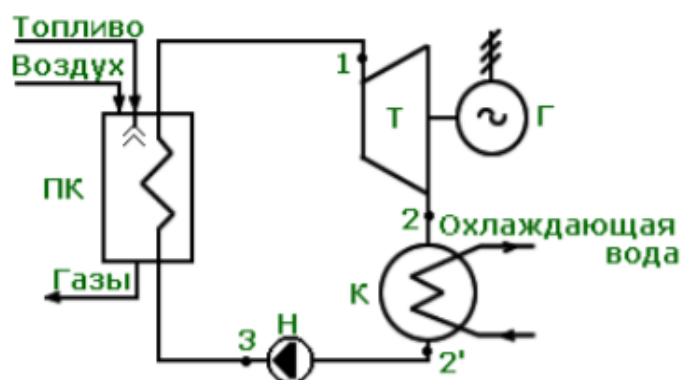


Рисунок 1 – Цикл Ренкина

Однако станция, работающая на таком цикле, имеет невысокий КПД, так как большое количество тепла теряется в конденсаторе (К). Для повышения эффективности цикла Ренкина применяется регенеративный подогрев теплоносителя (воды): часть пара из турбины отбирается на подогрев питательной воды и конденсата, таким образом уменьшая расход пара, идущего в конденсатор, а следовательно, уменьшаются потери тепла.

Подогрев питательной воды или конденсата осуществляется в специальных теплообменниках, где пар, отбираемый из турбины, отдает свое тепло воде. Если необходимо подогреть конденсат, то пар отбирается из последних ступеней турбины и используется для подогрева воды до относительно низких температур (примерно 60 °С) в подогревателе низкого давления (ПНД). Однако, если требуется подогреть питательную воду, то пар отбирается из первых ступеней турбины и направляется в ПВД, где нагревает теплоноситель до достаточно высокой температуры (примерно 200 °С). Для того, чтобы правильно подобрать нужные ПВД, необходимо произвести соответствующий тепловой расчет, по которому определяется площадь теплообмена и осуществляется выбор подогревателя.

Основная часть

ПВД состоит из трех зон: охладителя пара (ОП), собственно подогревателя (СП) и охладителя конденсата (ОК) (рис. 2).

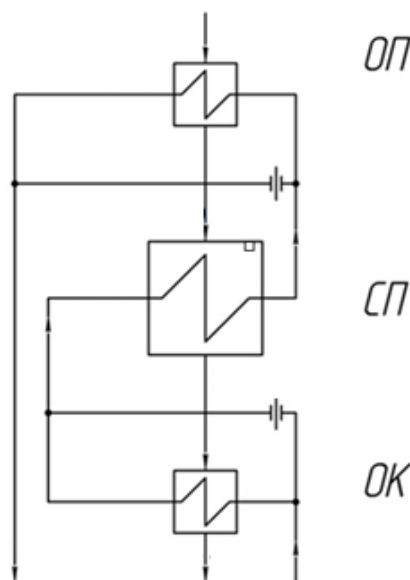


Рисунок 2 – Схема ПВД

Каждая зона рассчитывается отдельно. Тепловая нагрузка для охладителя пара определяется по формуле (1) [2]:

$$Q_{оп} = D_{п} \cdot (h'_{оп} - h''_{оп}) \cdot \eta, \tag{1}$$

где $Q_{оп}$ – тепловая нагрузка охладителя пара, кВт;

$D_{п}$ – расход пара на подогреватель, кг/с;

$h'_{оп}$ – энтальпия пара на входе в охладитель, кДж/кг;

$h''_{оп}$ – энтальпия пара на выходе из охладителя (входе в собственно подогреватель), кДж/кг;

η – КПД теплообменного аппарата (обычно $\eta = 0,98$).

Если известны давление и температура пара, поступающего в охладитель, можно использовать h_s -диаграмму для определения значения $h'_{оп}$. Аналогичным образом определяется $h''_{оп}$ по давлению насыщения и температуре, немного превышающей (на 10...25 °С) температуру насыщения.

Формула (2) используется для расчета тепловой нагрузки подогревателя [2]:

$$Q_{сп} = D_{п} \cdot (h''_{оп} - h_{н}) \cdot \eta + D_{др} (h_{др} - h_{н}) \cdot \eta, \quad (2)$$

где $Q_{сп}$ – тепловая нагрузка собственно подогревателя, кВт;
 $h_{н}$ – энтальпия пара в состоянии насыщения, кДж/кг;
 $D_{др}$ – сумма расходов дренажей из верхних подогревателей, кг/с;
 $h_{др}$ – энтальпия дренажа верхнего подогревателя, кДж/кг.

Значение энтальпии пара $h_{н}$ определяется по давлению насыщения с помощью hs -диаграммы, а энтальпия $h_{др}$ вычисляется по давлению и температуре в верхнем подогревателе.

Для расчета тепловой нагрузки охладителя конденсата используется формула (3) [2]:

$$Q_{ок} = (D_{др} + D_{п}) \cdot (h_{н} - h_{др}^{СП}) \cdot \eta, \quad (3)$$

где $Q_{ок}$ – тепловая нагрузка охладителя конденсата, кВт;
 $h_{др}^{СП}$ – энтальпия дренажа в зоне собственно подогревателя, кДж/кг.

Энтальпия дренажа $h_{др}^{СП}$ определяется по температуре дренажа в зоне собственно подогревателя и давлению насыщения по hs -диаграмме.

Для упрощения расчета тепловой нагрузки на основе формул (1–3) на языке C++ была создана программа, позволяющая получить искомые значения меньше чем за секунду и с высокой точностью (рис. 3).

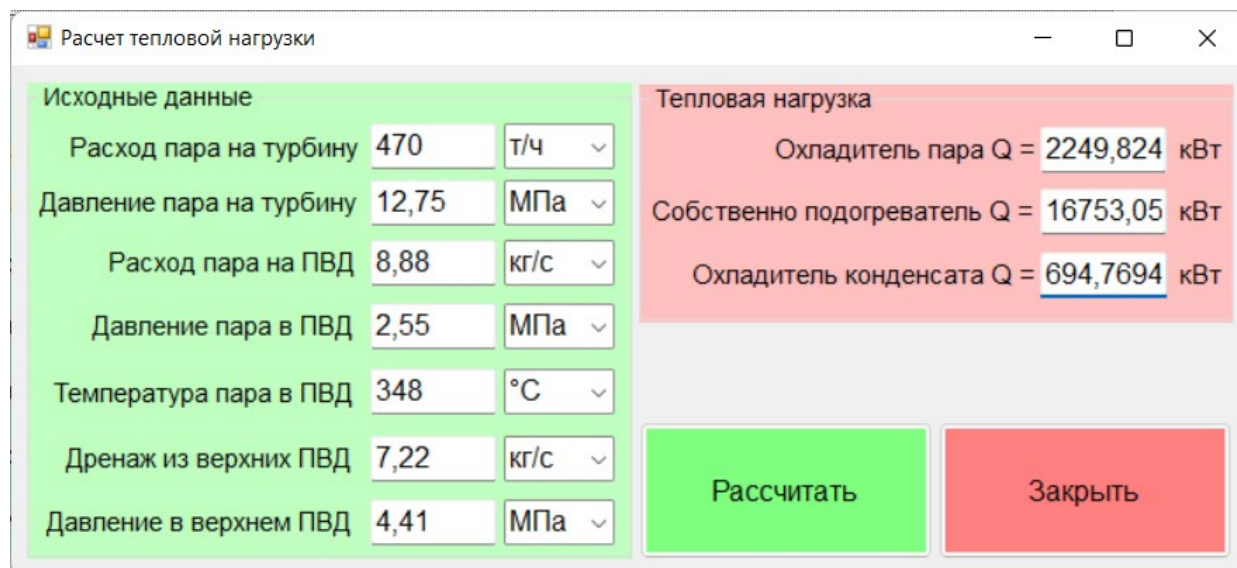


Рисунок 3 – Внешний вид программы

В программе расчет энтальпий производится благодаря базе данных от hs -диаграммы путем нахождения среднего значения между уже известными значениями энтальпии в точках, лежащих в окрестности искомой. Благодаря внедрению такого способа нахождения энтальпии,

расчет с помощью программы экономит большое количество времени в сравнении с ручным расчетом.

Чтобы произвести расчет тепловой нагрузки с помощью программы необходимо ввести в соответствующие поля исходные данные, такие как: расход пара, идущего в турбину и его начальное давление; расход, давление и температуру пара, идущего в ПВД; суммарный расход дренажей из верхних ПВД и давление пара в верхнем ПВД. После нажатия кнопки «Расчитать» в правой части появятся значения тепловой нагрузки для каждой зоны подогревателя.

Заключение

Таким образом, разработанная программа позволяет пользователям не тратить большое количество времени на нахождение различных значений необходимых для конечного теплового расчета, а также производить все вычислительные операции с довольно высокой точностью. Применение в подобных расчетах возможностей языка C++ существенно помогает в сложных расчетах в энергетике, поскольку количество затраченного на создание программы времени зачастую меньше затрат времени на один и тот же расчет с различными данными вручную несколько раз.

Литература

1. Ковганов, З. В. Тепловая электрическая станция небольшой мощности на органическом цикле Ренкина = Small capacity thermal power plant operating on the organic Rankine cycle / З. В. Ковганов, Е. В. Таранко; науч. рук. Е. В. Пронкевич // Актуальные проблемы энергетики – 2022 [Электронный ресурс]: материалы студенческой научно-технической конф. / сост.: И. Н. Прокопеня, Т. А. Петровская; редкол.: Е. Г. Пономаренко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 420–422. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/126030>.

2. Карницкий Н.Б. Вспомогательное оборудование ТЭС: методическое пособие по выполнению курсовой работы для студентов специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции» / Н. Б. Карницкий, Е. В. Пронкевич, Е. Н. Васильченко. – Минск : БНТУ, 2010. – 68 с.

УДК 621.311

**ФУНКЦИЯ ОБОБЩЕНИЙ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ
В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ**
**THE FUNCTION OF DESIRABILITY GENERALIZATIONS
IN THERMAL POWER ENGINEERING**

П. А. Болбас, А. Д. Яковенко

Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д. т. н., профессор
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

P. Bolbas, A. Yakovenko

Supervisor – N. Karnitsky, Doctor of technical sciences, Professor
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в исследовании решается проблема оптимизации надежности и экономичности, в частности, осуществляется выбор рационального соотношения и взаимовлияния между надежностью и экономичностью процесса производства электроэнергии и теплоты на ТЭС.*

***Abstract:** the study solves the problem of optimizing reliability and efficiency, in particular, the choice of a rational relationship and mutual influence between the reliability and efficiency of the process of generating electricity and heat at thermal power plants is carried out.*

***Ключевые слова:** надежность, экономичность, электроэнергия, теплота.*

***Keywords:** reliability, efficiency, electricity, heat.*

Введение

В основе расчетов положена функция полезности [1], позволяющая оптимизировать показатели надежности и экономичности электростанции.

Основная часть

При безотказной работе оборудования ТЭС показатель надежности – коэффициент готовности стремится к 1,0, а показатель экономичности – удельный расход топлива, должен стремиться к минимально возможной величине. Соответственно, это будет желаемый уровень надежности в безразмерных единицах d_n и d_o (табл. 1).

Таблица 1 – Базовые отметки шкалы желательности [2]

Количественные отметки на шкале желательности	Желательность значения отклика
0,80–1,00	Очень хорошо
0,63–0,80	Хорошо
0,37–0,63	Удовлетворительно
0,20–0,37	Плохо
0,00–0,20	Очень плохо

Выбор шкалы числовых отметок объясняется авторами [2] удобством вычислений, поскольку:

$$D = 0,63 \approx 1 - 1/e; d = 0,37 \approx 1/e. \quad (1)$$

Так, чтобы обеспечить системную надежность условной энергосистемы, состоящей из четырех энергоблоков с коэффициентом готовности 0,9 каждый, получим с учетом [2]:

$$K_{\text{гот.эн/с}} = 1 - (1 - K_{\text{гот}}^I)(1 - K_{\text{гот}}^{II})(1 - K_{\text{гот}}^{III})(1 - K_{\text{гот}}^{VI}) = 0,9999, \quad (2)$$

что соответствует максимальному значению системной надежности энергосистемы.

В исследованиях на уровне макропроектирования в общем виде:

$$d_{\text{н}} = \exp[-\exp(-K_{\text{гот}})] ; \quad (3)$$

$$d_{\text{н}} = \exp[-\exp(-b_{\text{э}} \text{ или } b_{\text{э}}^{\text{ТЭЦ}})]. \quad (4)$$

Тогда обобщенная функция желательности (синтез «надежность-экономичность») определится как [3]:

$$D_{\text{н+э}} = \sqrt{d_{\text{н}} \cdot d_{\text{э}}}. \quad (5)$$

При выполнении исследований при микропроектировании использовались формулы (1–3), для получения обобщенной функции желательности при ее стремлении к единице получается наиболее оптимальный вариант выбора оборудования электростанции, что коррелируется с работой [4].

О высокой достоверности результатов автора свидетельствуют исследования уровня готовности энергоблоков К-300-240, результаты которых приведены в [5]. В качестве математического аппарата предлагается использовать структурно-функциональный метод (СФМ) формализации вероятностных процессов на ТЭС, технологической интерпретацией которого являются структурные модели на основе графа Коутса. В результате оценки функциональной надежности энергоблока 300 МВт [5] получены следующие выражения для расчета готовности энергоблока (ЭБ):

при пуске ЭБ:

$$K_{\text{ЭБ}}^{\text{П}} = 0,9042 - (e^{\varphi_{\text{п}}} - 1); \quad (6)$$

при останове ЭБ:

$$K_{\text{ЭБ}}^{\text{ОС}} = 0,9066 - (e^{\varphi_{\text{ос}}} - 1); \quad (7)$$

при регулировании нагрузки:

$$K_{\text{ЭБ}}^{\text{РН}} = 0,9091 - (e^{\varphi_{\text{рн}}} - 1). \quad (8)$$

В выражениях (4–6) $\varphi_{п}$, $\varphi_{ос}$, $\varphi_{рн}$ – численные значения вероятностей стохастических факторов: пуска, останова и регулирования нагрузки энергоблока, а стационарный коэффициент готовности принят $K_{ЭБ}^{СТ} = 0,9091$. Видно (табл. 2) что уровень коэффициента готовности энергоблоков К-300, определенный авторами, лежащий в пределах от 0,9051 до 0,9178, близок к вероятностному $K_{гот} = 0,9091$, рассчитанному в [5].

Использував приведенную методику и данные табл., найдем обобщенную функцию желательности $D_{н+э}$, (синтез «надежность – экономичность») работы энергоблоков К-300-240 (моноблок), как один из вариантов решения оптимизационной задачи, являющейся одной из целей наших исследований, т. е. $D_{н+э} = f(d_n, d_э)$.

Таблица 2 – Расчетная таблица функции желательности [Источник: собственная разработка авторов]

Количественная оценка желательности	Оценка результатов по шкале желательности	Коэффициент готовности $K_{гот}$, определяющий уровень d_n	Удельный расход условного топлива b , гу. т./кВт·ч, определяющий уровень d	Примечания
0,80–1,00	очень хорошо	1,000	318	Устойчивая работа энергоблока на номинальной нагрузке
0,37–0,20	плохо	0,976	357,6	Пуск блока из холодного состояния с набором номинальной нагрузки $\Delta B_{п}^* = 154,6$ ту. т. $\tau_{п}^* = 13$ ча-сов

* – расход топлива на пуск блока $\Delta B_{п}$, и длительность пуска $\tau_{п}$, взяты по ОДУ концерна «Белэнерго».

В общем виде обобщенная функция желательности $D_{н+э} = \sqrt{(d_n \cdot d_э)}$. Для установления частных функций желательности необходимо установить преобразование опытных данных u в безразмерную равномерную шкалу y' , т. е.:

$$y' = b_0 + b_1 u, \tag{9}$$

входящую в формулу для частной функции желательности d :

$$d = [-(-y')]. \tag{10}$$

Составим таблицу для определения коэффициентов b_0 и b_1 (табл. 3).

Таблица 3 – Расчетная таблица коэффициентов для энергоблока К-300-240 [Источник: собственная разработка авторов]

	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$		Удельный расход условного топлива b_3 гу. т./кВт·ч	
	Показатели работы	0,9999	0,9760	318
Числовые отметки на шкале желательности	0,999	0,20	0,999	0,2

Подставив значение в уравнение (11), получим:

$$0,999 = \exp[-\exp(-y')] \text{ и } 0,20 = \exp[-\exp(-y')]. \quad (11)$$

После преобразований имеем:

$$d_n = \exp[-\exp(-260,7 + 276,6K_{\text{гот}})]; \quad (12)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(-66,048 + 0,186b_3)]. \quad (13)$$

В итоге обобщенная функция желательности будет иметь вид:

$$D_{n+3} = \sqrt{d_n \cdot d_3} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} [-\exp(-260,7 + 276,6K_{\text{гот}})] + \right. \\ \left. + [-\exp(-66,048 + 0,186b_3)] \right\} \quad (14)$$

Из табл. 3 видно, что коэффициент готовности блока более весом, нежели удельный расход топлива.

Аналогичный подход применен для энергоблока Т-250-240 и получена обобщенная функция желательности, при Δb_n , 154 гу. т., $\tau_n = 14,1$ часа и исходных данных, предложенных в табл. 4.

Таблица 4 – Расчетная таблица коэффициентов для энергоблока Т-250-240 [Источник: собственная разработка автора]

	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$		Удельный расход условного топлива b_3 гу. т./кВт·ч	
	Показатели работы	0,9111	0,8004	196,9
Числовые отметки на шкале желательности	0,999	0,20	0,999	0,2

В результате обработки данных имеем:

$$d_n = \exp[-\exp(-53,8 + 66,63K_{\text{гот}})]; \quad (15)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(-38,09 + 0,213b_3^{\text{ТЭЦ}})]; \quad (16)$$

$$D_{n+3} = \sqrt{d_n \cdot d_3} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} [-\exp(-53,8 + 66,63K_{\text{гот}})] + \right. \\ \left. + [-\exp(-38,09 + 0,213b_3^{\text{ТЭЦ}})] \right\}. \quad (17)$$

Как и в предыдущем примере, первое место по значимости принадлежит надежности посредством $K_{\text{гот}}$ второе – экономичности с использованием удельного расхода топлива $b_3^{\text{ТЭЦ}}$.

На рис. 1 приведены данные о коэффициенте готовности энергоблоков Т-250/300-240 Минской ТЭЦ-4.

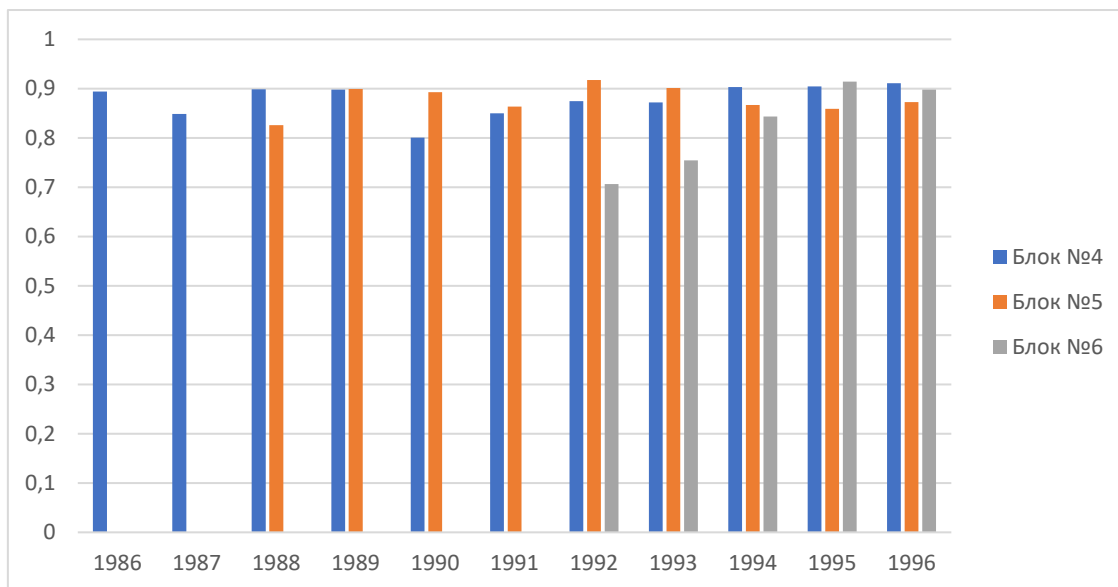


Рисунок 1 – Расчетные коэффициенты готовности $K_{\text{гот}}$ энергоблока Т-250/300-240 Минской ТЭЦ-4 [Источник: собственная разработка авторов]

Видно увеличение $K_{\text{гот}}$ по мере освоения блоков (для блока № 4 – это 5 лет, блока № 5 – 4 года, блока № 6–3 года), что вполне закономерно. Анализ работы энергоблоков К-160-130 Березовской ГРЭС в период 1992–1996 гг. показывает, что уровень $K_{\text{гот}} = 0,90$ установился на блоках № 1–4 и несколько выше на блоках № 5, 6, введенных позже (рис. 2).

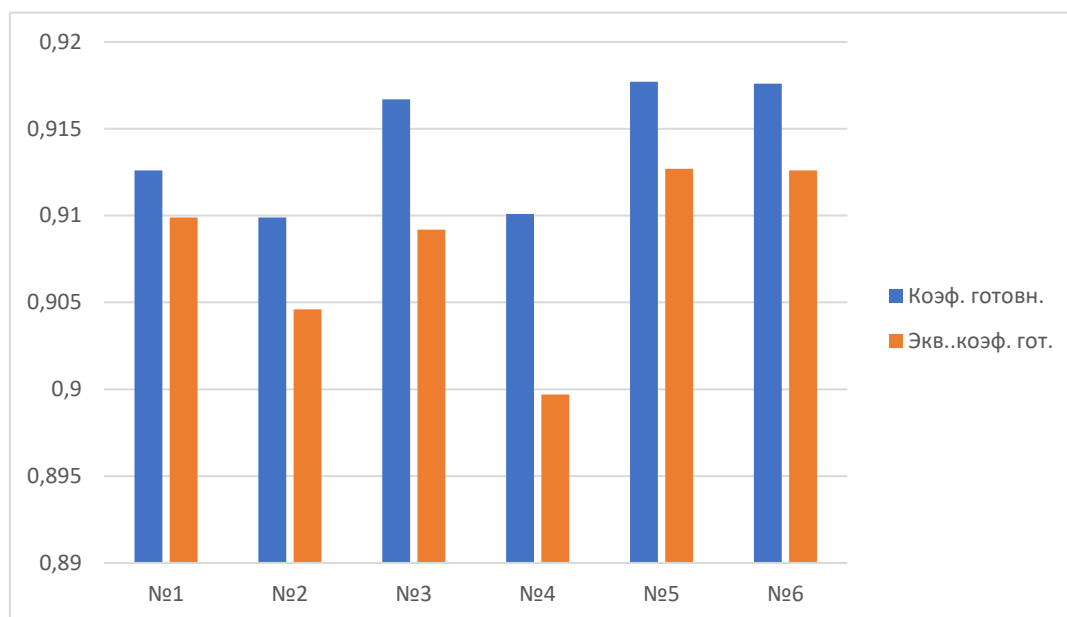


Рисунок 2 – Средние значения коэффициентов готовности $K_{\text{гот}}$ и эквивалентной готовности $K_{\text{гот}}^{\text{э}}$ Лукомльской ГРЭС за период 1992–1996 гг. [Источник: собственная разработка авторов]

Для блоков № 5, 6 характерна и более высокая наработка на отказ по турбинам (12348 и 16877 часов против 4697, 4401, 8770, 9656 часов турбин энергоблоков № 1–4, соответственно). Для котлов такая закономерность отсутствует, что можно объяснить дублированием по пару при сниженных нагрузках (котлы ПК-38 – двухкорпусные).

Заключение

Видно, что наработка на отказ колеблется в достаточно широком диапазоне: от 1903 до 12390 часов. Отказы, связанные с нарушениями в экранных и пароперегревательных поверхностях нагрева, характерны для котлов серии ПК-38 (19 отказов за анализируемый период) и ТГМП-114,314, 324 (17 отказов) на Лукомльской ГРЭС.

Ущерб, нанесенный экономике отрасли в результате отказов и аварий основного теплоэнергетического оборудования ТЭС, оценивается достаточно сложно. Согласно [6] показательным параметром ненадежности работы котла является ущерб, вызываемый отказами:

$$У = ВД \cdot \frac{t \cdot n}{n_n}, \quad (18)$$

где В – средняя себестоимость пара, руб/ГДж;
Д – фактическая паропроизводительность, ГДж/ч;
t – суммарное время простоев, ч;
n – число часов работы за год;
n_n – число часов наблюдений.

Литература

1. The Desirability Function / E. C. Harrington // *Industrially Control.* – 1965. – № 10. – Р. 494–498.
2. Оптимизация эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высш. школа, 1978. – 319 с.
3. Планирование эксперимента в химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчикова. – М.: Химия, 1980. – 280 с.
4. Области использования и пределы видимости критерия при формировании структуры и выборе параметров ЭЭС / Г. Ф. Ковалев, Л. М. Лебедева. – Иркутск, 1999. – 69 с.
5. Трубицин, В. И. Надежность функционирования технологических и химических систем на электростанциях / В. И. Трубицин // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сб. ст.* – СПб.: ПЭИПК, 1993. – 46 с.
6. Елизаров, П. П. Эксплуатация котельных установок высокого давления на электростанциях / П. П. Елизаров. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 400 с.

УДК 621.311

**ЦИКЛ АЛЛАМА КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ
СОВРЕМЕННОЙ ТЭС****ALLAMA'S CYCLE AS AN ALTERNATIVE PRINCIPLE OF
OPERATION OF A MODERN THERMAL POWER PLANT**

А. И. Сироткин

Научный руководитель – Н. В. Пантелей, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

A. Sirotkin

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в статье рассматривается инновационный цикл работы электростанции, созданный Роднеем Алламой, который позволяет свести к минимуму выбросы углекислого газа в атмосферу и использовать его как рабочее тело для работы турбины. При этом станции, работающие по циклу Аллама, не уступают по эффективности традиционным ТЭС.

Abstract: the article discusses the innovative cycle of the power plant, created by John Allama, which allows minimizing carbon dioxide emissions into the atmosphere and using it as a working fluid for turbine operation. At the same time, stations operating on the Allama's cycle are not inferior in efficiency to traditional thermal power plants.

Ключевые слова: цикл Аллама, тепловая электрическая станция, углекислый газ, турбина, альтернативная энергетика.

Keywords: Allama's cycle, thermal power plant, carbon dioxide, turbine, alternative energy.

Введение

На сегодняшний день становится ясно, что традиционные способы производства электроэнергии уже достигли определенного совершенства, и дальнейшие попытки увеличить эффективность ТЭС, работающей по циклу Ренкина, все реже и реже дают ощутимый результат. Кроме того, по-прежнему остается нерешенным вопрос сокращения выброса углекислого газа в атмосферу. Даже самая современная станция с инновационной системой улавливания CO₂ при сгорании в топках ее котлов одной тонны условного топлива будет отдавать в атмосферу 1,6 тонны этого газа [1]. А если основным топливом будет не природный газ, а, например, уголь или мазут, то выброс двуокиси углерода будет еще больше. Это заставляет многих ученых задуматься о поиске новых способов получения энергии. Некоторыми, преимущественно развитыми странами уже успешно освоена энергия ветра, воды, солнца и недр Земли. Однако в экономических целях полагаться на эти источники нецелесообразно из-за сильной зависимости от географического положения. Поэтому приходится прибегать к изменению некоторых принципов в работе ТЭС. В первую очередь это касается самого

термодинамического цикла, по которому работает станция. В частности, рассматриваемый в данной статье цикл имеет ряд существенных отличий по сравнению с традиционными.

Основная часть

Цикл Аллама был разработан ведущим конструктором компании NET-Power, лауреатом Нобелевской премии Роднеем Джоном Алламой. В 2010 году данная технология была запатентована и через 8 лет в штате Техас (США) была построена экспериментальная станция. После успешных испытаний было принято решение о строительстве полноценной коммерческой ТЭС на 300 МВт, ввод в эксплуатацию которой запланирован на 2026 год с примерными капитальными затратами 1000 \$ за кВт [2].

Рассмотрим технологическую схему работы ТЭС по циклу Аллама (рис. 1).

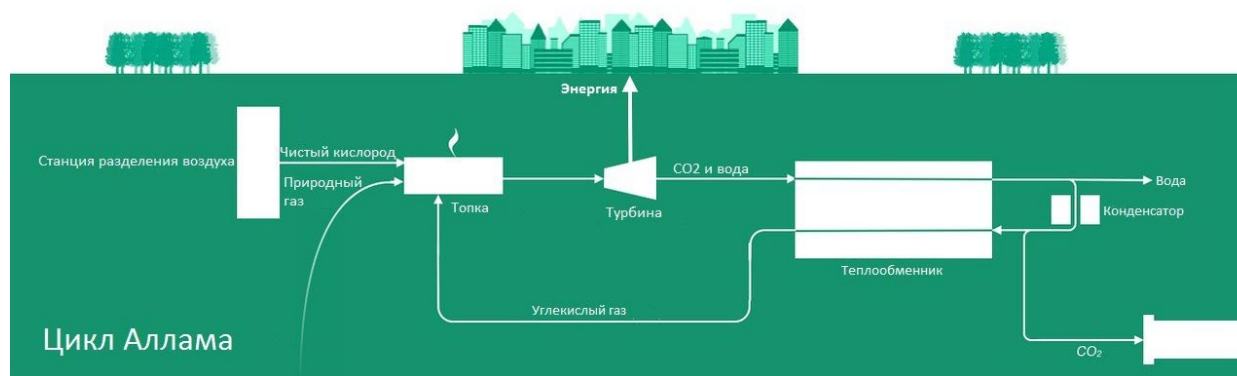
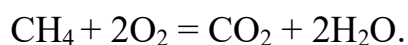


Рисунок 1 – Технологическая схема цикла Аллама [3]

Фактически, цикл Аллама – это система высокого давления – цикл Брайтона с использованием в качестве рабочего тела CO_2 . В установке разделения воздуха происходит выделение из воздуха чистого кислорода. Это необходимо для того, чтобы максимально исключить образование каких-либо иных продуктов горения кроме углекислого газа и воды. Кислород, выступающий в качестве окислителя, и топливо (природный газ) подаются в камеру сгорания (на рис. 1 – топка). Кроме этих компонентов сюда же подается и уже отработавший углекислый газ, который необходим для того, чтобы понизить температуру в камере сгорания до приемлемого уровня. Таким образом, процесс горения будет протекать по следующей реакции:



Давление в процессе горения достигает 30 МПа, а изначальная смесь состоит по массе примерно из 95 % рециркулируемого углекислого газа. Полученные в ходе горения газы с высокими параметрами вращают ротор газовой турбины, вырабатывающей энергию. Давление в турбине понижается в 10–12 раз и в ее проточной части составляет 2–3 МПа. После турбины выходит докритическая смесь углекислого газа, смешанного с полученной при сгорании водой. Эта жидкость поступает в теплообменник, охлаждающий

ее до температуры ниже $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ против потока CO_2 , возвращающегося в цикл. После теплообменника выхлоп турбины еще раз охлаждается до температуры, близкой к температуре окружающей среды. Это позволяет в специальном сепараторе отделить и удалить жидкую воду от двуокиси углерода и рециркулировать ее для полезного использования (на рис. 1 – конденсатор). Оставшийся, практически чистый CO_2 поступает на сжатие в компрессор, после чего большая его часть возвращается обратно в цикл. В случае расположения рядом со станцией нефтяных месторождений, часть углекислого газа может отдаваться в нефтеносные пласты для повышения их отдачи.

Цикл Брайтона является основным термодинамическим циклом, по которому работают все газотурбинные установки. Фактически на его основе и была придумана рассматриваемая технология получения энергии. Идеализированные pV - и TS -диаграммы цикла Брайтона представлены на рис. 2.

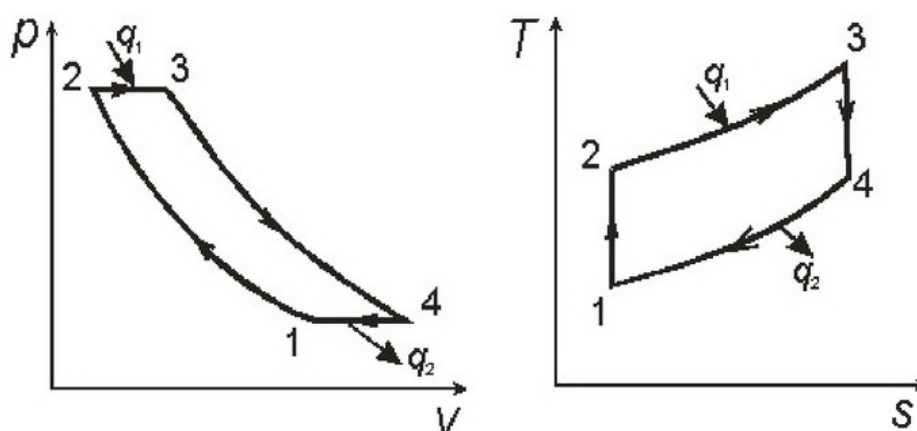


Рисунок 2 – Диаграммы цикла Брайтона [1]

Как можно увидеть из этих диаграмм, данный цикл состоит из двух изобар и двух адиабат. Первоначально топливную смесь необходимо сжать до давления, необходимого для горения. В нашем случае природный газ обычно сжимается с помощью дожимного компрессора, после станции очистки воздуха также стоит компрессор, а рециркулируемый углекислый газ приходит в камеру сгорания с высокими параметрами после сжатия насосом или компрессором (процесс 1–2 на рис. 2). Затем образовавшаяся смесь сгорает, при этом к ней подводится тепло (процесс 2–3) и в результате перед турбиной, в точке 3, параметры выхлопа имеют следующие значения: давление – 30 МПа, температура – $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Далее следует расширение выхлопных газов в турбине (процесс 3–4), в результате которого давление понижается, как уже сказано выше, в 10–12 раз и в конце расширения в точке 4 составляет 2–3 МПа. Затем с помощью теплообменника и сепаратора выхлоп охлаждается до температуры точки 1 при постоянном давлении и цикл повторяется снова. Как заверяют представители компании NET-Power, КПД данной системы составляет 58,9 %, что означает, что она практически не уступает по эффективности современным стандартным парогазовым блокам. Однако вполне возможно, что вследствие затрат на производство чистого кислорода и улавливания CO_2 в сепараторе реальный КПД

может быть меньше. Тем не менее такое высокое значение КПД цикла обусловлено тем, что здесь нет конденсационных потерь, как в цикле Ренкина, и необходимая для сжатия смеси работа намного меньше, чем в обычном цикле Брайтона, в котором рабочее тело сжимается в газовой фазе.

Несмотря на достаточно новые и нестандартные решения, примененные при разработке этого цикла, практически все оборудование, необходимое для постройки станции, имеется в продаже, за исключением турбины. Для того, чтобы газотурбинная установка могла выдержать такие высокие параметры топливной смеси, японской компании Toshiba пришлось провести целый комплекс исследований, связанных с разработкой камеры сгорания, системы охлаждения, термобарьерных покрытий и т. д. В результате японцы смогли создать турбину «sCO₂» мощностью 25 МВт. Ее основной особенностью является конструкция с двойным кожухом, позволяющим выдерживать столь высокое давление. Кроме того, система охлаждения в этом агрегате реализована с использованием рециркулируемого углекислого газа, что также позволило конструкторам и проектировщикам станции не беспокоиться о поиске инженерных решений для охлаждения турбины.

Заключение

Таким образом, в результате инженеры компании NET-Power смогли разработать технологию выработки энергии, полностью использующую весь выделяемый CO₂. Стоит подчеркнуть, что основными особенностями станции, работающей на цикле Аллама являются следующие:

Весь углекислый газ, образующийся при сжигании, улавливается и используется рационально, причем без использования какого-либо дополнительного оборудования;

Извлеченный CO₂ имеет необходимое давление для подачи его в трубопровод в случае необходимости его использования за пределами станции (например, на нефтяных месторождениях);

КПД данного цикла, несмотря на определенные изменения в принципе работы, практически не отличается от КПД парогазовых блоков, что свидетельствует о возможной перспективе развития этих исследований и привлекает к ним инвестиции.

В настоящее время планируется строительство еще нескольких ТЭС, работающих по циклу Аллама: мощностью по 280 МВт в штате Колорадо и в штате Иллинойс (США).

Литература

1. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов / А. Г. Костюк [и др.]. 4-е изд. – М. : Издательство МЭИ. – 2016.
2. В Техасе построят первую коммерческую ТЭС мощностью 300 МВт, работающую по циклу Аллама // Газотурбинные технологии. – 2022. – № 6. – С. 40–42.
3. NET Power's technology is simple [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://netpower.com>. – Дата доступа: 26.03.2023.

УДК 621.311

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**
ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SOLAR POWER DEVELOPMENT

А. В. Геут, Г. Ю. Витецкая

Научный руководитель – В. В. Кравченко, к. э. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

А. Geut, G. Vitetskaya

Supervisor – V. Kravchenko, Candidate of Economical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в нашей работе мы хотели бы осветить перспективы развития солнечной энергетики, а также экологические проблемы, связанные с ней. Не секрет, что на сегодняшний день многие инженеры озадачены поиском альтернативных источников энергии, ведь запасы полезных ископаемых на нашей планете не бесконечны. Возможности развития человечества сокращаются с истощением природных ресурсов. Таким образом, экологически чистая солнечная энергия может стать достойной заменой горючим веществам, тем самым решить проблему, которая мучает нас уже которое десятилетие. Однако в последнее время многие ученые начинают сомневаться в экологичности этого метода. Так сможем ли мы обуздать энергию солнца или это очередное невозможное желание человека?

Abstract: in our work, we would like to highlight the prospects for the development of solar energy, as well as environmental problems associated with it. It is no secret that today many engineers are puzzled by the search for alternative energy sources, because the mineral reserves on our planet are not endless. Human development opportunities are shrinking with the depletion of natural resources. Thus, environmentally friendly solar energy can become a worthy replacement for combustible substances, thereby solving the problem that has been tormenting us for decades. Recently, however, many scientists are beginning to doubt the environmental friendliness of this method. So will we be able to harness the energy of the sun, or is this another impossible desire of man?

Ключевые слова: электрическая станция, экология, экологические проблемы, окружающая среда, климат, солнечная энергия, окружающая среда, энергетика.

Keywords: power plant, ecology, environmental problems, environment, climate, solar energy, environment, energy.

Введение

Если говорить в общем, то солнечная энергетика использует излучение, полученное от солнца, в целях выработки энергии. Ее принято считать экологически чистой, что делает ее более приемлемой для защитников природы. По итогу, если мы построим множество солнечных электростанций, то сможем

значительно снизить нагрузку на действующие электростанции, а также повысить производительность.

Основная часть

Энергетика всегда занимала одно из главенствующих мест в списке потребностей современного человека. Трудно представить городского жителя, что, приходя домой, не включил бы свет, или проголодавшись отказался бы приготовить себе еду. Многократное улучшение качества жизни заставило нас относиться к этим благам цивилизации как к должному. И нам на самом деле трудно сказать: плохо это или хорошо.

Вернемся к энергетике. Несмотря на всю свою полезность, в ней кроется существенная опасность для людей. Прежде всего это – выбросы вредных элементов в окружающую среду, в результате чего истощается озоновый слой планеты. У солнечной энергетики здесь преимущество, ведь она позволяет нам получить желанную энергию без выбросов газа или загрязненных вод. Но даже у такой на первый взгляд удобной промышленности есть свои недостатки. Для создания солнечной батареи используют фотоэлементы, в состав которых иногда входит кадмий. Это существенно усложняет процесс утилизации использованного оборудования [1]. В результате, по прошествии примерно сорока лет, необходимо заменять солнечные батареи, а это, с точки зрения экологии, затруднительно.

Также вред могут нанести и чрезвычайные происшествия на предприятиях, однако от этого уже никто не застрахован.

Современная солнечная энергетика шагнула на новый этап своего развития. Для выработки солнечной энергии все чаще используют тонкопленочные фотоэлементы. Они хороши тем, что содержат менее одного процента кремния, что уже отвечает вопросам экологии, пусть все еще и не решает эту проблему окончательно. Также в их пользу говорят экономические расчеты, ведь, чем тоньше поглощающий слой, тем дешевле обойдется производство новых фотоэлементов. Но даже у тонкопленочных фотоэлементов есть свои минусы. И прежде всего это – их низкая мощность и меньшая эффективность по времени.

Если рассматривать возможность перехода исключительно на ископаемое топливо, например, уголь, то в области экологии такой переход будет иметь отрицательный фактор, следовательно, и материальные издержки, а также и изменения в промышленности.

Выделим ряд важнейших достоинств ГЭС:

- быстрая прибыль;
- низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии;
- высокая маневренность (она же в свою очередь дает возможность накопления энергии);
- аккумуляция энергии.

Тем не менее, даже при полном использовании потенциала всех рек планеты, вероятность того, что сможем обеспечить современные нужды человечества приблизительно равна 25 %. На данный момент экономический гидроэнергетический потенциал Республики Беларусь составляет 1,3 млрд. кВт·ч/год.

В настоящее время в Беларуси эксплуатируется более 40 ГЭС, суммарная мощность которых составляет около 30 МВт, а это приблизительно 5 % от технически допустимого потенциала.

В местах, где строятся ГЭС, и в диапазоне около 100 км наблюдаются такие изменения, как сильное ухудшение состояния воды, что может привести к непригодности для питьевого употребления, а также и для купания, еще стоит отметить негативный факт: уничтожение определенных видов флоры и фауны водоемов, также замечается изменение уровня вод.

ГЭС намного эффективнее располагать на горных реках, ведь в них скорость течения больше, чем в обычных реках, а, насколько мы знаем, чем больше скорость течения – тем больше электроэнергии, в то же время и скорость работы гидроэлектростанции будет продуктивнее.

Рассмотрим атомные электростанции, которые при работе не вырабатывают углекислый газ [2]. АЭС испускает различные вредные химические элементы в окружающую среду, также извергаются в водные бассейны и на поверхность почв. Но, если взять для сравнения ТЭС или другие химические предприятия, то степень загрязнения атмосферы другими вредоносными элементами низкая. На ТЭС сжигается уголь, тем самым выделяя в большей мере различные химические элементы, загрязняет атмосферу остатками сжигания топлива. Следует отметить, что ТЭС производит и тепловое загрязнение: тепло, которое не использовалось в цикле ТЭС, извлекается через градирню или водоем-охладитель. Благодаря этому процессу наблюдается изменение климата. Эти места характеризуются наличием повышенной влажности, вот почему мы можем заметить сильный туман возле водоема-охладителя в зимнее время. Самым главным отрицательным явлением на АЭС является радиация, которая может произойти, в случае аварии на АЭС. А это уже нанесет вред не только природе, но и жизни человека, его здоровью. Переход ТЭС на АЭС был бы намного экологичнее, но не в плане безопасности. Так как нельзя все предугадать.

Можно выделить как положительные стороны использования АЭС, так и отрицательные. Начнем с положительных сторон:

- ядерная энергетика борется с глобальным потеплением: АЭС экономит выбросы парниковых эффектов;
- вскоре может произойти полный переход на замкнутый топливный цикл, который характеризуется полным отсутствием отходов, а такой материал как Уран-235 в ядерном топливе не сгорает полностью и его используют снова после того, как произведут переработку;
- наблюдается рост научных исследований, объем экспорта высокотехнологичной продукции;
- появление новых рабочих мест, которые будут способствовать трудоустройству граждан;
- на АЭС наблюдается низкий показатель травматизма со смертельным исходом;
- огромная энергоемкость.

Перейдем к отрицательным сторонам АЭС:

– трудность заключается в работе реакторов. Все реакторы включают в себя потенциальную угрозу глобальной аварии. Следствием таких аварий является как техническое несовершенство конструкций реакторов, так и человеческий фактор. Чернобыльская катастрофа является незаменимым примером такой аварии. Поэтому нужно соблюдать технику безопасности;

– некоторыми экспертами было выявлено снижение выброса углекислого газа в атмосферу при использовании атомных электростанций вместо тепловых. А увеличение углекислого газа в глобальном масштабе приводит к повышению газоизоляции во всем мире, тем самым вызывает глобальное потепление. А это в свою очередь вызывает изменение среднего уровня океанов, изменение климатических условий и режима осадков;

– заражение радиацией через производство самодельных бомб.

В обработанном ядерном топливе содержится множество химических элементов, с помощью которых можно изготовить примитивную самодельную бомбу. Даже не нужно подключать никаких специалистов, что на руку террористам. Конечно, ядерный взрыв не произойдет, но территория, на которой будет произведен взрыв самодельной бомбы, заразится в достаточной мере радиацией.

Поэтому считается, что возобновляемые источники энергии, такие как источники энергии ветра, солнечная энергия, энергия волн, геотермальная энергия, биоэнергия; биогазовые станции и малые ГЭС, модульные станции на природном газе или топливных элементах, использование отработанного пара, а также отходящего тепла являются реальными способами защиты от изменения климата без того, чтобы появились новые угрозы современному миру.

Заключение

В наши дни человечество буквально стоит на развилке своего энергетического прогресса. У нас есть вариант уменьшить потребление энергии. Это может приостановить истощение природных ресурсов, однако не решит проблему в целом. Также стоит отметить, что с этим путем многие не согласятся. Люди привыкли к современным благам и отказаться даже от части из них будет затруднительно. Есть и второй вариант. Мы можем вложить средства в развитие альтернативных источников энергии, пойти по пути инноваций и в конечном итоге найти наиболее безопасный и эффективный источник энергии. Этот путь займет больше времени и израсходует массу средств, но, для человечества в целом, он предпочтительнее. Гораздо лучше расширять возможности, чем сокращать потребности.

Литература

1. Экологические последствия развития солнечной энергетики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/126/8495>. – Дата доступа: 12.04.2023.

2. Атомные электростанции [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/77/13320>. – Дата доступа: 12.04.2023.

УДК 621.311

**ОСОБЕННОСТИ ДИММИРОВАНИЯ ВО ВНУТРЕННЕМ
ОСВЕЩЕНИИ**
FEATURES OF DIMMING IN INTERIOR LIGHTING

Д. В. Лагунов, Д. А. Козловская

Научный руководитель – В. Н. Калечиц, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь
D. Lagunov, D. Kozlovskaya
Supervisor – V. Kalechyts, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье приведен пример светотехнического расчета коридорного помещения общественного здания с учетом естественного освещения и без учета.*

***Abstract:** the article provides an example of a lighting calculation of a room with and without natural light.*

***Ключевые слова:** освещение, диммирование, светильник, электропотребление.*

***Keywords:** lighting, dimming, luminaire, power consumption.*

Введение

В общественных зданиях, как правило, используются светильники небольшой мощности до 150 Вт.

Диммирование – это регулировка светового потока источников света (от английского слова dimming – затемнение). В качестве устройства для диммирования рассмотрим диммер Modbus RTUWB-MDM3.

Основная часть

Диммирование позволяет сделать комфортный уровень освещенности в помещении и создает дополнительные варианты световых сцен для разных ситуаций.

В данной работе произвели расчет коридора:

- высота 2,8 м;
- длина 15 м;
- ширина 5 м;
- число светильников в ряду 2;
- число рядов светильников 2.

Рассмотрено сравнение расчетных значений освещенности (табл. 1) для двух вариантов установки светодиодных светильников коридора (рис. 1) [1].



Рисунок 1 – Проект коридора

Первый вариант светотехнического расчета: рассмотрен коридор в ночное время, принято время работы 6 часов.

Второй вариант светотехнического расчета: рассмотрен коридор в дневное время с использованием диммера (принято, что небо чистое), время работы 8 часов.

Во втором варианте нет необходимости использовать светильники (рис. 2) на полную мощность, так как естественный свет проходит через окно и будет освещать часть коридора. Поэтому использован диммер Modbus RTU WB-MDM3, который уменьшает на 48 % световой поток светильников [2]. Характеристика светильника и результаты для двух вариантов расчета приведены в табл. 1.

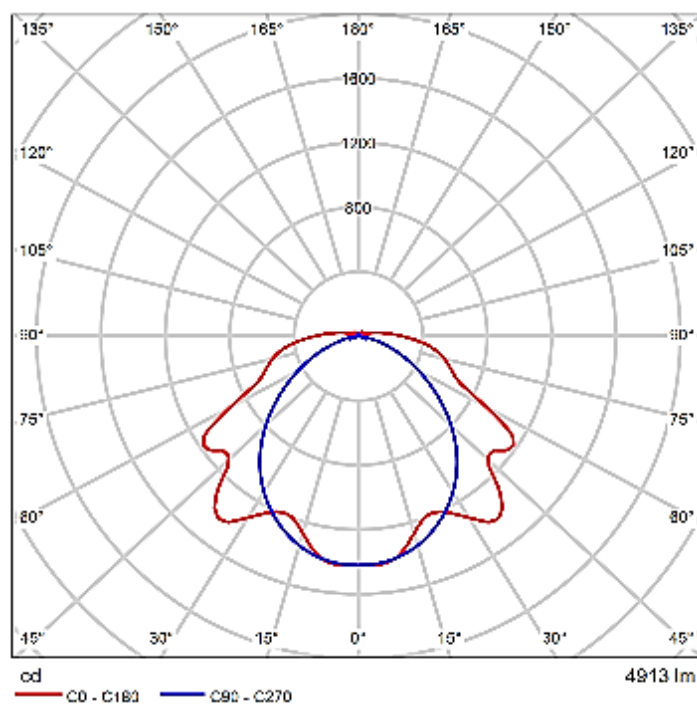


Рисунок 2 – Тип КСС светильника Glamox – MIRZ54-1200 LED 5000

Таблица 1 – Характеристика светильника и результаты для двух вариантов расчета

Название	Светодиодный светильник Glamox–MIRZ54-1200 LED 5000	
Светотехнические данные светильника		
Световой поток, лм	4913	
Потребляемая мощность, Вт	33	
Световая отдача, лм/Вт	148,9	
Результаты светотехнического расчета светильников		
	Вариант 1	Вариант 2
E_{cp} , лк	118	129
E_{min} , лк	4,63	7,16
E_{max} , лк	219	385
$E_{min/cp}$, лк	0,039	0,056
$E_{min/max}$, лк	0,021	0,019
Расход электроэнергии за время работы, кВт·ч	0,792	0,55

В первом варианте рассмотренного светотехнического расчета средняя освещенность по коридору составляет 118 лк, минимальная освещенность равна 4,63 лк, а максимальная достигает 219 лк. Во втором варианте рассмотренного светотехнического расчета средняя освещенность по коридору составляет 129 лк, минимальная освещенность равна 7,16 лк, а максимальная достигает 385 лк. Распределение освещенности в коридоре представлено на рис. 3 и рис. 4 соответственно, вид сверху.

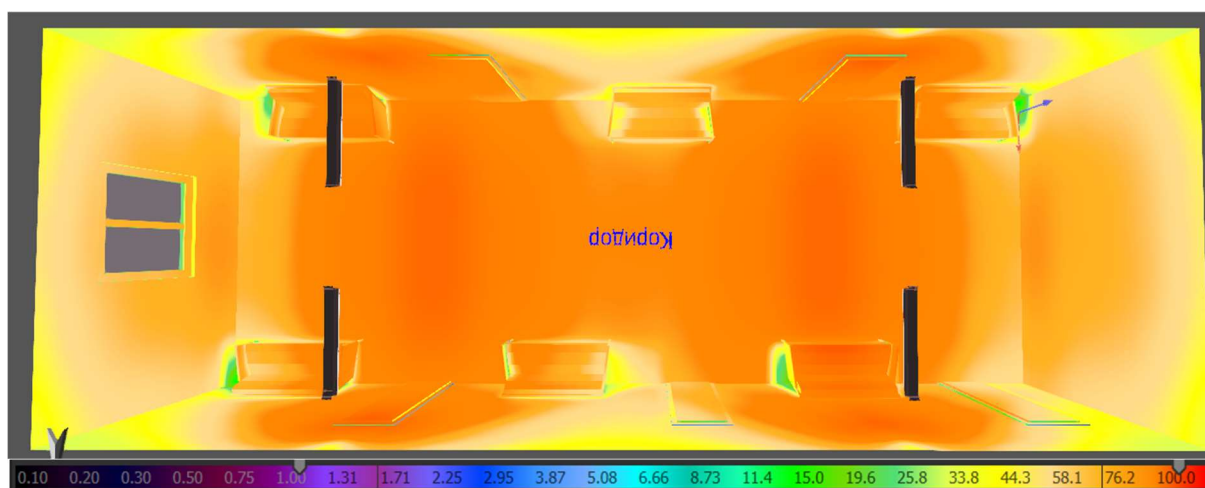


Рисунок 3 – Распределение освещенности (лк) в коридоре общественного здания без диммирования

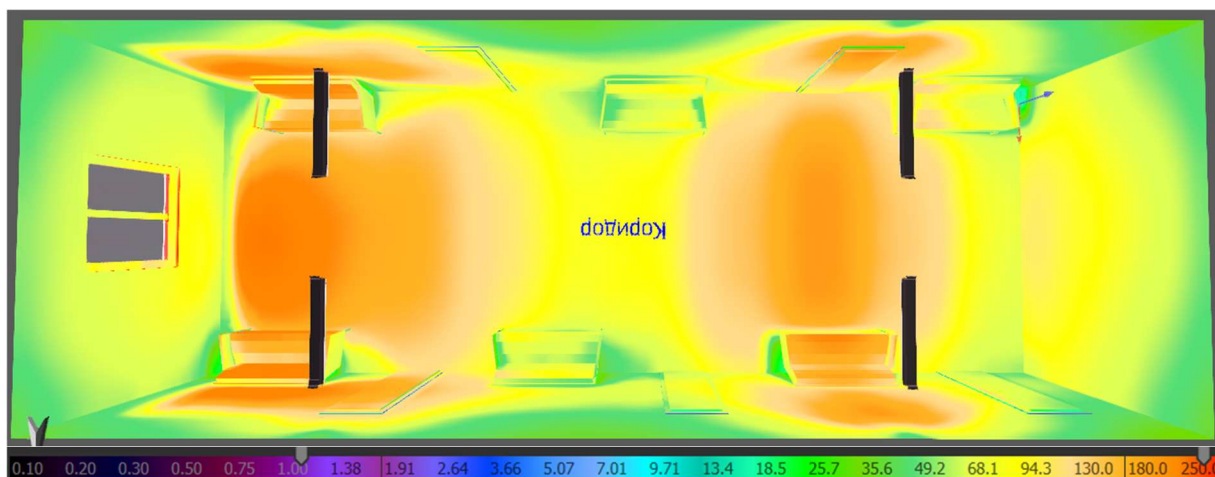


Рисунок 4 – Распределение освещенности (лк) в коридоре общественного здания с использованием диммера (48 %)

Заключение

В данном помещении размещены 4 светильника и произведен светотехнический расчет для двух вариантов установки.

Второй вариант, как и следовало ожидать, вышел с наименьшим электропотреблением и с наименьшими затратами.

В течение дня естественное освещение меняется, диммер будет изменять световой поток, что приводит к снижению электропотребления. Как видно из табл. 1 для первого варианта светотехнического расчета расход электроэнергии за время работы равен 0,792 кВт·ч, а для второго варианта светотехнического расчета составляет 0,55 кВт·ч.

Литература

1. DIALuxLuminaireFinder [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://luminaires.dialux.com/ru/article/qGqDz1LtQ7m-Ts1Bh4mr8Q?_Y=600. – Дата доступа: 17.04.2023.

2. Автоматизация освещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wirenboard.com/ru/pages/lighting/>. – Дата доступа: 14.04.2023.

3. Схема управления освещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ddecad.ru/osnovnye-vidy-shem-upravleniya-osvescheniem/>. – Дата доступа: 15.04.2023.

УДК 621.313

**ДАТЧИКИ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ
SENSORS AND AUTOMATION DEVICE FOR CONTROL OF
PARAMETERS OF TRANSFORMER**

А. П. Буйвол, И. М. Гаращенко, Е. С. Халецкий
Научный руководитель – С. В. Константинова, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск Беларусь

A. Bujvol, I. Garashchenya, E. Khaletski
Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belrus

***Аннотация:** рассмотрены основные направления в автоматизации, датчики и устройства автоматизации для контроля параметров трансформаторов, перспективы развития.*

***Abstract:** the main directions in automation, sensors and automation device for monitoring the parameters of transformer, development prospects.*

***Ключевые слова:** автоматизация, мониторинг, датчик, параметры.*

***Keywords:** automation, monitoring, sensor, options.*

Введение

Актуальные системы контроля состояния трансформатора основываются на инновационных решениях в области разработки устройств мониторинга: для работы с параметрами тока и напряжения, контроля содержания газов и наблюдения за температурой.

Основная часть.

Все многообразие методов и методик контроля можно разбить на 4 группы.

В первую группу входят различные методы с эксплуатацией стационарных датчиков, способных измерять наличие и содержание газов в объеме масле [1].

Примером таких датчиков является газоанализатор Hydran 201Ti (табл. 1). Датчик представляет собой небольшое устройство, простой способ для нахождения признаков неполадок.

Поскольку обычно используется естественная циркуляция масла, в техобслуживании самих датчиков нет необходимости. Однако основная масса подобных датчиков способна определять лишь уровень содержания водорода, либо же суммарное содержание некоторого набора газов в масле, для фиксирования уровня превышения над допустимой концентрацией. Особенностью этих датчиков является простота в настройке и эксплуатации, способность постоянно фиксировать данные и выводить их в удобной форме.

Таблица 1 – Газоанализатор Hydran 201Ti

<p>Внешний вид устройства Hydran 201Ti</p>	
<p>Достоинства</p>	<p>Параметры</p>
<ul style="list-style-type: none"> – постоянный контроль растворенных в трансформаторном масле газов; – наличие дисплея для удобного вывода информации и дистанционного контроля; – используется метод 3 Стандарта; – отсутствие необходимости в насосе из-за применения динамического отбора масла. 	<ul style="list-style-type: none"> – обмен данных по протоколу Modbus; – порт RS-232 ликвидирован и поставлен локальный порт USB; – время отклика – 10 минут; – диапазон измерений: 0–2000 ppm (объем/объем, эквивалент H₂); – точность измерений: ±10 % от показаний ± 25 ppm (эквивалент H₂); – рабочая температура окружающей среды от – 40 °C до +55 °C; – рабочая влажность окружающей среды 0 – 95 % отн. Влажности. <p>Чувствительность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – H₂: 100 % концентрации; – CO: 15±4 % концентрации; – C₂H₂: 8±2 % концентрации; – C₂H₄: 1,5±0,5 % концентрации.

Вторая группа включает методы с портативным контрольно-измерительным оборудованием (табл. 2). Благодаря этому повышается точность, а вместе с тем и расширяется область применения. Как правило, контрольно-измерительное оборудование применяют тогда, когда установка датчиков экономически нецелесообразна.

Таблица 2 – Устройства с портативным контрольно-измерительным оборудованием

	Внешний вид устройства
Достоинства	Параметры
<ul style="list-style-type: none"> – быстрое размагничивание трансформатора; – измерение динамического сопротивления РПН; – температурная коррекция при измерениях тангенса угла диэлектрических потерь и измерениях емкости при 12 кВ / 500 мА; – наличие анализатора силовых выключателей; – ручной режим; – формирование отчета по мере проведения испытаний; – возможность экспорта отчета в формате pdf; – экспорт данных с помощью USB и наличие удаленного управления. 	<ul style="list-style-type: none"> – напряжение питания: 100–240В, 50/60Гц ($\pm 10\%$); – входной ток < 16 А непрерывно; – краткосрочно до 30 А < 60 с; – предохранители F1 и F2, 25 А; – наличие защитного заземления.

Среди минусов можно перечислить невозможность применения портативного оборудования для непрерывного мониторинга параметров. Большая часть методов не имеет возможности считывать необходимую информацию о содержании водорода, однако специальные датчики на это способны.

К третьей группе относят методы, задействующие лаборатории. Основное их преимущество – высокая точность измерений, однако стоимость лабораторных анализов соответствует сложности и дороговизне оборудования [2].

Одной из примеров мобильных лабораторий является Трансформаторная лаборатория Megger (табл. 3).

Таблица 3 – Мобильная лаборатории Megger

<p>Внешний вид устройства</p>	
<p>Достоинства</p>	<p>Параметры</p>
<ul style="list-style-type: none"> – все виды диагностических испытаний; – возможность центрально управления и отчетности; – наличие двух комплектов кабелей для разных рабочих инструментов; – произведение автоматических переключений для рабочих схем; – надежность и точность; – возможность извлечения инструментов для отдельного применения. 	<p>Испытание изоляции:</p> <ul style="list-style-type: none"> – тестовое напряжение, постоянный ток до 5, 10 или 15 кВ; – диапазон измерений 100 кОм до 15 Том; – емкостный ток 2 мА, 6 мА (короткое замыкание); – помехоустойчивость 8 мА. <p>А также испытания:</p> <ul style="list-style-type: none"> – сопротивлений обмоток и контактов РПН; – коэффициента трансформации и векторной группы соединения; – измерение потерь при КЗ и ХХ; – анализ частотных характеристик; – оценка влажности в целлюлозе; – испытания тр. масла на пробой.

Четвертая группа состоит из методов, объединяющих системы постоянного контроля и диагностики. Отличительной чертой данной группы от остальных трех является отсутствие встроенных датчиков и наличие внешних устройств, контролирующих те или иные параметры. При внедрении подобных систем, основная часть датчиков уже имеется на трансформаторе или может быть установлена позднее. Кроме того, для работы требуется организовать каналы связи. Естественно, главным недостатком является высокая цена установки и обслуживания данного оборудования.

Общей особенностью всех этих методик можно выделить то, что их невыгодно использовать в целях контроля параметров электрических машин в сетях 6 (10) кВ.

Приборами для диагностики, которые бы обладали всеми необходимыми качествами для возможности из установки в систему цифровой

подстанции, являются, например, оптоволоконные датчики тока и напряжения для мониторинга параметров тока и напряжения.

В общем виде датчик представлен на рис. 1.

Волоконно-оптический датчик тока

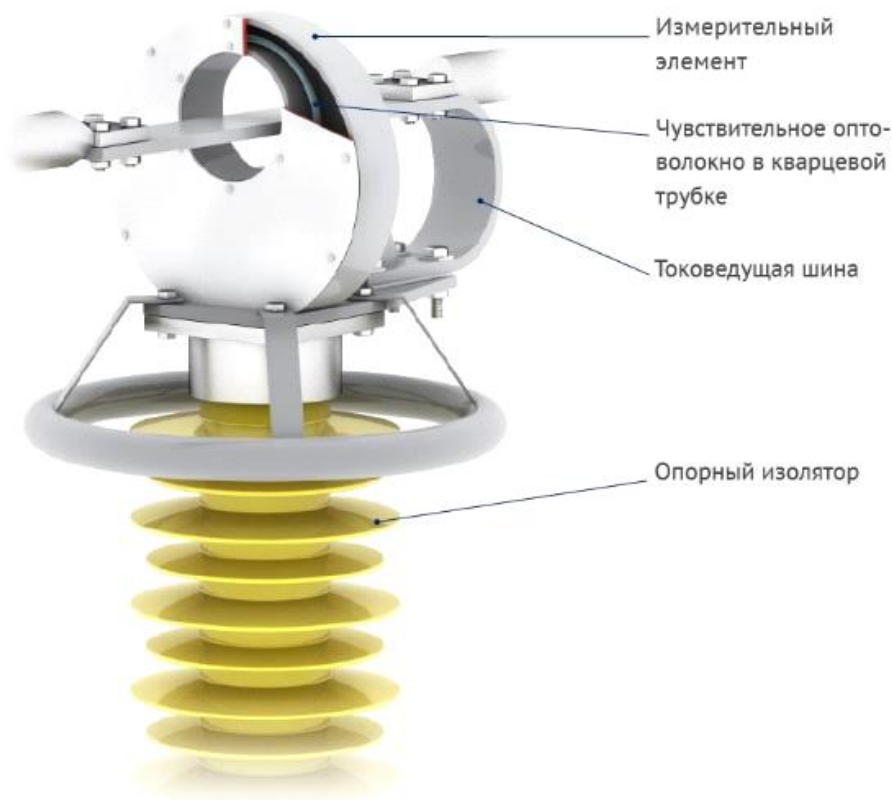


Рисунок 1 – Оптоволоконный датчик тока

Как пример одной из современных систем, предназначенных для мониторинга содержания газа и влаги в объеме масла трансформатора, можно привести систему SmartDGA. Принцип ее работы представлен на рис. 2.

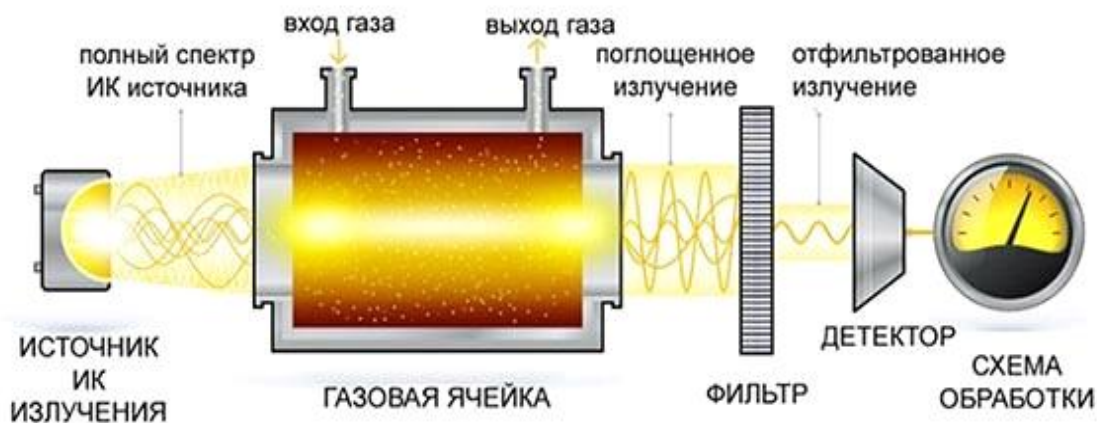


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы анализа SmartDGA

Кратко, концепция работы SmartDGA заключается в том, что газ, собираемый в газовую ячейку, облучают при помощи инфракрасного излучения. Затем специальный фильтр определяет диапазон поглощения данного газа. После этого детектор преобразует сигнал, эквивалентный количеству энергии, поглощенной газом, в процент содержания газа.

Мониторинг механического состояния трансформатора. Механическое состояние трансформатора – это параметр, отражающий усилие осевой прессовки обмоток, определяющее способность обмоток противостоять воздействию ЭДУ токов аварийных режимов. В процессе работы трансформатора усилие прессовки становится меньше и поэтому, для обеспечения надежности работы установки, необходимо следить за ее величиной.

Контролировать данный параметр можно при помощи виброметров. Схема их расположения отображена на рис. 3.

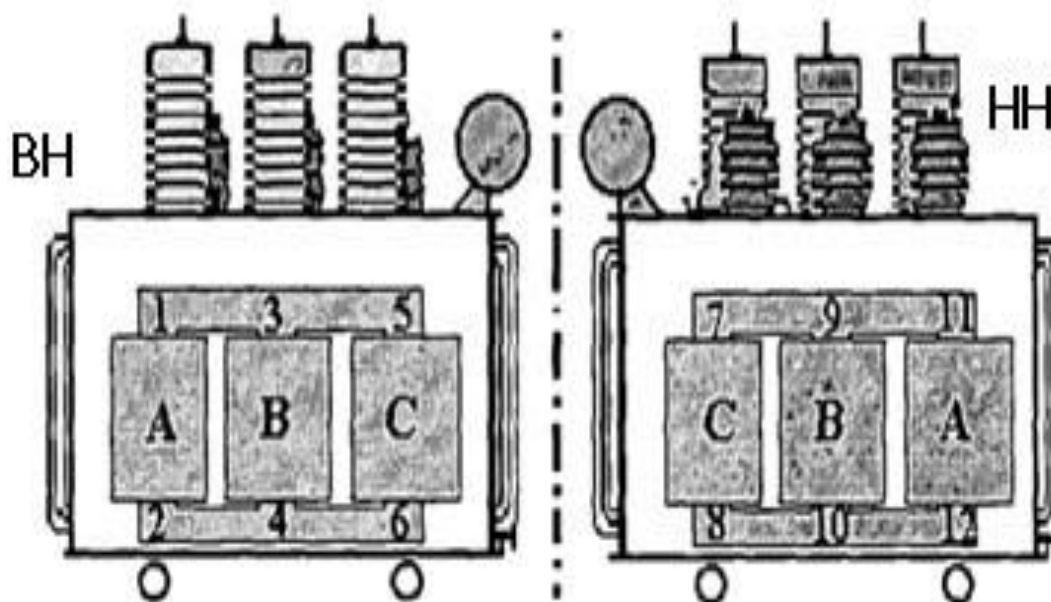


Рисунок 3 – Схема расположения вибродатчиков

Мониторинг теплового состояния трансформатора. Измерять температуру можно разными способами. Используется метод, в котором применяется люминесценция кристаллов АИГ – флюорооптическая технология. На одном конце оптоволоконной части расположен приемник, который фосфоресцирует при воздействии на него световых импульсов из красного спектра. Температура определяется при помощи исследования времени затухания фосфоресценции датчика. Схема расположения термодатчиков приведена на рис. 4.

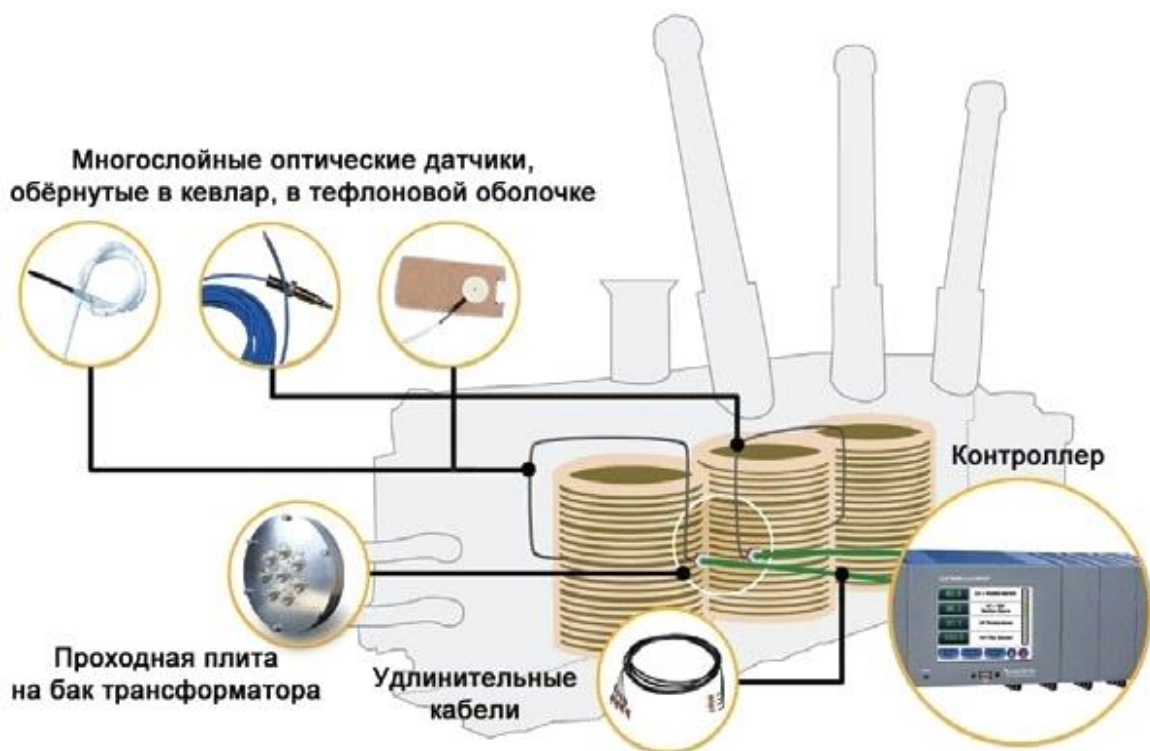


Рисунок 4 – Схема расположения температурных датчиков

Комплексная система мониторинга состояния трансформатора. Вышеперечисленные наработки используются в комплексной системе мониторинга технических параметров трансформатора, объединенной с программно-техническим комплексом цифровой подстанции.

Сравнение построения структур классической и цифровой подстанций приведено на рис. 5.

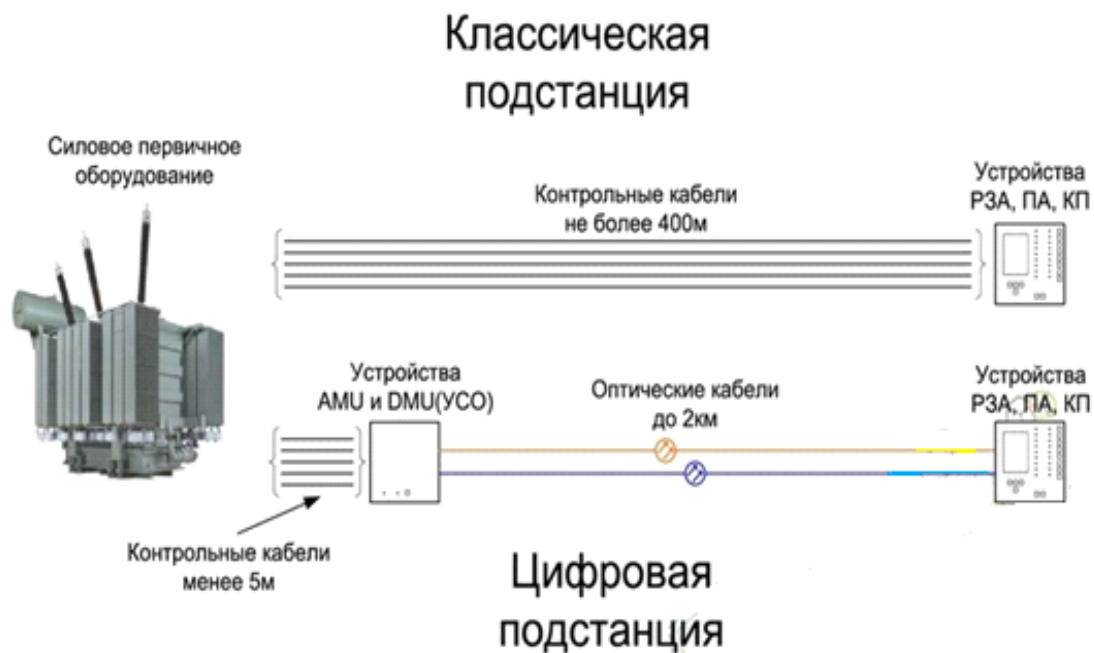


Рисунок 5 – Сравнение структурных схем классической и цифровой подстанций

Перспективным развитием автоматизации работы ЭЭС может стать внедрение искусственного интеллекта или его упрощенной версии в качестве системы обработки данных и на основе анализа данных, по уже внесенным алгоритмам, принимается решение о дальнейших изменениях в работе системы [3]. Это позволит работать системе с большей эффективностью и реализовывать экономически целесообразные планы работы системы. Данный план может быть реализован с помощью множества вычислительных устройств, располагающихся в разных местах, что в перспективе намного выгоднее чем централизованная система, так как может взаимозаменять вышедшие из строя устройства на небольшой период времени. В таком комплексе должен присутствовать центральный контроль и возможность оперативного управления человеком в случае неполадок работы вычислительных машин.

Заключение

Существующие датчики контроля используются в комплексной системе мониторинга технических параметров трансформатора, что является неотъемлемой частью развития автоматизированной энергосистемы, что значительно улучшает ряд рабочих аспектов системы, а также сокращает затраты на ее эксплуатацию, позволяет прогнозировать аварийные ситуации и проработать возможные режимы работы

Литература

1. Непрерывный контроль состояния трансформаторов. Электрооборудование электрических станций, подстанций и сетей. ОИР // [Новости электроэнергетики мира. – № 2, – Тб. М.], 2002 г.
2. Новая система онлайн-мониторинга газов/влаги в трансформаторах и РПН. [Электронный ресурс] / Новая система онлайн-мониторинга газов/влаги в трансформаторах и РПН. – Режим доступа: https://www.pergam.by/catalog/electrical_equipment/monitoring_transformers/. – Дата доступа: 25.02.2023.
3. Сведения по автоматизации регулирования напряжения. [Электронный ресурс] / Сведения по автоматизации регулирования напряжения. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/knigi/ucება/elektricheskie-stancii-podstancii-linii-i-seti-63.html>. – Дата доступа: 25.02.2023.

УДК 620.9

ЛОГИЧЕСКАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ В СЕТЯХ ДО 1 КВ DESIGN FEATURES OF ELECTRICAL DEVICES USED FOR HIGH SHORT-CIRCUIT CURRENTS

С. В. Копко, Я. А. Семенчук

Научный руководитель – А. Ю. Капустинский, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

S. Kopko, Y. Semenchuk

Supervisor – A. Kapustsinski, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье произведен обзор на методы селективной защиты сетей электроснабжения напряжением до 1 кВ, раскрыта тема применения карт селективности и целесообразности их применения.

Abstract: this article provides an overview of the methods of selective protection of power supply networks with voltage up to 1 kV, the topic of using selectivity cards and the feasibility of their use is disclosed.

Ключевые слова: селективность, защита, УЗО, дифавтомат, логическая селективность, карта селективности.

Key words: selectivity, protection, RCD, difavtomat, logical selectivity, selectivity map.

Введение

Для обеспечения устойчивого электроснабжения потребителей электроэнергии необходимо применять скоординированные элементы защиты, которые являются селективными.

Основной целью работы селективных электрических аппаратов защиты является отключение только поврежденного участка цепи с целью минимизации отключения питания для максимального числа потребителей.

Существует несколько видов селективности: абсолютная и частичная. Абсолютная селективность достигается, когда при любом сверхтоке срабатывает только один автоматический выключатель, расположенный близко к повреждению, который остается выключенным на неопределенный период времени.

Частичная селективность возможна, если параметры защитных устройств не согласованы правильно, и в этом случае короткое замыкание может вызвать срабатывание нескольких защитных устройств, что приведет к отключению всей электроустановки или ее значительной части. Это может вызвать экономические потери для потребителей и значительные простои неповрежденной части установки.

Для реализации селективной работы между двумя автоматами в режиме короткого замыкания используется техника, основанная на использовании автоматов и/или устройств разных типов и настройки, которая

позволяет избежать пересечения кривых. Существует несколько основных способов, которые чаще всего используются для достижения селективности между аппаратами в режиме короткого замыкания: токовая селективность, временная селективность и логическая селективность.

Основная часть

К основным видам селективной защиты относятся временная и токовая.

Временная селективность – это форма селективности, которая обеспечивает защиту благодаря разнице во времени срабатывания различных устройств защиты. Для этого в цепи должны быть установлены автоматы с одинаковыми токовыми характеристиками, но с различными временными задержками. Автомат, расположенный ближе к месту повреждения, срабатывает практически мгновенно, в то время как следующий автомат срабатывает через определенное время и так далее.

Токовая селективность – это форма селективности, которая работает по принципу обратному временной селективности. В этом случае все автоматы имеют одинаковую временную задержку при одинаковом значении тока в относительных единицах, но различные номинальные токи. Ближе к потребителям устанавливаются автоматы с меньшей уставкой по току, а далее, ближе к источнику питания, уставка увеличивается. Таким образом, если автомат защиты потребителя не сработал, его может защитить вышестоящий автомат, но с большей выдержкой времени для абсолютного значения тока. Этот вид защиты является наиболее распространенным и часто используется, так как является наиболее простым и экономически эффективным.

Для получения точной информации о том, являются ли защитные аппараты селективными, необходимо обращаться к производителю оборудования, так как данный параметр зависит от большого количества факторов: параметров сети, топологии сети, взаимодействие между защитными устройствами и другими. Кроме того, эффективность селективности может зависеть от правильной координации защитных устройств и наличия информации о токовых характеристиках оборудования [1].

Процесс определения селективности аппаратов защиты производителем обычно осуществляется опытно-аналитическим путем. Для этого проводятся эксперименты на специальных испытательных стендах, которые позволяют воспроизвести условия короткого замыкания в сети. В процессе эксперимента измеряются токовые характеристики защитных устройств и определяется точка срабатывания каждого устройства при различных значениях тока короткого замыкания. Затем производится анализ полученных данных, который позволяет определить, является ли защитный аппарат селективным.

После определения селективности каждого защитного устройства производитель составляет табл. селективности, которые содержат информацию о том, какие защитные устройства должны срабатывать при различных условиях короткого замыкания, чтобы обеспечить максимальную селективность и минимизировать отключение питания для остальных потребителей.

Эти табл. включают информацию о типе и настройках защитных устройств, а также о токовых характеристиках оборудования, которое защищается, пример данной табл. на рис. 1.

Ввод		Compact I _{ном} , А	NS160N				NS250N	NS400N	NS630N
			80	100	125	160	200	250	400
Отх. линия Выключатель		I _{ном} , А							
Multi 9	C60N	10-25	■	■	■	■	■	■	■
		32-40			■	■	■	■	■
		63				■	■	■	■
Compact	NS80H	2.5-6.3	■	■	■	■	■	■	■
		12.5		■	■	■	■	■	■
		25-80				■	■	■	■
	NS100N	16-100				■	■	■	■
	NSA125N	63-125				■	■	■	■
	NS160N	125-160						■	■
	NS250N	200-250							■

Рисунок 1 – Таблица селективности низковольтных автоматических выключателей. Производство Scheider Electric

Для определения селективности защиты крупных систем, необходимо провести анализ графика, отображающего все смежные защитные характеристики в соответствии с расчетными параметрами. Данные графики называются картами селективности. Если на графике отсутствуют пересечения защитных кривых, то можно заключить, что защиты между собой являются селективными. Такой анализ помогает обеспечить надежную и эффективную защиту электроустановок и предотвратить возможные аварии. Для современных защитных систем с применением электронных расцепителей и электромагнитных расцепителей, ступень селективности при обеспечении временной селективности составляет 0,1 с.

Карты селективности (рис. 2) для сетей электроснабжения до 1 кВ составляются для определения последовательности отключения автоматических выключателей при возникновении короткого замыкания в сети. Они позволяют обеспечить наиболее эффективное и быстрое отключение участков сети, где произошло короткое замыкание, минимизируя при этом количество потребителей, оставшихся без электроэнергии.

Для составления карты селективности необходимо провести анализ схемы сети и определить последовательность расположения и характеристики автоматических выключателей на каждом участке сети. Затем необходимо определить время срабатывания каждого автоматического выключателя при возникновении короткого замыкания на участке сети, а также время, необходимое для отключения электроэнергии на данном участке.

В случае, если нет возможности обеспечения токовой и временной селективности, возможно обеспечение логической селективности. Логическая селективность достигается путем обмена информацией между автоматическими выключателями разного уровня системы распределения. Ее принцип заключается в том, что все автоматические выключатели, которые обнаруживают, что ток короткого замыкания превышает значение уставки расцепителя, отправляют сигнал «логическое ожидание» вышестоящему аппарату (ближе к источнику).

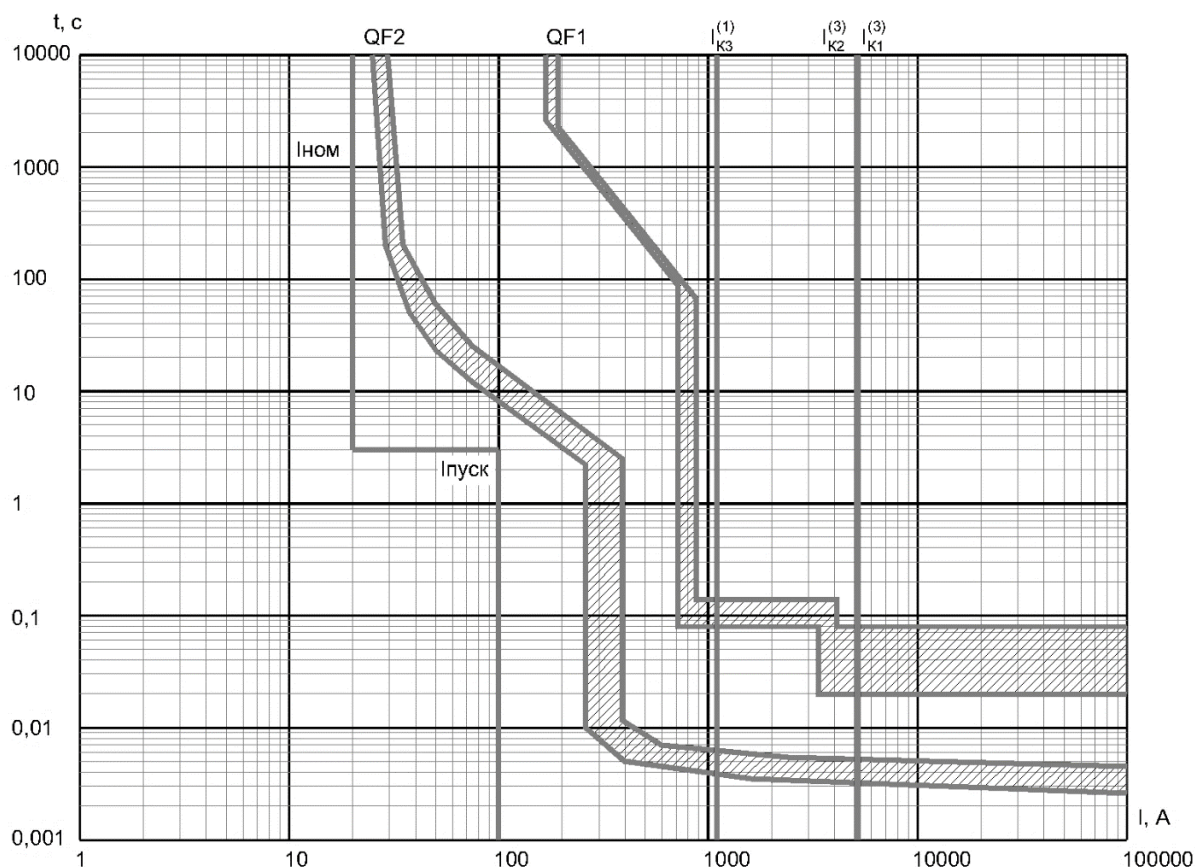


Рисунок 2 – Карта селективности

Расцепитель автомата, расположенного выше непосредственно от точки короткого замыкания, не получает сигнал «логическое ожидание» и срабатывает немедленно. Это проиллюстрировано на рис. 3.

Физический канал связи является неотъемлемой частью системы, обеспечивающей логическую селективность, и необходим для обеспечения правильной работы системы защиты. Он используется для передачи информации между защитными аппаратами и координации их работы в случае возникновения аварийных ситуаций.

При обеспечении логической селективности используются цифровые сигналы, которые передаются по физическому каналу связи. Это могут быть провода, оптические волокна, радиоканалы и другие способы передачи данных. Для обеспечения надежности системы защиты необходимо использовать дополнительный физический канал связи, который будет работать

независимо от основного канала связи. Это позволит избежать сбоев в работе системы защиты в случае отказа основного канала связи.

Одним из недостатков использования физического канала связи является увеличение затрат на оборудование и монтаж системы защиты. Кроме того, необходимо обеспечить надежность и безопасность физического канала связи, чтобы исключить возможность несанкционированного доступа к информации, передаваемой по каналу связи.

Таким образом, использование дополнительного физического канала связи является обязательным для обеспечения надежной работы системы защиты при использовании логической селективности. Он позволяет избежать сбоев в работе системы защиты в случае отказа основного канала связи и обеспечивает координированную работу защитных аппаратов при возникновении аварийных ситуаций [2].

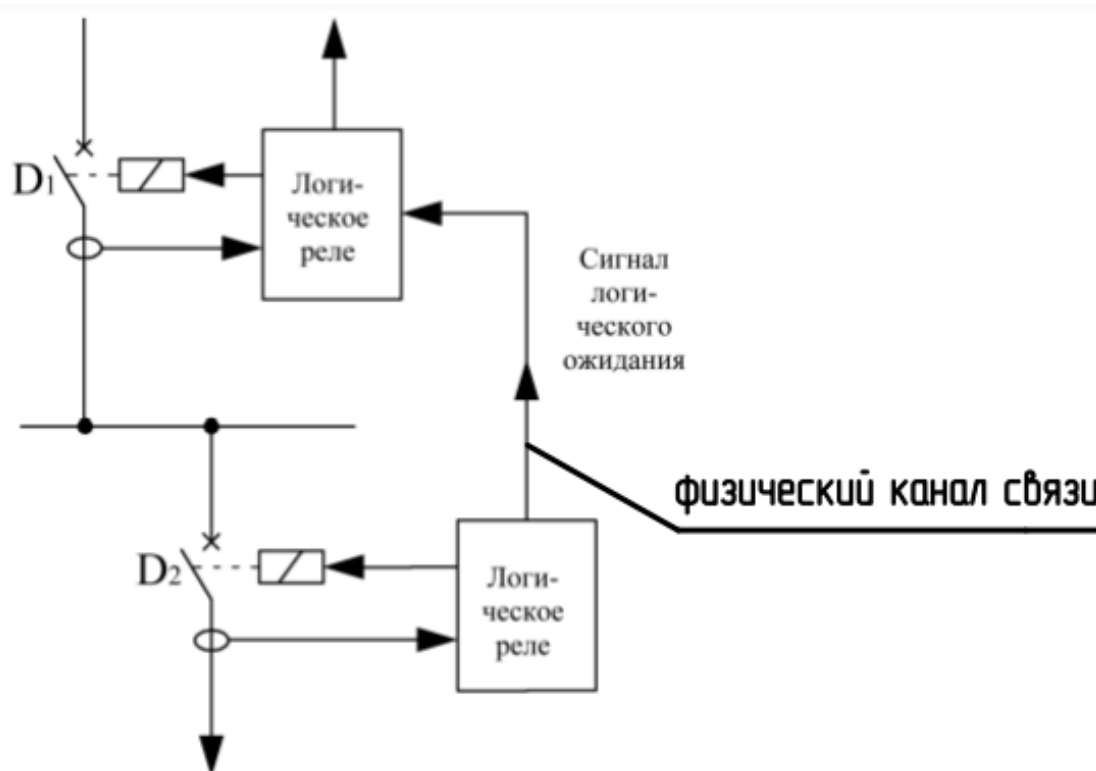


Рисунок 3 – Принципиальная схема работы логической селективности

Заключение

В данной работе рассмотрены различные виды селективной защиты, включая временную, токовую и логическую селективность. Каждый вид защиты имеет свои принципы работы и особенности применения. В частности, логическая селективность требует использования физического канала связи для обмена информацией между защитными аппаратами, что позволяет обеспечить правильную координированную работу системы защиты. Однако, использование дополнительного физического канала связи требует дополнительных затрат на оборудование и монтаж, а также требует обеспечения надежности и безопасности канала связи. Для определения эффективности и селективности защитных аппаратов производитель обычно

проводит опытно-аналитические исследования на специальных испытательных стендах. В целом, использование селективной защиты и правильное ее применение являются важными аспектами обеспечения надежной и безопасной работы систем электроснабжения

Литература

1. Предельная коммутационная способность автоматического выключателя таблица (lemzspb.ru) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lemzspb.ru/predel-naya-kommutatsionnaya-sposobnost-avtomaticheskogo-vyklyuchatelya-tablitsa/>. – Дата доступа: 18.04.2023.

2. Ограничение тока короткого замыкания автоматическими выключателями – электрические аппараты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studme.org/124241/tehnika/ogranichenie_toka_korotkogo_zamykaniya_avtomaticheskimi_vyklyuchatelyami/. – Дата доступа: 18.04.2023.

УДК 621.311

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВЕТИЛЬНИКОВ
РКУ21 ГЕЛИОС И ДКУ72
COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF LIGHTS
RKU 21 HELIOS AND DKU 72**

Е. А. Прищепов

Научный руководитель – Т. М. Ярошевич, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

E. Prishchepov

Supervisor – T. Yaroshevich, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассматриваются характеристики светильников РКУ21 ГЕЛИОС с лампами ДРЛ80 и светодиодные светильники ДКУ72-25, производится их сравнение.*

***Abstract:** the characteristics of RKU21 «GELIOS» lamps with DRL80 lamps and DKU72-LED lamps are considered, their comparison is made.*

***Ключевые слова:** лампы, светильник, светодиод, мощность, световой поток, срок службы.*

***Keywords:** lamps, lamp, LED, power, luminous flux, service life.*

Введение

На сегодняшний день остается открытым вопрос о преимуществах, недостатках, эффективности светильников с лампами типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ и светодиодных светильниках. В связи с чем необходим их сравнительный анализ.

Сравним схожие по своему назначению и параметрам светильники РКУ21 Гелиос с лампами ДРЛ80 и ДКУ72-25.

Основная часть

Светильники РКУ21 Гелиос (рис. 1) с лампами ДРЛ80 в основном применяются для наружного освещения: освещение площадок, дорог, как проезжих ее частей, так и пешеходных, а также для освещения железных дорог и мостов. Он является одним из премиальных сегментов среди множества других светильников [1].

Светильник оснащен защитным ударопрочным стеклом из светостабилизированного поликарбоната, которое в свое время не дает снизить коэффициент пропускания с течением времени.

Светильник, выполнен из двух основных элементов: корпус-крышка, выполненный из термостойкой ударопрочной пластмассы и стального основания, покрытое порошковым составом, благодаря которому светильник остается устойчивым к агрессивным средам.

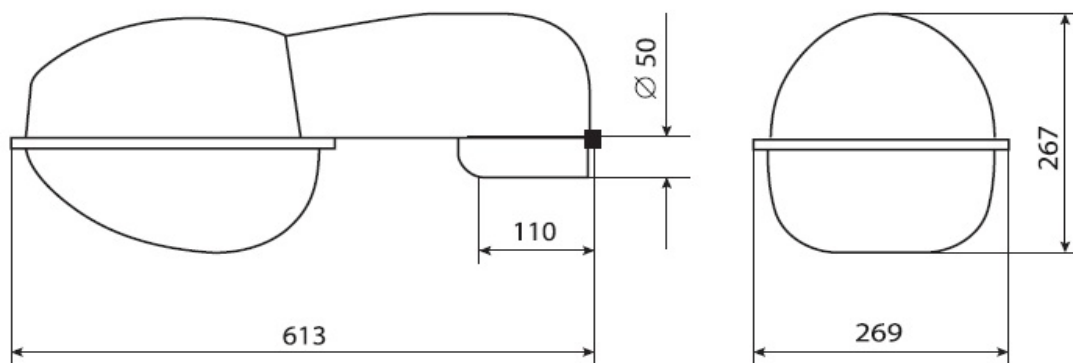


Рисунок 1 – Внешний вид светильника РКУ21 ГЕЛИОС

Одна из немаловажных частей всех светильников – отражатель. В качестве этого элемента в данной лампе выступает анодированный алюминиевый отражатель, с достаточно высоким коэффициентом отражения.

Светильник комплектуется лампой типа ДРЛ. В нашем светильнике применяется лампа ДРЛ80. Мощность данной лампы нетрудно отыскать в аббревиатуре самой лампы – 80 ватт. Лампа имеет световой поток, равный 3600 лм, световую отдачу равную 45 лм/вт. Средняя продолжительность горения такой лампы составляет 12 тыс.ч.

Еще одно из важнейших параметров, для выбора светильников при проектировании, является тип КСС. Данная лампа имеет широкий осевой тип КСС (рис. 2).

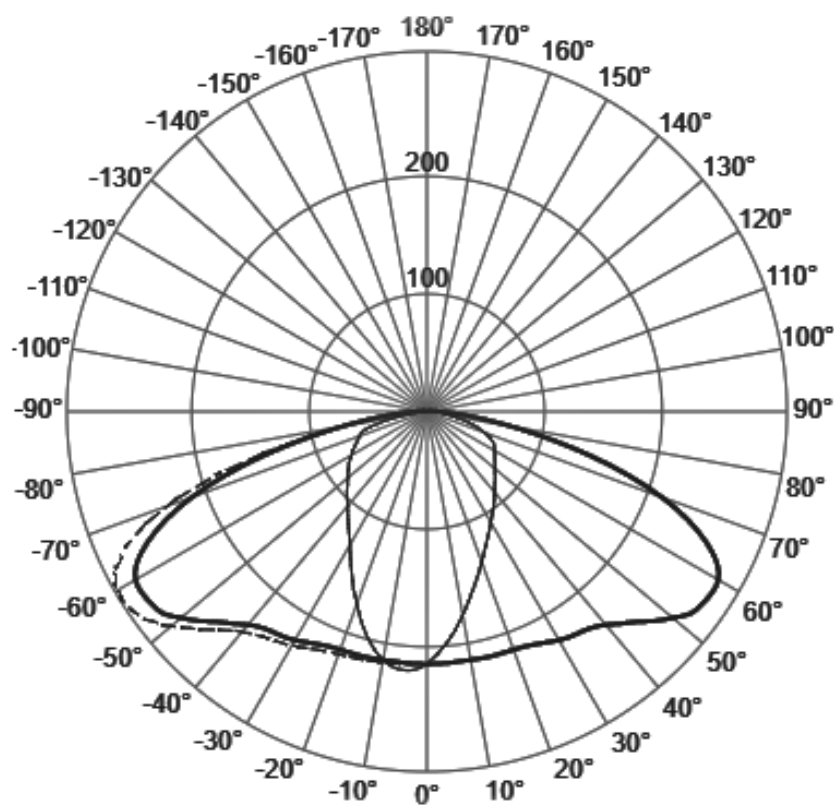


Рисунок 2 – Тип КСС

Светодиодный светильник ДКУ72-25 (рис. 3) имеет совсем другое оснащение, по сравнению с РКУ21 ГЕЛИОС. Здесь мы уже не можем рассматривать светильник как отдельные части: корпус и лампа. Здесь мы рассматриваем светильник в целом [2].



Рисунок 3 – Внешний вид светильника ДКУ72-25

Светильник все так же используется для наружного освещения. Он, как и предыдущий, устанавливается на горизонтальную, вертикальную или Г-образную кронштейнах опор.

Корпус светильника в современной модели уже более проработан и выполнен из экструдированного алюминия, который дает как хорошие механической, так и геотермальное сопротивление, а боковые стороны закрываются торцевыми крышками с уплотнением.

Тип рассеивателя у данного светильника – прозрачный поликарбонат, однако одно из преимуществ – это возможность комплектации специальными видами вторичной оптики, формирующие широкую КСС, как светильник РКУ21 Гелиос не может порадовать нас такой вариацией комплектации.

Если мы рассматриваем схожие по параметрам светильники, то для светильника имеющий почти такой же световой поток – 3650 лм, световая отдача уже составляет 130 лм/вт.

Тип КСС (рис. 4) – широкая боковая, характеризующий распространение светового потока в стороны, чем вдоль оси.



Рисунок 4 – Тип КСС

Ресурс модуля составляет более 100000 ч. Конечно, это намного больше, чем у РКУ21 Гелиос.

Для полного анализа и видимости, составим таблицу, которая покажет сравнение светильников по их основным параметрам и характеристикам, после которой мы сможем дать оценку нашего сравнения (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ светильников

Параметр/Характеристика	РКУ21 ГЕЛИОС	ДКУ72-25
Мощность, Вт	80	28
Световой поток, лм	3800	3650
Световая отдача, лм/Вт	45	130
Тип КСС	Широкая осевая	Широкая боковая
КПД, %	70 %	80–90 %
cosφ	≥80	≥95
Степень защиты, IP	IP54	IP66

Заключение

Если возможности ламп типа ДРЛ, ДРИ, ДНаТ давно изучены, по ним имеется огромная статистика, то по светодиодам мы наблюдаем гораздо меньше информации, и она не всегда бывает правдивой, так как большинство информации для расчета, мы берем в заявленной рекламе на этот светильник с светодиодной лампой.

Кроме того, сравнивать светильники просто по световым потокам ламп, световой отдаче, потребляемой мощности, этого недостаточно.

Для того чтоб окончательно стало ясно, какой выбрать светильник и тип лампы, необходимо исходя из наших критерий производственной работы и нормируемых светотехнических показателей, сделать расчет в программе ДИАЛЮКС.

Литература

1. Наружное освещение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://galad.ru/catalog/outdoor/street/>. – Дата допуска 02.05.2023.
2. Светодиодная продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belintegra.by/catalog/svetodiodnaya-produkciya/naruzhnoe/>. – Дата доступа 02.05.2023.

УДК 621.311

**РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ В СРЕДЕ DIALUXEVO
ILLUMINATION CALCULATION IN THE DIALUXEVO**

Е. А. Прищепов

Научный руководитель – Т. М. Ярошевич, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

E. Prishchepov

Supervisor – T. Yaroshevich, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: производится сравнение светильников РКУ21 ГЕЛИОС и ДКУ72 посредством расчета освещенности в среде DialuxEvo.

Abstract: the characteristics of RKU21 “GELIOS” lamps with DRL80 lamps and DKU72-LED lamps are considered, their comparison is made.

Ключевые слова: лампы, светильник, светодиод, мощность, световой поток, средняя освещенность, DialuxEvo.

Keywords: lamps, lamp, LED, power, luminous flux, average illumination, DialuxEvo.

Введение

При проектировании освещения, в светотехническом расчете, производится выбор систем и видов освещения, источников света, типа и высоты подвеса светильников, производится их размещение и т. д., все это предназначено для создания заданного значения освещенности.

При ручном методе расчета по методу коэффициента использования светового потока и точечному методу, необходимо большое число справочных данных, которое зависит от критерий нашего производственного процесса, выбора светильников, нормируемых светотехнических показателей.

При расчете в программе DialuxEvo используются встроенные базы данных светильников, в которых светотехнические параметры светильников заложены максимально полно и точно. Благодаря этому очень значительно упрощается расчет, при этом наблюдается наглядность.

Расчет освещенности мы произведем в программе DialuxEvo [1], где для сравнения возьмем схожие по своему назначению светильники РКУ21 Гелиос с лампами типа ДРЛ80 и светильники ДКУ72-25 с светодиодами.

Основная часть

Для наглядного расчета воспользуемся генеральным планом завода керамических плит. Согласно этому генеральному плану на территории завода имеются пешеходные дороги, проезжая часть и парковка. В соответствии с СН 2.04.03-2020 средняя освещенность, которую мы должны создать в горизонтальной плоскости предзаводских участков, не относящихся к территории города (площадки перед зданиями, подъезды, проходы к зданиям, стоянки транспорта) составляет 2 люкса [2]. Наши светильники будем

располагать на конических опорах с 3 видами кронштейнов: КР1-Н-S, КР2-Н-S (30 °), КР2-Н-S (90 °).

Расчет со светильниками РКУ21 Гелиос.

Для обеспечения нормируемой освещенности на территории всего предприятия нам понадобилось: 31 светильник РКУ21-80-014 Гелиос с лампами типа ДРЛ80 с мощностью 80 Вт и 6 светильников РКУ21-125-014 Гелиос получаем следующие значения для расчетных плоскостей (рис. 1).

Свойства	Е	Е _{мин}	Е _{макс}	g ₁	g ₂	Индекс
Парковка Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	7.34 lx	1.27 lx	21.4 lx	0.17	0.059	CG1
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	3.90 lx	0.91 lx	10.9 lx	0.23	0.083	CG2
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	3.99 lx	1.45 lx	11.3 lx	0.36	0.13	CG3
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	6.30 lx	2.56 lx	11.5 lx	0.41	0.22	CG4
Пешеходная дорога Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	2.00 lx	1.29 lx	3.48 lx	0.65	0.37	CG5
Пешеходная дорога Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	4.74 lx	1.01 lx	11.3 lx	0.21	0.089	CG6
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	3.93 lx	0.83 lx	11.9 lx	0.21	0.070	CG7
Пешеходная дорога Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	4.21 lx	0.84 lx	21.6 lx	0.20	0.039	CG8

Рисунок 1 – Значения освещенности с лампами РКУ21 Гелиос

Для большей наглядности, отобразим расчеты на генеральном плане предприятия. Для отображения расчетов будем использовать изолинии с соответствующим им значения освещенности: 2, 4, 8 люкс (рис. 2).

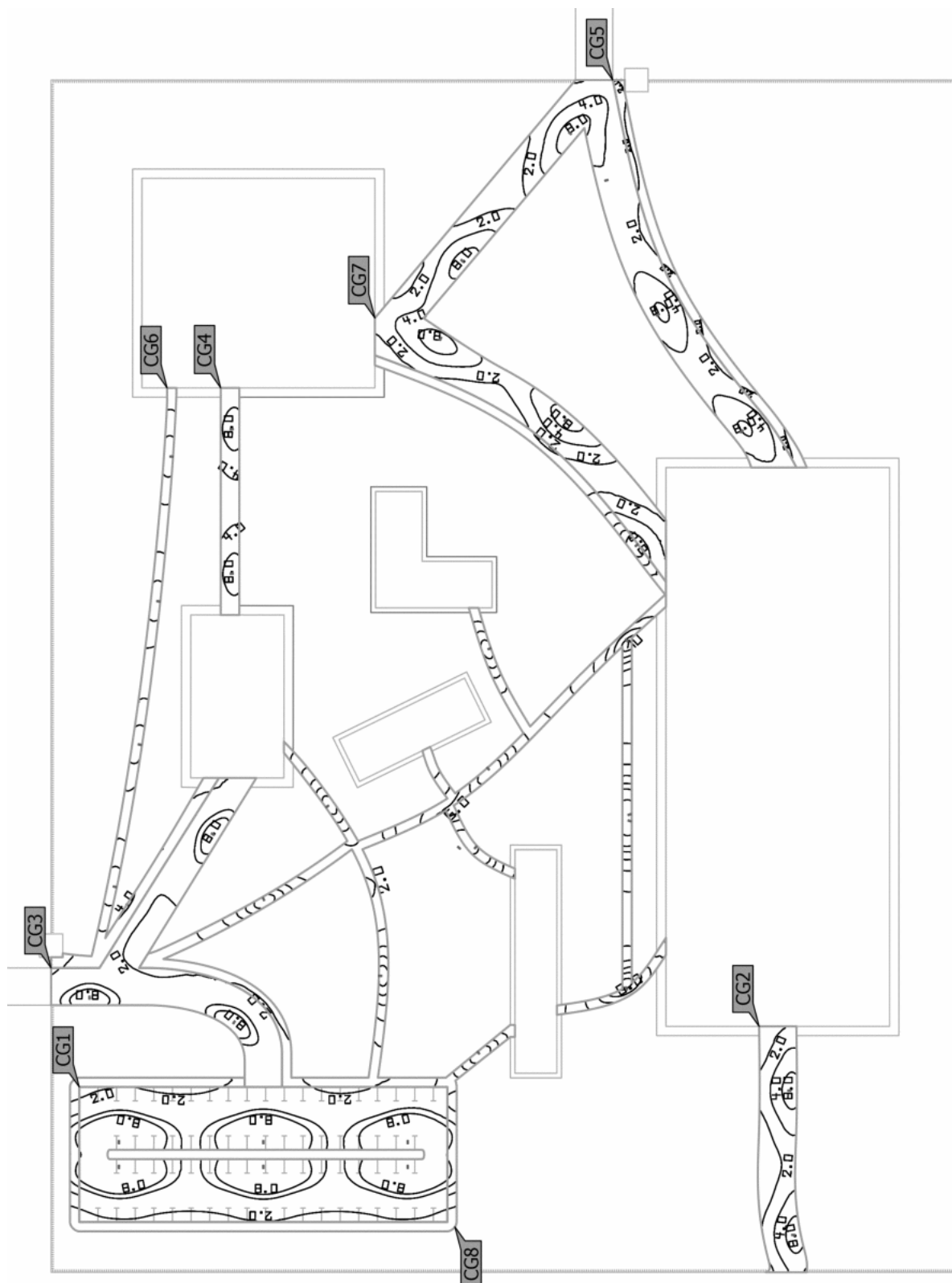


Рисунок 2 – Расчет освещенности со светильниками РКУ21

Заменяем светильники РКУ21-80-014 и РКУ21-125-014 со световым потоком 3600 лм и 6300 лм соответственно на светодиодные светильники со схожим световым потоком ДКУ72-25 и ДКУ72-55 со световым потоком 3650 лм и 6300 лм соответственно и произведем расчет повторно.

Расчет со светильниками ДКУ72.

Для обеспечения нормируемой освещенности на территории всего предприятия нам понадобилось: 31 светильник ДКУ72-25 с светодиодами мощностью 28 Вт и 6 светильников ДКУ72-50 с светодиодами мощностью 55 Вт. Согласно расчету, в среде DialuxEvомы получаем следующие значения для расчетных плоскостей (рис. 3).

Свойства	E	E _{мин}	E _{макс}	g ₁	g ₂	Индекс
Парковка Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	11.0 lx	4.00 lx	25.8 lx	0.36	0.16	CG1
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	7.19 lx	2.21 lx	15.1 lx	0.31	0.15	CG2
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	7.05 lx	2.29 lx	15.6 lx	0.32	0.15	CG3
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	8.67 lx	3.51 lx	17.3 lx	0.40	0.20	CG4
Пешеходная дорога Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	4.46 lx	2.25 lx	8.70 lx	0.50	0.26	CG5
Пешеходная дорога Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	6.85 lx	2.47 lx	14.8 lx	0.36	0.17	CG6
Проезжая часть Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	6.90 lx	2.34 lx	16.1 lx	0.34	0.15	CG7
Пешеходная дорога Перпендикулярная освещенность (адаптивный) Высота: 0.000 m	6.09 lx	2.03 lx	27.3 lx	0.33	0.074	CG8

Рисунок 3 – Значения освещенности с лампами ДКУ72

Для наиболее наглядного отображения расчетов, перенесем оформим расчеты на генеральном плане предприятия. Для отображения расчетов будем использовать изолинии с соответствующим им значения освещенности: 2, 4, 8 люкс (рис. 4).

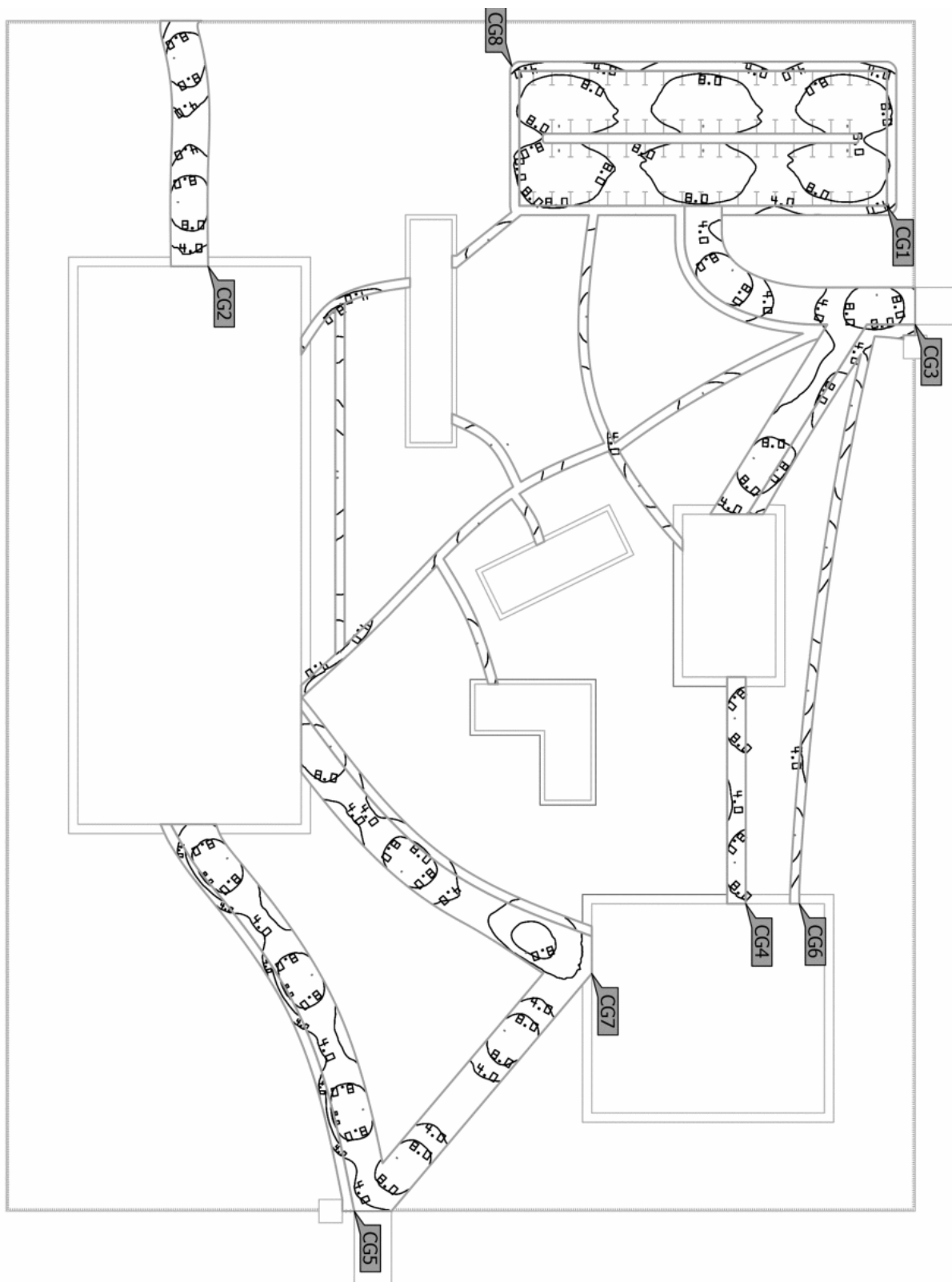


Рисунок 4 – Расчет освещенности со светильниками ДКУ72

Заключение

Можно сделать вывод, что при одинаковом количестве светильников РКУ21 с лампами типа ДРЛ и светильников ДКУ72 с светодиодами, мощность светодиодов практически в 4 раза меньше, чем мощность ламп ДРЛ, что в результате влияет на расход электроэнергии [3]. Кроме того,

с помощью программы DialuxEvo мы можем наблюдать, что у светодиодов спектр цветового восприятия на порядок лучше, чем у ламп типа ДРЛ (если расчет наружного освещения показать не линиями изолюкс, а в виде цветной диаграммы), что немало важно на дорогах, особенно для транспорта. Также мы можем проанализировать распределение освещенности по всей освещаемой поверхности, в результате чего мы видим, что при применении светильников РКУ21 освещенность в отдельных местах намного меньше, чем освещенность со светильниками ДКУ72.

Литература

1. Программа DialuxEvo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/232/2321090.html>. – Дата доступа: 02.05.2023.
2. Наружное освещение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://galad.ru/catalog/outdoor/street/>. – Дата доступа: 02.05.2023.
3. Светодиодная продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belintegra.by/catalog/svetodiodnaya-produkciya/naruzhnoe/>. – Дата доступа: 02.05.2023.

УДК 621.313.522

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ
В ЭНЕРГЕТИКЕ
PROSPECTS FOR THE USE OF MAGNETOHYDRODYNAMIC
GENERATORS IN THE POWER INDUSTRY**

А. П. Каменко

Научный руководитель – И. Н. Прокопеня, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

А. Kamenko

Supervisor – I. Prokopenya, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** краткое описание принципа работы МГД-генератора и его типов, перспектив его использования в современной энергетике.*

***Abstract:** a brief description of the principle of operation of the MHD generator and its types, prospects for its use in modern power industry.*

***Ключевые слова:** магнитогидродинамическая (МГД) генерация энергии, нетрадиционная генерация энергии, токопроводящая жидкость, МГД-генератор, теплоэнергетика.*

***Keywords:** magnetohydrodynamic (MHD) power generation, nonconventional power generation, conducting fluid, MHD generator, thermal power engineering.*

Введение

Концепция МГД-генерации энергии была впервые представлена Майклом Фарадеем в 1832 году. Он сделал попытку измерить напряжение, созданное движением потока воды в магнитном поле Земли. И надо сказать, что его опыт удался. Даже при весьма несовершенной измерительной технике того времени и не очень хорошем проводнике, каким была вода Темзы, он получал вполне ощутимые, хоть и нестабильные, показания приборов [1].

Этот эксперимент в некотором роде изложил основную концепцию магнитогидродинамического генератора или сокращенно МГД-генератора.

Основная часть

МГД-генераторы – устройства, в которых в соответствии с законами магнитогидродинамики происходит преобразование энергии рабочего тела (движущейся жидкости, обычно ионизированного газа или плазмы) в электрическую энергию.

Принцип работы МГД-генераторов, как и обычных электрических генераторов, основан на законе индукции Фарадея. В электропроводящей жидкости, движущейся со скоростью \vec{v} в магнитном поле \vec{B} , индуцируется электродвижущая сила $(\vec{v} \times \vec{B})$ [2]. Когда электроды, подключенные к внешней цепи, расположены так, чтобы по ним текла жидкость,

электрический ток определенной плотности \vec{j} создается электродвижущей силой, причем ток ограничивается законом Ома. На рис. 1 [3] приведена принципиальная схема теплосиловой установки с МГД-генератором.

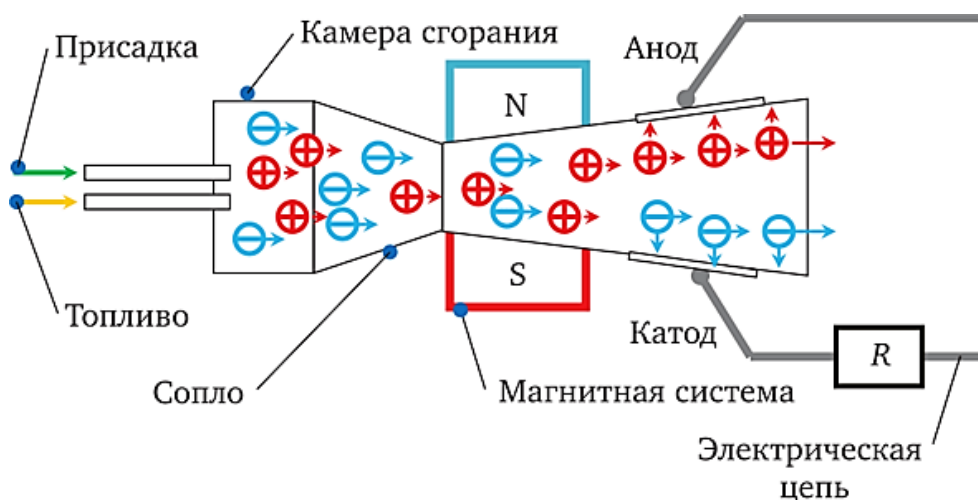


Рисунок 1 – Принципиальная схема теплосиловой установки с МГД-генератором

В канале жидкость работает против электромагнитной объемной силы ($\vec{j} \times \vec{B}$). Часть этой работы расходуется на выработку электроэнергии во внешней цепи (нагрузке). В отличие от обычного турбогенератора, МГД-генератор не имеет движущихся частей, что позволяет существенно повысить температуру рабочего тела.

Выходная мощность МГД-генератора на каждый кубический метр объема его канала пропорциональна произведению проводимости жидкости, квадрату скорости жидкости и квадрату напряженности магнитного поля, через которое проходит жидкость [4]:

$$P = \frac{\sigma v^2 B^2}{\rho} \quad (1)$$

где σ – электропроводность проводящей жидкости, См/м;

v – скорость жидкости, м/с;

B – напряженность магнитного поля, Тл;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Чтобы обеспечить эффективную работу МГД-генератора и чтобы он обладал разумными физическими размерами, электропроводность плазмы должна находиться в при температуре выше 1800 К (1527 °С).

Соответствующее значение электропроводности – от 10 до 50 сименс на метр – может быть достигнуто, если в горячий газ вводится добавка, обычно около 1 процента по массе. Эта добавка представляет собой легко ионизируемый щелочной материал, такой как цезий, карбонат калия или натрий и называется «затравкой». В то время как цезий обладает самым низким потенциалом ионизации (3,894 эВ), калий (4,341 эВ) – дешевле.

Горячий газ с его затравкой находится под давлением в несколько миллионов паскаль. Он разгоняется соплом до скорости в 1000–2000 м/с. Затем газ поступает в канал, поперек которого создается мощное магнитное поле.

Как правило, для создания магнитного поля используется сверхпроводящий магнит. Создается электродвижущая сила, действующая в направлении, перпендикулярном как потоку, так и полю, а стенки, параллельные магнитному полю, служат электродами для подачи тока во внешнюю электрическую цепь. Остальные две стенки канала являются электрическими изоляторами.

Теоретически, МГД-система с проводимостью газа 25 См/м, средним магнитным полем в 3 Тл и средней скоростью газа 1000 м/с способна генерировать электроэнергию плотностью около 250 МВт на кубический метр объема канала.

Конструкция МГД-генератора Фарадея.

Конструкция простого генератора Фарадея (рис. 2) [5] включает в себя клиновидную трубу, изготовленную из непроводящего вещества. Мощный электромагнит создает магнитное поле и позволяет проводящей жидкости проходить через него перпендикулярно, вызывая напряжение. Electrodes расположены под прямым углом к магнитному полю для извлечения выходной электрической мощности.

Такая конструкция имеет ограничения, такие как тип используемого поля и плотность. В конечном счете, количество энергии, потребляемое с использованием конструкции Фарадея, прямо пропорционально площади трубки и скорости токопроводящей жидкости.

Основным недостатком МГД-генератора Фарадея является то, что между электродами по бокам используемой трубы может произойти короткое замыкание. Кроме того, конструкция страдает от ограничений, налагаемых плотностью жидкости, а также типом используемого магнитного поля.

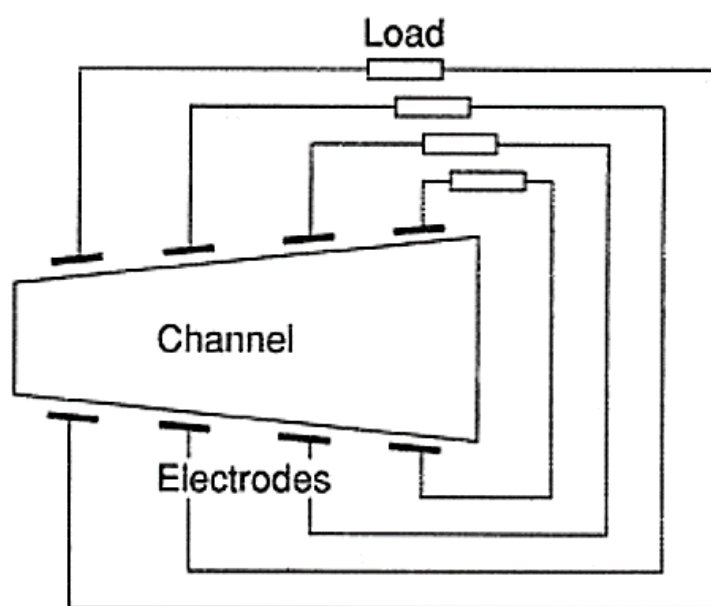


Рисунок 2 – Конструкция МГД-генератора Фарадея

МГД-генератор Холла.

В МГД-генераторе Фарадея большое количество тока, вырабатываемого на выходе генератора, взаимодействует с магнитным полем, присутствующим в системе, и, следовательно, приводит к смещению заряженных частиц в направлении, перпендикулярном направлению пути потока жидкости, которое известно, как эффект Холла. В результате чего создается поперечный ток, перпендикулярный направлению потока текучей среды, и общий создаваемый ток определяется как векторная сумма компонентов, поперечных составляющих тока и осевой составляющей тока. Чтобы преодолеть эту проблему, уменьшить потери энергии и повысить эффективность, разработали другие МГД-конфигурации, такие как МГД-генератор Холла (рис. 3).

В МГД-генераторе Холла первый и последний электроды в канале питают нагрузку. Следующий электрод закорочен на электрод на противоположной стороне канала. Эти короткие замыкания тока Фарадея создают мощное магнитное поле внутри жидкости.

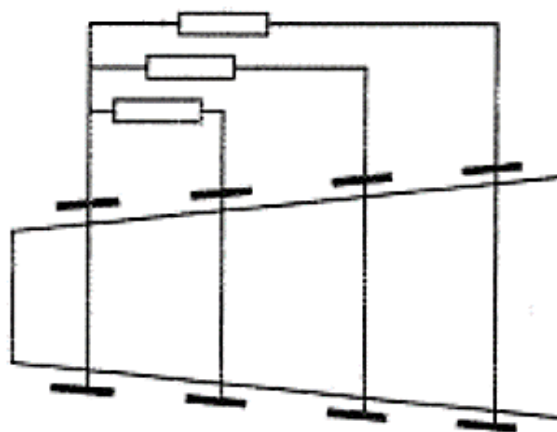


Рисунок 3 – Конструкция МГД-генератора Холла

Однако у этой конструкции есть недостаток в том, что скорость потока жидкости требует смещения средних электродов, чтобы «поймать» токи Фарадея. По мере изменения нагрузки скорость потока жидкости меняется, что приводит к еще большему смещению тока Фарадея и делает генератора очень чувствительным к нагрузке.

Заключение

Можно выделить основные преимущества МГД-генератора:

- внутри циркулирует только рабочая жидкость, и нет движущихся механических частей, что сводит механические потери к нулю;
- температура рабочей жидкости поддерживается стенками генератора;
- КПД выше, чем у большинства других традиционных или нетрадиционных методов генерации;
- производит меньше загрязняющих веществ, чем обычные установки.

Но даже несмотря на перечисленные преимущества более высокие затраты на строительство МГД-систем ограничивают их внедрение. Эта ситуация может измениться, если цены на энергоносители или экологические соображения существенно изменятся.

Литература

1. Электрические сети [Электронный ресурс] / Энергетика завтрашнего дня – магнитогидродинамические генераторы. – Режим доступа: <https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/energetika-zavtrashnego-dnya-8.html>. – Дата доступа: 15.04.2023.

2. Thermopedia [Электронный ресурс] / Magnetohydrodynamic electrical power generators – Режим доступа: <https://www.thermopedia.com/content/934/>. – Дата доступа: 15.04.2023.

3. Studme [Электронный ресурс] / Цикл теплосиловой установки с магнитогидродинамическим генератором. – Режим доступа: https://studme.org/357676/tehnika/tsikl_teplosilovoy_ustanovki_magnitogidrodinamicheskim_generatorom. – Дата доступа: 15.04.2023.

4. Electrical4u [Электронный ресурс] / MHD Generation or Magneto Hydro Dynamic Power Generation. – Режим доступа: <https://www.electrical4u.com/mhd-generation-or-magneto-hydro-dynamic-power-generation/>. – Дата доступа: 15.04.2023.

5. Elprocus [Электронный ресурс] / What is MHD Generator: Design, Working & Applications. – Режим доступа: <https://www.elprocus.com/mhd-generator/>. – Дата доступа: 15.04.2023.

УДК 536.75

НУЛЕВОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ – «PRO ET CONTRA» ZEROTH LAW OF THERMODYNAMICS – «PRO ET CONTRA»

М. С. Войлоков

Научный руководитель – Ю. П. Ярмольчик, к. т. н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

M. Voylokov

Supervisor – Y. Yarmolchick, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: нулевой закон термодинамики – за или против его использования в современных учебниках.

Abstract: zeroth law of thermodynamics – for or against its use in modern textbooks.

Ключевые слова: термодинамика, нулевой закон, температура, Ральф Говард Фаулер, Каратеодори.

Key words: thermodynamic, zeroth law, temperature, Ralph Howard Fowler, Caratheodory.

Введение

Нулевой закон термодинамики является самым последним сформулированным законом термодинамики. Его введение в «официальную» Термодинамику имело и имеет научные и методологические аргументы «ЗА И ПРОТИВ» (по латыни: «PRO ET CONTRA»). Общепринятая формулировка Нулевого закона термодинамики звучит так: если термодинамическая система № 1 находится в равновесии с термодинамической системой № 3 и термодинамическая система № 2 находится в равновесии с системой № 3, то это означает, что термодинамическая система № 1 находится в термическом равновесии с системой № 2, что является транзитивным выражением. Таким образом системы, находящиеся в тепловом равновесии, обладают одинаковой температурой. Что означает – нулевой закон термодинамики представляет собой постулат.

Основная часть

Для базового понимания нулевого закона термодинамики и необходимости его применения на практике, нужно понять, что такое температура. Температура (от лат. *temperatura* – надлежащее смешение, нормальное состояние) – это физическая величина, характеризующая термодинамическую систему и количественно выражающая интуитивное понятие о различной степени нагретости тел. То есть у нас нет четкого физического определения, что такое температура.

С точки зрения термодинамики температура – это особый параметр. Разница температур двух термодинамических систем является индикатором направления передачи тепловой энергии – самопроизвольно тепло передается только от горячего тела к холодному до момента равновесия двух

систем. Это обстоятельство и фиксирует нулевой закон, который называют законом о существовании температуры.

Другое четкое раннее утверждение об этом принадлежит Каратеодори в части 4 раздела 6 его статьи от 1909 года: «В каждом случае, когда каждая из двух систем S_1 и S_2 находится в равновесии с третьей системой S_3 при аналогичных условиях, системы S_1 и S_2 также будут находиться в равновесии друг с другом». Однако это было изложено без дальнейших комментариев, по-видимому, просто как констатация соответствующего экспериментального факта [1].

Стоит отметить, что несмотря на ранние упоминания принципов нулевого закона термодинамики, он так и не был описан в литературе. До 1935 года не было сформулировано определение такого термина, как «температура». Несмотря на то, что все три закона термодинамики были открыты уже до 1935 года без определения температуры. Ральф Говард Фаулер понял, что тепловое равновесие – очень важное явление, и оно должно быть определено до 1-го закона термодинамики. Важность нулевого закона, который дает определение температуры или показывает, что некоторая физическая величина, называемая «температурой», также существует, не следует уменьшать. По словам Фаулера, этот закон следует соблюдать в первую очередь для правильного понимания законов термодинамики. Но уже было опубликовано большое количество книг с первым законом, вторым законом и третьим законом. Таким образом, изменение номеров этих законов могло создать большую путаницу. Таким образом, он был вынужден принять число «ноль» для своего закона. И, наконец, этот закон был назван «нулевым законом термодинамики» [2].

По Фаулеру параметр T – это абсолютная температура в Кельвинах. Она характеризует среднюю кинетическую энергию движения частицы системы, приходящуюся на одну степень свободы:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} ikT, \quad (1)$$

где i – число степеней свободы;

k – постоянная Больцмана;

$\langle E \rangle$ – средняя кинетическая энергия хаотического движения.

Для одноатомных молекул $i = 3$ (три направления свободного движения), для двухатомных $i = 5$ (свободное движение плюс два вращения), для трехатомных и более $i = 6$ (свободное движение плюс три вращения) [3].

Заключение

В традиционных, некаратеодористских трактовках термодинамики нулевой закон подразумевается либо молчаливо, либо явно в качестве опоры для предшествующего введения перед остальными законами термодинамики понятия температуры.

Литература

1. Turner, L. A. Zeroth Law of Thermodynamics. / L. A. Turner // American Journal of Physics – 1961– № 29. – P. 71–76.
2. Law of thermodynamics [Электронный ресурс] / Zeroth law of thermodynamics. – Режим доступа: <https://lawofthermodynamicsinfo.com/zeroth-law-of-thermodynamics/>. – Дата доступа: 26.03.2023.
3. StudMe [Электронный ресурс] / Законы термодинамики. – Режим доступа: https://studme.org/310050/matematika_himiya_fizik/zakony_termodinamiki. – Дата доступа: 26.03.2023.

УДК 621.311

**ТОПОЛОГИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБМОТОК ПЕЧАТНЫХ
СТАТОРОВ АКСИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**
**TOPOLOGIES OF LUMINATE WINDINGS OF PRINTED STATORS
OF AXIAL VALVE ELECTRIC MOTORS**

М. А. Мойсееня, А. А. Радкевич

Научный руководитель – Т. Е. Жуковская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

М. Maiseyenia, A. Radkevich

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассмотрен вопрос проектирования конструкций обмоток статоров, изготовленных на печатных платах с медными обмотками, для вентильных электродвигателей с аксиальным магнитным потоком. В системе автоматизированного проектирования (САПР) Altium Designer созданы прототипы печатных статоров различных конфигураций концентрических обмоток: круговой и трапецевидной. Описан процесс создания печатных статоров в Altium Designer. Проанализированы преимущества и недостатки каждой из рассмотренных топологий печатных статоров. Полученные модели печатных статоров являются основой для изготовления физических образцов печатных статоров аксиальных электродвигателей.*

***Abstract:** the article deals with the issue of PCB stator with copper windings design for AC electric motors with axial magnetic flux. In the software CAD system Altium Designer prototypes of various PCB concentric stators winding configurations were created: circular and trapezoidal. The methodology and process of layer-by-layer creation of PCB stators in Altium Designer were described. The advantages and disadvantages of each of the considered topologies of PCB stators were analyzed. The obtained models of PCB stators are the basis for producing of PCB stators physical samples of an axial electric motors.*

***Ключевые слова:** сосредоточенные обмотки, печатный статор, обмотка статора, синхронный электродвигатель, вентильный электродвигатель, аксиальный электродвигатель, Altium Designer.*

***Keywords:** concentrated windings, PCB stator, stator winding, synchronous electric motor, AC electric motor, axial-flux motor, Altium Designer.*

Введение

В последнее десятилетие получила развитие новая технология производства синхронных электродвигателей со статорами на печатной плате с аксиальным магнитным потоком. Аксиальная конструкция синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе (AFPM) компактна и легка по сравнению с двигателями с радиальным магнитным потоком. Поэтому

она подходит для применения в условиях, требующих высокой частоты вращения. Отсутствие стального сердечника статора минимизирует высокочастотные потери мощности в стали, и, следовательно, повышает коэффициент полезного действия двигателя. Кроме того, конструкция аксиального двигателя с печатным статором повышает удельную мощность двигателя. Исходя из этого, такие двигатели нашли применение в тех областях промышленности, где требуются минимальные габариты и высокое быстродействие: в устройствах автоматизации, бытовой электронике, медицинской технике и т. п. [1]

Вместе с тем, вопросы проектирования двигателей с печатными статорами еще не до конца исследованы. Поскольку на формирование требуемого вращающегося магнитного поля статора влияют ряд факторов, среди которых конфигурация обмоток платы, толщина и ширина дорожек, число слоев платы, ширина воздушного зазора, топологии постоянных магнитов роторов и т. д., вопрос выбора оптимальной топологии печатного статора является актуальным для изучения.

Исходя из этого, целью данной работы является анализ различных конструкций и топологий обмоток печатных плат статоров вентильных электродвигателей с аксиальным магнитным потоком на основе проектирования цифровых двойников печатных статоров в программном пакете Altium Designer. Поставленная цель определила следующие задачи исследования:

- анализ существующих обмоток печатных статоров, их классификация;
- разработка методики проектирования и создания цифровых прототипов печатных статоров в САПР *Altium Designer*;
- анализ полученных результатов проектирования печатных плат, определение достоинств и недостатков каждой конфигурации, рекомендации по выбору наиболее оптимальной топологии печатного статора.

Основная часть

Ключевым аспектом проектирования конструкции печатного статора аксиального двигателя является тип используемой обмотки. В печатных статорах получили распространение обмотки сосредоточенного и распределенного типа. Как сосредоточенные, так и распределенные обмотки имеют ряд преимуществ и недостатков.

Так авторы спроектировали и оптимизировали сосредоточенные обмотки печатной платы, уменьшив площадь платы, но обмотки по-прежнему занимали большую площадь [2]. В работе [3] показано, что обмотки печатных плат волновой формы имеют более высокий КПД и меньшие потери, чем круговые обмотки печатных плат. Новая обмотка печатной платы объединила преимущества трапецевидной и круговой обмоток, и, с увеличенной против-ЭДС и мощностью, имеет более высокий КПД, чем трапецевидные, круговые и ромбические обмотки [3].

Таким образом, можно видеть, что исследования статорных обмоток в основном касаются формы и оптимизации неперекрывающихся сосредоточенных обмоток (ромбовидных, волновых, трапецевидных и круговых).

Распределенные обмотки, топологии их соединений и коэффициент использования обмоток статора мало изучены.

В ходе выполнения исследования в среде проектирования печатных плат *Altium Designer* были созданы прототипы печатных статоров двух конфигураций сосредоточенных обмоток: круговой и трапецевидной.

Методика создания печатных плат основывалась на конструировании обмоток исходя из заданных геометрических параметров, номинальной частоты вращения, номинального тока, мощности, КПД двигателя.

Результат создания печатного статора с обмотками сосредоточенного кругового типа отображен на рис. 1.

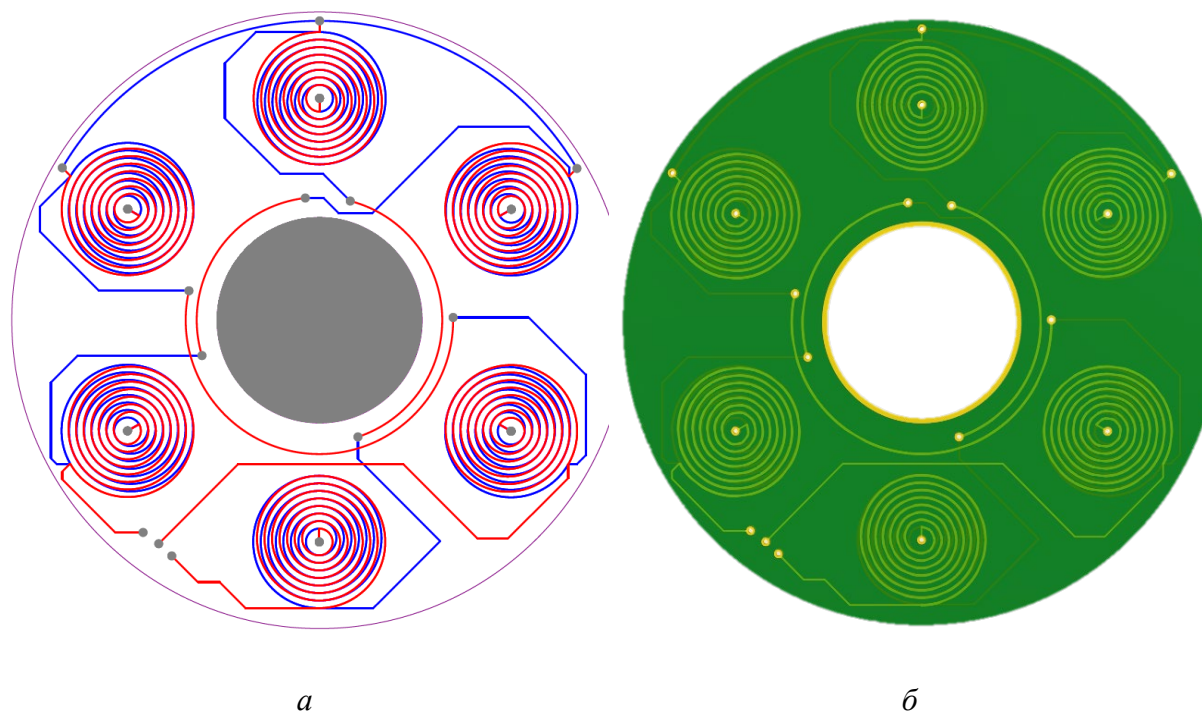


Рисунок 1 – Модель печатного статора с обмотками кругового сосредоточенного типа в Altium Designer: *а* – 2D схема разводки; *б* – 3D прототип

Печатная плата, изображенная на рис. 1, является двухслойной, благодаря этому она становится дешевле, но исходя из этого достигается меньший магнитный поток и мощность двигателя.

Технические характеристики печатного статора, спроектированного в соответствии с рис. 1, указаны в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики печатного статора с круговыми обмотками

Наименование параметра	Значение
Число катушек	6
Расстояние между дорожками катушки, мм	1
Ширина дорожки катушки, мм	0,25
Число слоев платы	2
Максимальный ток катушек, А	2
Номинальная мощность катушек, Вт	80
Номинальный КПД катушки, %	85

Сосредоточенная обмотка, как показано на рис. 1, состоит из концентрических катушек. Каждая фаза обмотки соединена последовательно посредством нескольких катушек. Поскольку катушки являются круговыми с фиксированным расстоянием между дорожками, коэффициент шага намотки постоянный.

Преимущества сосредоточенных обмоток по сравнению с распределенными заключаются в более короткой длине проводников и более простой конструкции. Некоторые исследования показали, что сосредоточенные катушки имеют оптимальные коэффициенты обмоток и снижают потери в меди, особенно в конструкциях двигателей с большим числом полюсов. Сосредоточенные обмотки подходят для осевых вентильных двигателей как по причине высокой эффективности, так и по причине простоты изготовления [2–3].

На рис. 2 представлен другой тип сосредоточенной обмотки с трапециевидными катушками, созданный в *Altium Designer*.

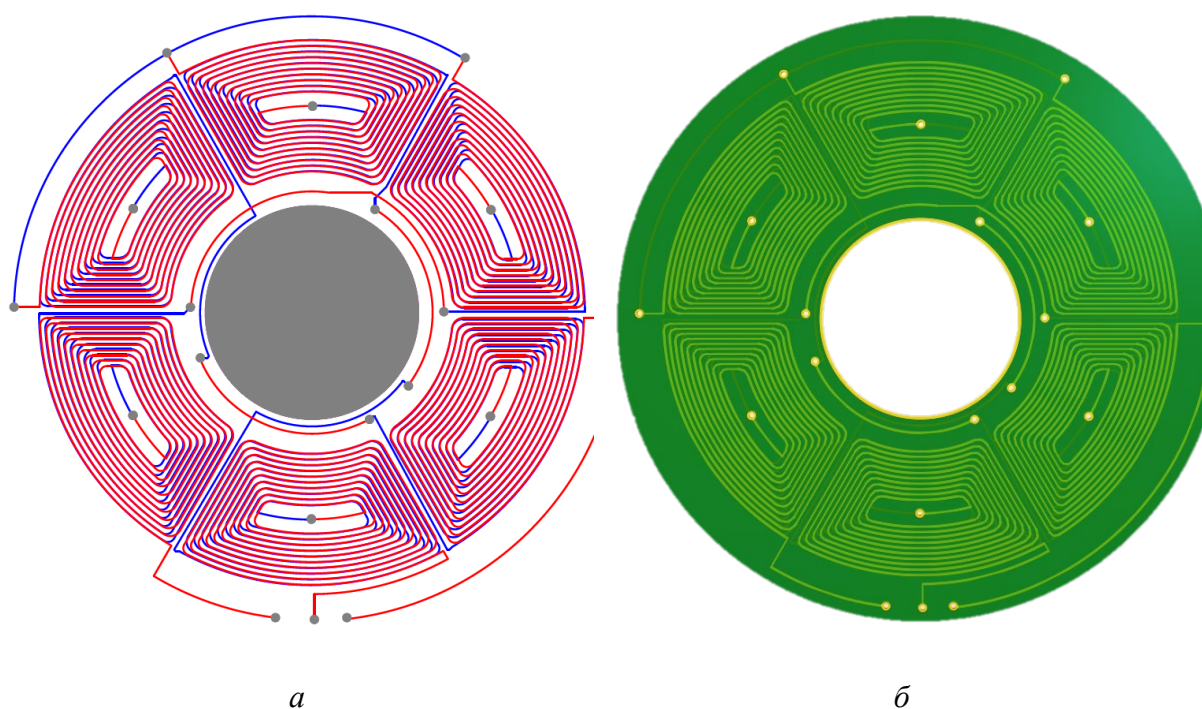


Рисунок 2 – Модель печатного статора с обмотками трапецеидального сосредоточенного типа в *Altium Designer*: *а* – 2D схема разводки; *б* – 3D прототип

Технические характеристики печатного статора с сосредоточенными трапециевидными обмотками согласно рис. 2 указаны в табл. 2.

Плата печатного статора с трапециевидными катушками, показанная на рис. 2, также является двухслойной, а ее эффективность зависит от площади поперечного сечения медных дорожек. Трапециевидная сосредоточенная обмотка является более распространенной по сравнению с круговой, а также имеет ряд отличий. Импеданс падения напряжения в этой обмотке будет больше, чем противо-ЭДС, что не только влияет на увеличение удельной

мощности, но при этом увеличивает и сопротивление обмотки. Эта обмотка также характеризуется большим потреблением меди [2].

Таблица 2 – Характеристики печатного статора с трапециевидными обмотками

Наименование параметра	Значение
Число катушек	6
Расстояние между дорожками катушки, мм	1
Ширина дорожки катушки, мм	0,25
Число слоев платы	2
Противо-ЭДС катушек, В	12,66
Номинальная мощность катушек, Вт	80,87
Номинальное сопротивление катушек, Ом	3,02
Номинальный электромагнитный момент катушек, Н·м	0,121
Потери напряжения в меди, В	12,08
Номинальный КПД катушек, %	85,06

Уменьшение высоты или ширины дорожки увеличивает потери в меди постоянного тока из-за более низкой допустимой нагрузки по току, если количество дорожек неизменно. Минимальная ширина медной дорожки ограничена точностью оборудования, используемого для производства платы. Коэффициент заполнения печатных плат ограничен свойствами изоляционного материала между медными дорожками, при этом напряжении утечки угрожает целостности печатной платы, если создаются зазоры ниже минимума, определенного в действующих стандартах для печатных плат производство. Для двигателей с печатными статорами, работающими на низких частотах порядка 25 Гц, ширина медной дорожки составляет 1,2 мм. В АФРМ двигателя, рассчитанном на работу на частоте 1 кГц, ширина медной дорожки 0,3 мм, с расстоянием 0,3 мм между дорожками [3]. Общий стандарт проектирования печатных плат IPC-2221. рекомендует иметь минимальное расстояние 0,13 мм между дорожками при минимальной ширине дорожки 0,15 мм [3].

Заключение

В ходе проведенного исследования двух видов сосредоточенных обмоток были получены параметрические 2D и 3D модели двухслойных печатных плат статора для вентильного двигателя, включающие круговую и трапецеидальную обмотки, содержащие 6 катушек. Конструкция обмоток статора оказывает непосредственное влияние на производительность двигателя, что характеризуется коэффициентом использования статора. Результаты аналитических и экспериментальных исследований показывают, что тип статора с сосредоточенными катушками и постоянным шагом обмоток превосходит все другие типы обмоток, включая распределенные. Из рассмотренных вариантов преимуществом обладает трапециевидная обмотка с шагом катушки 240 электрических градусов за счет улучшенного коэффициента заполнения обмотки.

Литература

1. Xia, B. Comparative study of air-cored axial-flux permanent-magnet machines with different stator winding configurations / B. Xia, J. X. Shen, P. C. K. Luk, W. Fei. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Т. 62, №. 2. – P. 846–856.
2. Kesgin, M. G. Design optimization of coreless axial-flux PM machines with Litz wire and PCB stator windings. / M. G. Kesgin, P. Han, N. Taran, D. Lawhorn, D. Lewis, D. M. Ionel. // 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – IEEE, 2020. – P. 22–26.
3. Wang, X. Winding design and analysis for a disc-type permanent-magnet synchronous motor with a PCB stator. / X. Wang, H. Lu, X. Li. // Energies. – 2018. – Т. 11, №. 12. – P. 3383.

УДК 621.316.925

**ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКОВ ТРАНСФОРМАТОРА
ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЕГО НА ХОЛОСТОЙ ХОД И ПРИ
ЗАМЫКАНИЯХ**

**HARMONIC COMPOSITION OF TRANSFORMER CURRENTS
WHEN IT IS TURNED ON AT IDLE AND DURING SHORT CIRCUITS**

К. И. Савицкий, Д. А. Степанов, М. Р. Хританьков, Д. С. Чурко

Научный руководитель – И. В. Новаш, к. т. н., профессор
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

K. Savitsky, D. Stepanov, M. Hritankov, D. Churko

Supervisor – Novash I., Candidate of Technical Sciences, Professor
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** проведен в математическом пакете MathCad гармонический анализ токов силового трехфазного трансформатора при его включении на холостой ход и при трехфазном замыкании на стороне низкого напряжения. Значения токов трансформатора в виде массивов мгновенных значений получены с помощью компьютерного программного комплекса для расчета режимов включения и замыканий силового трансформатора. Проведено сопоставление гармонического состава токов для разных режимов.*

***Annotation:** a harmonic analysis of the currents of a three-phase power transformer was carried out in the MathCad mathematical package when it was switched on at idle and with a three-phase short circuit on the low voltage side. Transformer current values in the form of arrays of instantaneous values are obtained using a computer software package for calculating the switching modes and short circuits of a power transformer. A comparison of the harmonic composition of currents for different modes is carried out.*

***Ключевые слова:** трансформатор, гармонический анализ, холостой ход, трехфазное замыкание, MathCad.*

***Keywords:** transformer, harmonic analysis, idling, three-phase short circuit, MathCad.*

Введение

Включение силового трехфазного трансформатора на холостой ход сопровождается так называемым броском тока намагничивания, который протекает по обмоткам высокого напряжения. Максимальное значение этого тока в первый период включения может достигать десятикратного значения тока холостого хода трансформатора. Через несколько периодов ток включения затухает и стремится к току холостого хода. За время затухания этот ток не причиняет вреда трансформатору, поэтому режим включения не является аварийным, и устройства релейной защиты трансформатора не должны его отключать.

Трехфазное замыкание на стороне низкого напряжения силового трансформатора также сопровождается многократным превышением токов, как на стороне низкого напряжения, так и на стороне высокого напряжения. При этом режим замыкания со сверхтоками может быть достаточно продолжительным, за время которого может произойти разрушение трансформатора. Поэтому режим трехфазного замыкания является аварийным и должен быть отключен релейной защитой трансформатора.

Таким образом, оба рассмотренных режима сопровождаются значительными превышениями токов трансформатора над их значениями в рабочих режимах. Однако в первом случае при включении трансформатора его защита не должна срабатывать и тем самым обеспечить нормальное его включение.

Микропроцессорные защиты силовых трансформаторов имеют блокировку от срабатывания при включении трансформатора на холостой ход. Эта блокировка выполняется по наличию в токах включения трансформатора второй гармоники, которая может составлять до 60 % от основной гармоники.

В работе проведен гармонический анализ токов включения и замыкания трансформатора и определено содержание второй гармоники в этих токах.

Основная часть

Расчет токов при включении и при трехфазном замыкании трансформатора проводился с помощью компьютерного программного комплекса **KZTRANS-2** [1], разработанного на кафедре «Электрические станции» БНТУ. Комплекс предназначен для расчета рабочих и аварийных режимов трехфазного двухобмоточного трансформатора. Результаты расчета режима включения представлены на рис. 1.

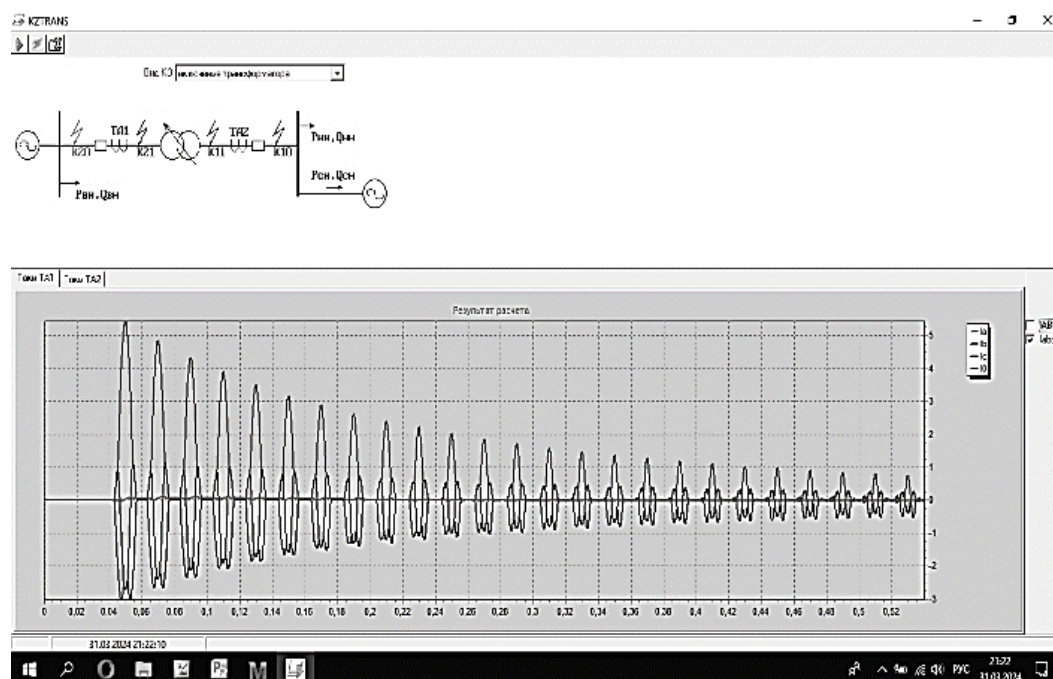


Рисунок 1 – Вторичные токи трансформатора тока ТА1 при включении трансформатора

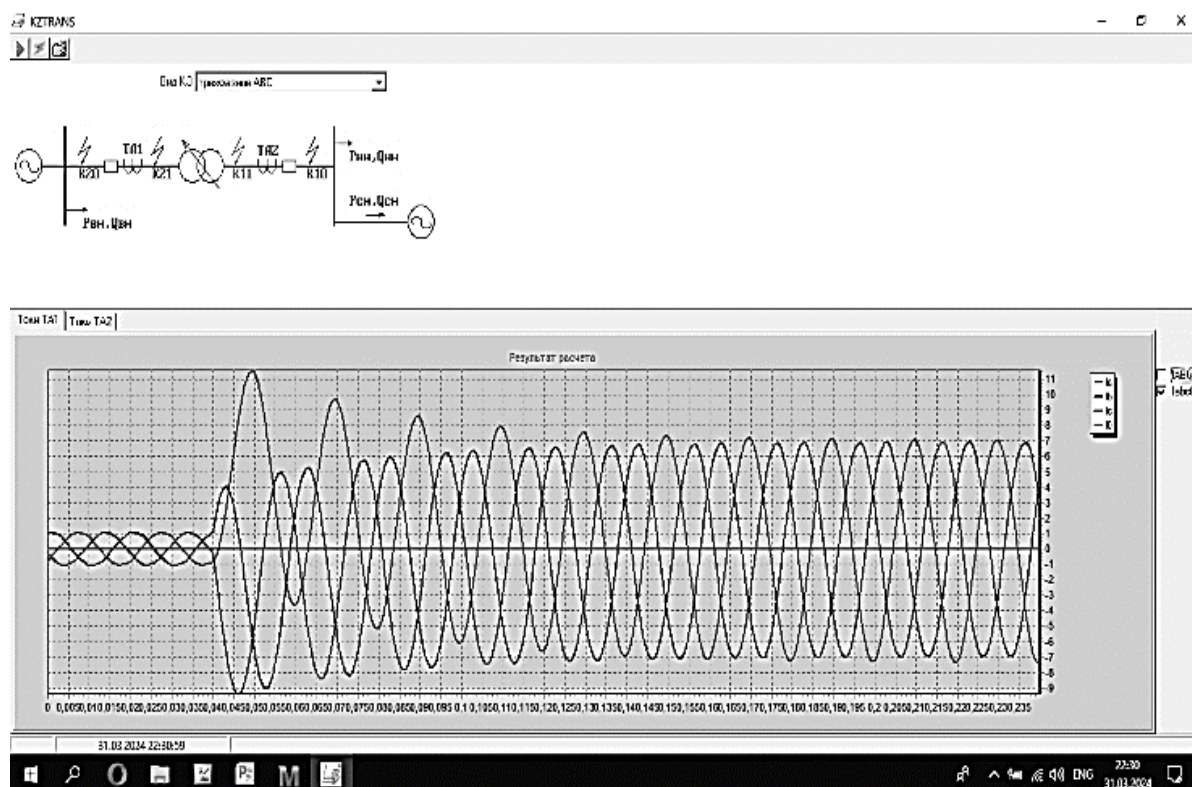


Рисунок 2 – Вторичные токи трансформатора тока ТА1 при замыкании на стороне низкого напряжения трансформатора

Результаты расчета режима трехфазного замыкания на стороне низкого напряжения представлены на рис. 2.

Численные мгновенные значения токов трансформатора при расчетах сохранялись во внешних файлах и использовались при проведении гармонического анализа в математическом пакете MathCad.

При гармоническом анализе использовались непрерывные функции фазных токов, получаемые аппроксимацией в MathCad точечных графиков расчетных токов трансформатора [2].

Этапы аппроксимации в MathCad точечных графиков расчетных токов трансформатора представлены на рис. 3 и 4.

Результаты гармонического анализа тока фазы *A* режима включения представлены на рис. 5. Результаты гармонического анализа тока фазы *A* режима трехфазного замыкания на стороне низкого напряжения представлены на рис. 6.

Сопоставление гармонического состава графиков токов фазы *A* при включении трансформатора и при трехфазном замыкании приведен на рис. 7. Расчеты показывают, что при включении трансформатора, вторая гармоника составляет порядка 37 % от основной (первой) гармоники. В случае трехфазного замыкания вторая гармоника составляет от основной менее 6 %.

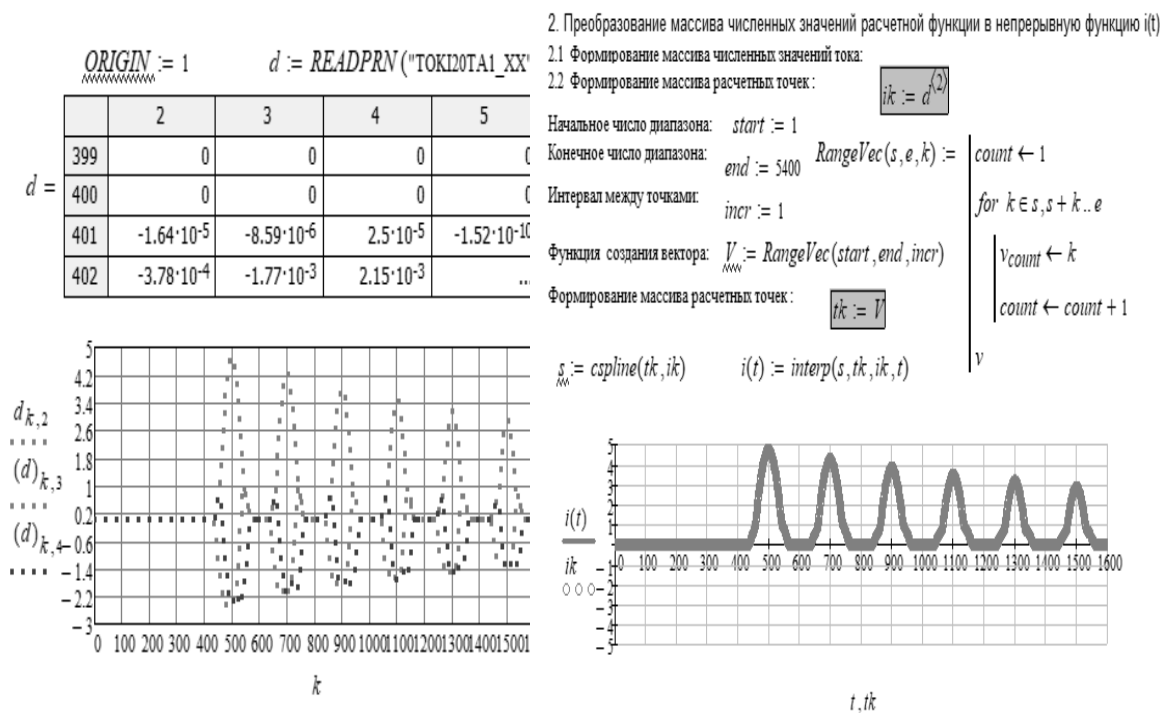


Рисунок 3 – Этапы аппроксимации точечного графика тока фазы А трансформатора при его включении

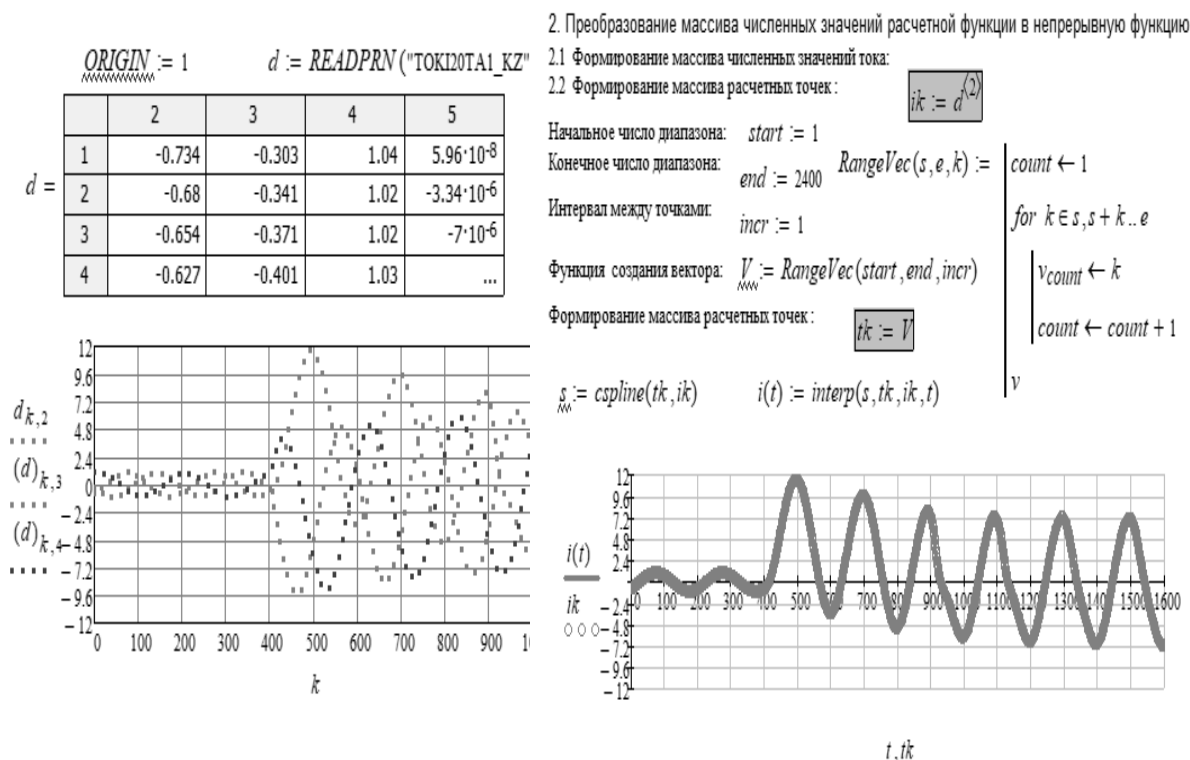


Рисунок 4 – Этапы аппроксимации точечного графика тока фазы А трансформатора при трехфазном замыкании



2. Гармонический анализ функции $i(t)$

$$t1 := 400 \quad t2 := 600 \quad T_{\text{анн}} := t2 - t1 = 200 \quad \omega := 2 \frac{\pi}{T} \quad j := \sqrt{-1}$$

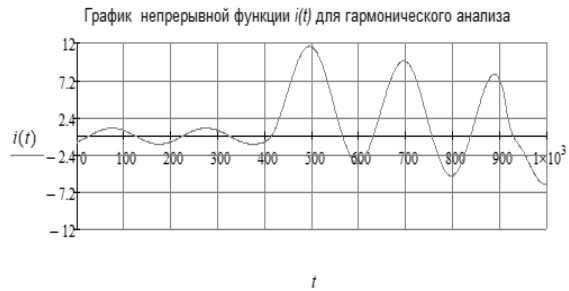
Постоянная составляющая: $I_0 := \frac{1}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) dt \quad I_0 = 1.58$

Гармонические составляющие до M-ой гармоники: $M := 10 \quad k := 1..M$

$$Sn_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t) dt \quad Cs_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) dt$$

$$I_k := Sn_k + j \cdot Cs_k$$

Рисунок 5 – Гармонический анализ тока фазы A режима включения трансформатора



2. Гармонический анализ функции $i(t)$

$$t1 := 420 \quad t2 := 620 \quad T_{\text{анн}} := t2 - t1 = 200 \quad \omega := 2 \frac{\pi}{T} \quad j := \sqrt{-1}$$

Постоянная составляющая: $I_0 := \frac{1}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) dt \quad I_0 = 4.415$

Гармонические составляющие до M-ой гармоники: $M := 10 \quad k := 1..M$

$$Sn_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t) dt \quad Cs_k := \frac{2}{T} \cdot \int_{t1}^{t2} i(t) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) dt$$

$$I_k := Sn_k + j \cdot Cs_k$$

Рисунок 6 – Гармонический анализ тока фазы A режима замыкания трансформатора



$ I_k $	$\arg(I_k)$	$\frac{ I_k \cdot 100}{ I_1 }$
1	1	1
2.346	-88.704	100
0.867	95.086	36.969
0.057	-45.261	2.428
0.084	-80.808	3.57
0.061	119.066	2.616
$5.594 \cdot 10^{-3}$	-96.574	0.238
0.06	-70.67	2.544
0.029	100.578	1.236
0.033	113.759	1.399
0.016	-65.257	0.675

$ I_k $	$\arg(I_k)$	$\frac{ I_k \cdot 100}{ I_1 }$
1	1	1
7.416	-78.748	100
0.422	-69.596	5.695
0.285	-101.595	3.846
0.2	-135.931	2.694
0.15	-173.982	2.016
0.124	145.926	1.669
0.11	110.227	1.487
0.099	74.412	1.332
0.085	38.826	1.14
0.076	1.918	1.022

Рисунок 7 – Сопоставление гармонического состава графиков токов фазы A при включении трансформатора и при трехфазном замыкании

Заключение

Проведен расчет токов силового трехфазного двухобмоточного трансформатора при его включении на холостой ход и при трехфазном замыкании на стороне низкого напряжения. Определен гармонический состав рассчитанных токов и определено процентное содержание в них второй гармоники. Результаты расчетов и гармонический анализ показывают, что процентное содержание второй гармоники в гармоническом составе токов включения трансформатора значительно превосходит содержание второй гармоники в гармоническом составе токов трехфазного замыкания.

Литература

1. Новаш, И. В. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев. – Минск : БНТУ, 2021. – 168 с.
2. Новаш, И. В., Гармонический анализ токов и напряжений, полученных в результате вычислительного эксперимента. / И. В. Новаш, А. А. Мазуренко, А. В. Куцыло // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2011. – № 2. – С. 11-13.

УДК 621.315.2

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ЭКРАНОВ
ОДНОФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО
ПОЛИЭТИЛЕНА**

**THE EFFICIENCY OF USING THE MATERIAL OF SCREENS OF
SINGLE-PHASE CABLES WITH CROSS-LINKED POLYETHYLENE
INSULATION**

М. Э. Высоцкий

Научный руководитель – М. А. Короткевич, д. т. н., профессор
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

M. Vysotski

Supervisor – M. Karatkevish, Doctor of technical sciences, Professor
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: *одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена изготавливаются с алюминиевой жилой и медным экраном. В статье рассматривается целесообразность применения вместо медного экрана алюминиевого с учетом пропускной способности, массы кабеля, стоимости материала экрана и потерь электроэнергии от индуцированных в экране токов.*

Abstract: *single-core cables with cross-linked polyethylene insulation are made with an aluminum core and a copper shield. The article considers the expediency of using an aluminum screen instead of a copper screen, taking into account the bandwidth, cable weight, cost of the screen material and power losses from currents induced in the screen.*

Ключевые слов: *одножильный кабель, медный экран, алюминиевый экран, потери электроэнергии.*

Keywords: *single-core cable, copper shield, aluminum shield, power loss.*

Введение

Одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена часто изготавливаются с алюминиевой жилой и медным экраном. Но целесообразность использования именно медного экрана неясна. Цель данной работы – оценить целесообразность замены медного экрана на алюминиевый. В данной статье проводятся расчеты для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ с площадью поперечного сечения жилы $S = 95 \dots 1000 \text{ мм}^2$ и экрана $S_s = 16 \dots 240 \text{ мм}^2$.

Основная часть

Выбранные площади поперечного сечения экранов силовых кабелей проверяются на термическую стойкость. Для сети с изолированной нейтралью расчетным является случай протекания тока двойного короткого замыкания разогреваемого экран от 80 до 350 °С. Тогда номинальное сечения медного экрана F определяется по выражению:

$$F = \frac{I_{кз}^{1,1} \cdot \sqrt{t}}{K}, \tag{1}$$

где $I_{кз}^{1,1} = 0,866 \cdot I_{кз}^3$ – ток двойного короткого замыкания, кА;

$I_{кз}^3$ – ток трехфазного короткого замыкания, кА;

t – продолжительность короткого замыкания, с;

K – коэффициент; для меди равный 0,174, для алюминия 0,114 [1].

В табл. 1 представлены значения минимального сечения по термической стойкости для меди и алюминия, округленные до сечений из номинального ряда.

Таблица 1 – Значения минимального сечения экрана по термической стойкости, мм²

Ток 3-фазного КЗ, кА	Продолжительность КЗ, с			
	0,5	1	1,5	2
2	16 / 16	16 / 16	16 / 25	16 / 25
4	16 / 25	25 / 35	25 / 50	35 / 50
6	25 / 35	35 / 50	50 / 70	50 / 70
8	35 / 50	50 / 70	50 / 95	70 / 95
10	50 / 70	70 / 95	70 / 95	95 / 120
12	50 / 70	70 / 95	95 / 120	95 / 150
14	50 / 95	95 / 120	95 / 150	120 / 185
16	70 / 95	95 / 150	120 / 150	120 / 185
18	70 / 120	95 / 150	120 / 185	150 / 240
20	95 / 120	120 / 185	150 / 240	150 / 240
22	95 / 120	120 / 185	150 / 240	185 / 240
24	95 / 150	150 / 185	150 / 240	185 / 300
26	95 / 150	150 / 240	185 / 300	185 / 300
28	120 / 185	150 / 240	185 / 300	240 / 400
30	120 / 185	185 / 240	185 / 300	240 / 400

* – в числителе при медном экране, в знаменателе при алюминиевом

Из табл. 1 имеем, что при изменении тока КЗ и его продолжительности, сечение алюминиевого экрана относительно медного больше на одну или две ступени из номинального ряда (начиная от тока трехфазного КЗ 2 кА и продолжительности КЗ 1 с). Это условие будет учтено при дальнейшем сравнении характеристик кабелей.

Влияние замены медного экрана алюминиевым на пропускную способность кабеля.

Расчеты показывают, что длительно допустимая токовая нагрузка жилы для разных сечений жил и экранов отличается не более чем на 1 %. Соответственно, этим критерием можно пренебречь [2–4].

Денежные затраты.

Изготовление кабеля с разным материалом экрана требует различное количество единоразовых капитальных затрат. Потери энергии в экранах кабелей можно привести к денежным единицам, затрачиваемым ежегодно. Таким образом, задачу сравнения данных вариантов можно решить с помощью метода приведенных затрат. Приведенные затраты Z на 1 километр кабельной линии будут равны:

$$Z = E \cdot K + I, \quad (2)$$

где E – коэффициент дисконтирования;

K – капитальные затраты на материал экрана кабеля,

I – ежегодные издержки, представляющие собой стоимость потерянной электроэнергии в экранах кабелей.

Оценим, как изменяться потери электроэнергии в кабеле, если использовать алюминиевый экран вместо медного.

Значения потерь энергии в жилах кабеля можно оценить методом времени наибольших потерь по формуле:

$$\Delta W = 3 \cdot I_{\text{нб}}^2 \cdot R_{\text{ж}} \cdot \tau_{\text{max}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{нб}}$ – наибольшая сила тока в жиле (примем 0,9 от длительно допустимого тока кабеля), А;

$R_{\text{ж}}$ – электрическое сопротивление жилы (при температуре жилы 90 °С) Ом/км;

τ_{max} – эквивалентное время максимальных потерь, для осветительно-бытовой нагрузки городов 2500 часов в год [5].

Тогда потери в экранах можно определить по формуле:

$$\Delta W_s = \Delta W \cdot \lambda, \quad (4)$$

где λ – отношение потерь мощности в экране к потерям в жилах кабеля.

Издержки на потери энергии в экранах кабелей вычислим по формуле:

$$I = \Delta W_s \cdot \beta, \quad (5)$$

где β – тариф на электроэнергию в электрической сети, примем 0,24 белорусских рубля.

В табл. 2 представлены средние численные значения соотношения издержек на потери электроэнергии при прокладке треугольником в экране из алюминия I_a к издержкам на потери в экране из меди I_m с учетом того, что сечение алюминиевого экрана S_a на одну или две ступени выше, чем медного S_m .

Таблица 2 – Отношение издержек на потери электроэнергии в экране из алюминия к издержкам на потери в экране из меди

S_a / S_m	16/25	25/35	35/50	50/70	70/95	95/120	120/150	150/185	185/240
I_a / I_m	0,95	0,84	0,86	0,84	0,81	0,76	0,76	0,77	0,81
S_a / S_m	16/35	25/50	35/70	50/95	70/120	95/150	120/185	150/240	
I_a / I_m	1,32	1,19	1,17	1,10	0,99	0,92	0,90	0,92	

Из данных табл. 2 можно увидеть, что при повышении сечения на одну ступень потери энергии в алюминии меньше, а при повешении на две ступени на некоторых сечениях ситуация меняется в обратную сторону.

Масса кабеля.

Сравним как изменится масса километра кабеля, если заменить экран из медных проволок на алюминиевые. Удельная масса меди $\gamma_m=8900$ кг/м³, алюминия $\gamma_a = 2700$ кг/м³ полиэтилена $\gamma_n = 950$ кг/м³.

Представим массу кабеля m_k в виде:

$$m_k = m_{ж} + m_{и} + m_{э} + m_{о}, \tag{6}$$

где $m_{ж}$ – масса жилы, кг;

$m_{и}$ – масса изоляции, кг;

$m_{э}$ – масса экрана, кг;

$m_{о}$ – масса оболочки, кг.

Подставляя численные значения для разных сечений, получим, если требуется увеличение площади поперечного сечения экрана на одну ступень, то переход с медных на алюминиевые проволоки уменьшает массу кабеля в среднем на 22 %, если на две ступени 14 %.

Стоимость металла для экрана кабеля.

Примем стоимость одного килограмма алюминиевой проволоки 9 руб./кг [6], медной 32 руб./кг [7]. В табл. 3 представлены значения массы и стоимость экранов кабелей площадью поперечного сечения $S_э=16..240$ мм² на 1 километр длины кабеля.

Таблица 3 – Масса и стоимость экрана на 1 километр длины кабеля

$S_э, \text{мм}^2$	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Масса Al, кг	43,2	67,5	94,5	135	189	256,5	324	405	499,5	648
Масса Cu, кг	142,4	222,5	311,5	445	623	845,5	1068	1335	1646,5	2136
Цена Al, руб	389	608	851	1215	1701	2309	2916	3645	4496	5832
Цена Cu, руб	1282	2003	2804	4005	5607	7610	9612	12015	14819	19224

Из табл. 3 можно заметить, что стоимость алюминиевого экрана даже с учетом увеличения площади поперечного сечения на одну и две ступени окажется ниже.

Из табл. 2 и 3 видно, что по отдельным затратам более целесообразно использования алюминиевого экрана. Однако в случаях, когда издержки в медном экране ниже, необходимо дополнительно проанализировать целесообразность его применения. Поскольку требуется сравнение двух

вариантов, где один из них имеет более высокие капитальные вложения, но более низкие затраты, мы можем сравнить их эффективность, определив срок окупаемости $T_{ок}$ по формуле:

$$T_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{I_2 - I_1}, \quad (7)$$

где K_1 – стоимость медного экрана, руб;

K_2 – стоимость алюминиевого экрана, руб;

I_1 – годовые затраты на потери энергии в алюминиевом экране, руб;

I_2 – годовые затраты на потери энергии в медном экране, руб;

Если срок окупаемости $T_{ок}$ окажется меньше нормативного срока окупаемости $T_{норм} = \frac{1}{E}$, то экономичнее окажется вариант с капитальными затратами K_1 . При ставке $E = 0,095$, $T_{норм} = 10,5$ лет.

В табл. 4 представлены численные значения срока окупаемости для кабелей, у которых издержки с алюминиевым экраном оказались выше, чем с медным. Ячейки, в которых срок окупаемости оказался выше нормативного, выделены полужирным начертанием (использование меди экономичнее).

Таблица 4 – Сроки окупаемости капиталовложений при замене медного экрана алюминиевым

$S, \text{мм}^2$	Срок окупаемости, лет, при сечениях экрана $S_a/S_m, \text{мм}^2$				
	16/35	25/50	35/70	50/95	70/120
95	7	14	14		
120	6	10,9	10,7	18	
150		9	9	15	116
185		7	7	12	116
240		6	6	10	102
300		5	5	9	337
400			4	7	

Заключение

Замена материала экрана одножильных кабелей с медного на алюминиевый при проверке на термическую устойчивость требует увеличить сечение на одну или две ступени из номинального ряда. Это приводит к следующим последствиям:

- длительно допустимая нагрузка жилы практически не изменяется;
- масса кабеля уменьшается при увеличении сечения экрана на одну ступень из номинального ряда в среднем на 22 % и при увеличении на две ступени на 14 %;
- приведенные затраты при применении экрана из алюминия могут быть как большими, так и меньшими по сравнению с медным экраном.

Таким образом, замена медного экрана на алюминиевый иногда может быть целесообразной для кабелей напряжением 10 кВ.

вариантов, где один из них имеет более высокие капитальные вложения, но более низкие затраты, мы можем сравнить их эффективность, определив срок окупаемости $T_{ок}$ по формуле:

$$T_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{I_2 - I_1}, \quad (7)$$

где K_1 – стоимость медного экрана, руб;

K_2 – стоимость алюминиевого экрана, руб;

I_1 – годовые затраты на потери энергии в алюминиевом экране, руб;

I_2 – годовые затраты на потери энергии в медном экране, руб;

Если срок окупаемости $T_{ок}$ окажется меньше нормативного срока окупаемости $T_{норм} = \frac{1}{E}$, то экономичнее окажется вариант с капитальными затратами K_1 . При ставке $E = 0,095$, $T_{норм} = 10,5$ лет.

В табл. 4 представлены численные значения срока окупаемости для кабелей, у которых издержки с алюминиевым экраном оказались выше, чем с медным. Ячейки, в которых срок окупаемости оказался выше нормативного, выделены полужирным начертанием (использование меди экономичнее).

Таблица 4 – Сроки окупаемости капиталовложений при замене медного экрана алюминиевым

$S, мм^2$	Срок окупаемости, лет, при сечениях экрана $S_a/S_m, мм^2$				
	16/35	25/50	35/70	50/95	70/120
95	7	14	14		
120	6	10,9	10,7	18	
150		9	9	15	116
185		7	7	12	116
240		6	6	10	102
300		5	5	9	337
400			4	7	

Заключение

Замена материала экрана одножильных кабелей с медного на алюминиевый при проверке на термическую устойчивость требует увеличить сечение на одну или две ступени из номинального ряда. Это приводит к следующим последствиям:

- длительно допустимая нагрузка жилы практически не изменяется;
- масса кабеля уменьшается при увеличении сечения экрана на одну ступень из номинального ряда в среднем на 22 % и при увеличении на две ступени на 14 %;
- приведенные затраты при применении экрана из алюминия могут быть как большими, так и меньшими по сравнению с медным экраном.

Таким образом, замена медного экрана на алюминиевый иногда может быть целесообразной для кабелей напряжением 10 кВ.

УДК 621.311

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ
ВОЗНИКНОВЕНИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**
**ANALYSIS OF CHANGES IN OPERATING PARAMETERS IN THE
EVENT OF ASYNCHRONOUS OPERATION IN THE POWER SYSTEM**

Р. С. Борисюк, К. Д. Короткевич, А. В. Никиперович
Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

R. Borisyuk, K. Korotkevich, A. Nikiperovich
Supervisor – A. Volkov, Senior Lecturer

***Аннотация:** рассмотрена тема возникновения асинхронного хода синхронного генератора при нарушении устойчивости электроэнергетической системы. Также проведена оценка параметров, характеризующих асинхронный режим.*

***Abstract:** the article discusses the topic of the occurrence of asynchronous running of a synchronous generator in case of a violation of the stability of the electric power system. An assessment of the parameters characterizing the asynchronous mode was also carried out.*

***Ключевые слова:** асинхронный ход, годограф, синхронный генератор, короткое замыкание, относительный угол ротора, устойчивость, скольжение.*

***Keywords:** asynchronous running, hodograph, synchronous generator, short circuit, relative rotor angle, stability, sliding.*

Введение

Асинхронный ход синхронного генератора при нарушении устойчивости электроэнергетической системы – это одна из серьезных проблем, которая может возникнуть в работе энергетических систем. Когда происходит нарушение устойчивости системы, синхронный генератор может потерять синхронизацию с сетью и начать работать на частотах, отличных от номинальных, что ведет к его асинхронному ходу.

Исследование асинхронного хода синхронного генератора при нарушении устойчивости электроэнергетической системы имеет большое практическое значение для обеспечения надежной работы электроэнергетических систем. Программа «Мустанг» является инструментом для анализа и моделирования электроэнергетических систем, позволяя проводить комплексный анализ работы синхронных генераторов при возможных нарушениях устойчивости. В данном исследовании мы рассмотрим асинхронный ход синхронного генератора, смоделированный в данной программе.

Основная часть

В качестве объекта моделирования выбрана электроэнергетическая система (ЭЭС), схема замещения которой представлена на рис. 1.

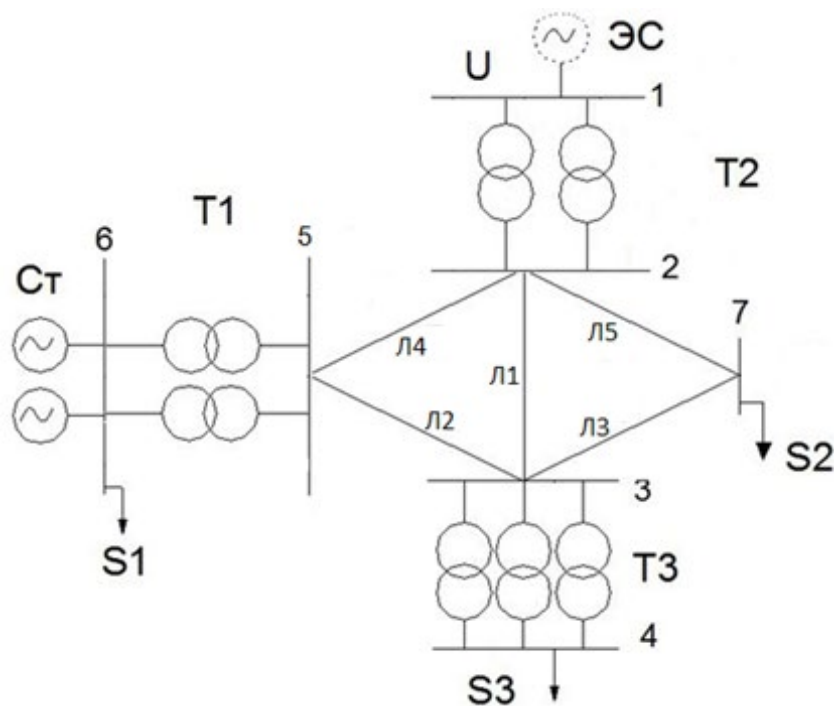


Рисунок 1 – Принципиальная схема замещения электрической системы

Исследовалась динамическая устойчивость при коротком замыкании (КЗ) на линии электропередачи вблизи шин электростанции (узел 5).

Рис. 2 показывает изменение скольжения от времени. До возникновения КЗ (t от 0 до 0,1 с) скольжение равно нулю, что характеризуется нормальным режимом работы синхронного генератора (СГ). При КЗ (t от 0,1 до 0,45 с) скорость вращения ротора стремительно возрастает, что ведет к росту скольжения. После отключения поврежденного участка, ротор генератора пытается затормозиться, что проявляется некоторым снижением значения скольжения. Однако при этом скорость ротора не успевает снизиться до синхронной, угол дельта становится больше критического, соответственно на генератор снова начинает действовать избыточный ускоряющий момент, скольжение увеличивается. СГ переходит в асинхронный режим (АР), что характеризуется значением скольжения отличным от нуля.

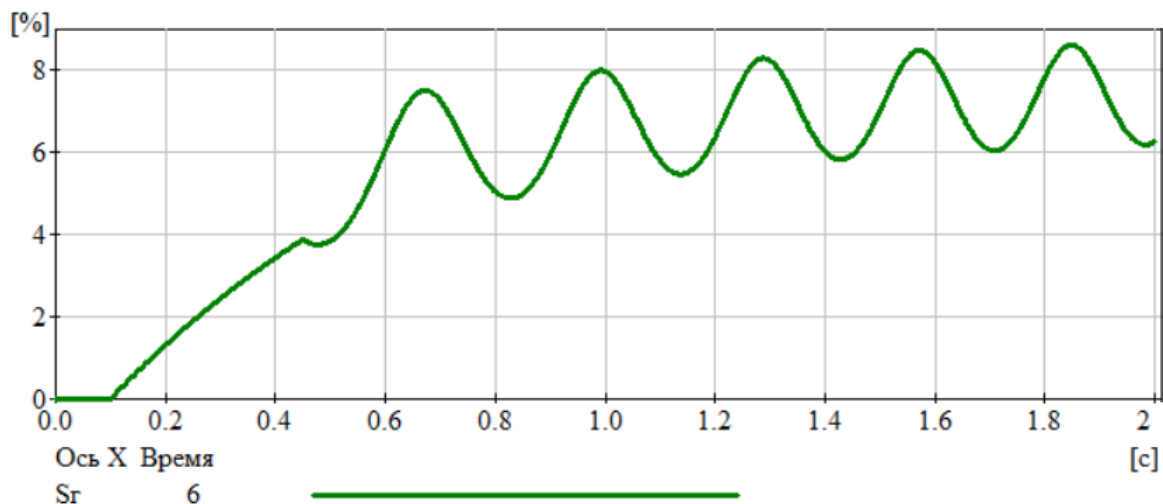


Рисунок 2 – Зависимость скольжения от времени при асинхронном ходе

Однако, данная величина колеблется около своего среднего значения, что объясняется несимметрией ротора СГ и изменением частоты вращения турбины под действием автоматических регуляторов скорости. Спроектированный график олицетворяет данное утверждение.

Рис. 3 отражает характер изменения мощности СГ. До КЗ мощность имеет постоянное значение. В момент КЗ активная мощность падает до нуля.

После срабатывания релейной защиты (РЗ) активная мощность периодически колеблется. График изменения активной мощности показывает, что за один период асинхронного хода знак активной мощности меняется дважды. Это означает, что генератор работает как синхронная машина в генераторном режиме в течение первой половины периода и как двигатель во второй половине. Средняя активная мощность генератора соответствует асинхронной составляющей. Качание асинхронной мощности происходит из-за того, что она пропорциональна скольжению. При определенных условиях генератор может работать только в режиме пульсации.

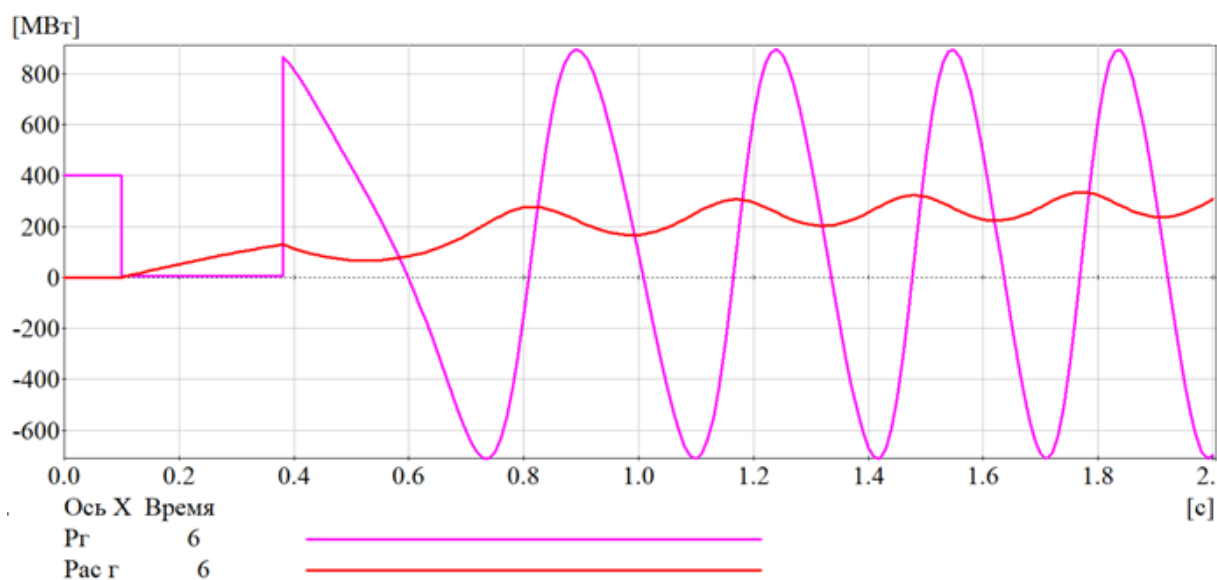


Рисунок 3 – Изменение активной полной и асинхронной мощностей СГ при АР

На рис. 4 изображено изменение относительного угла ротора при нарушении устойчивости электроэнергетической системы [1].

Угол между составляющими электродинамическими силами (ЭДС) генератора и энергосистемы до возникновения КЗ равен нулю и имеет постоянный характер, в соответствии с нормальным режимом работы генератора. В момент аварии угол начинает резко расти, т. к. растет скорость вращения ротора генератора. После отключения поврежденного участка дифференциал скорости изменения угла уменьшается до нуля и остается постоянным. Соответственно угол между несинхронными ЭДС периодически изменяется от 0 до 360 градусов.

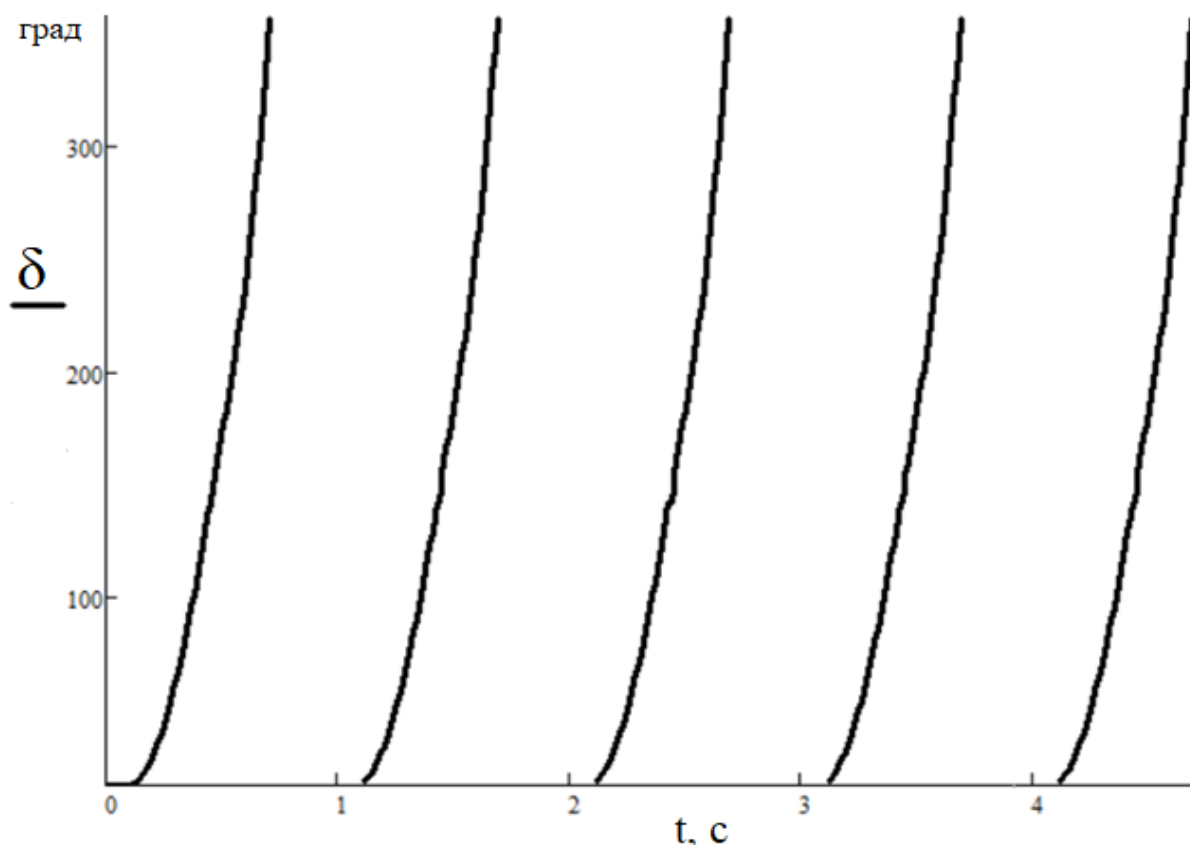


Рисунок 4 – Изменение относительного угла ротора при КЗ

В асинхронном режиме значение тока периодически изменяется (рис. 5), при этом его максимальное значение превышает токи нормального режима, что может представлять опасность для оборудования электрических сетей.

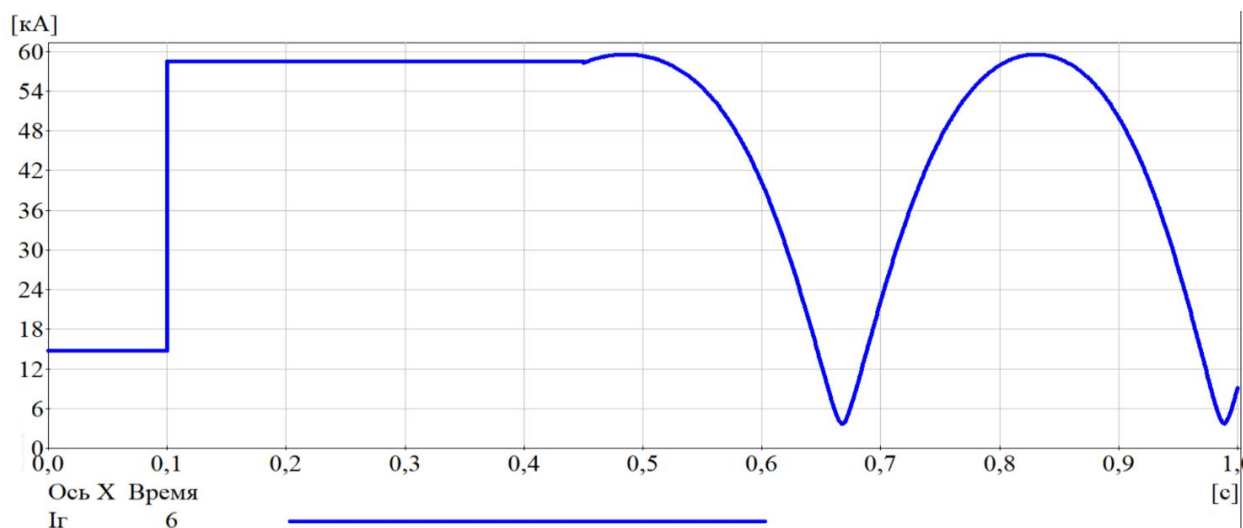


Рисунок 5 – Изменение тока при асинхронном режиме

Напряжение в различных точках сети изменяется от своего минимального до максимального значения (рис. 6). Минимум достигается при угле 180 градусов, максимум при угле 360 градусов. Глубина падения напряжения зависит от точки рассматриваемой сети [2].

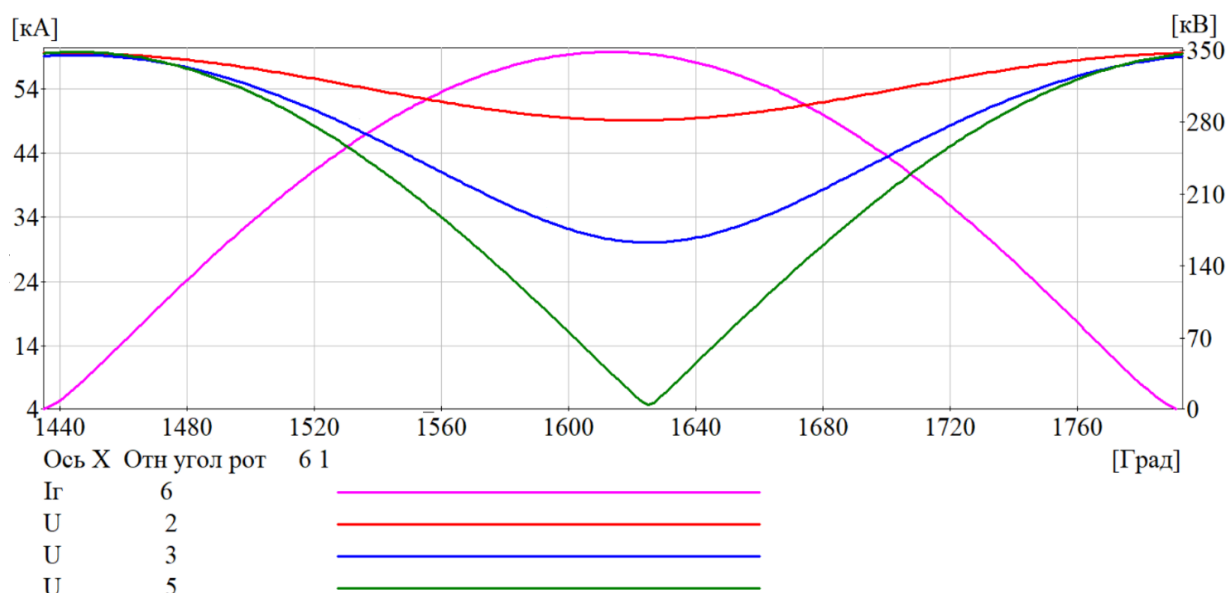


Рисунок 6 – График изменения напряжений и тока генератора от относительного угла ротора

При КЗ возрастает асинхронная мощность, что мы описали выше. Мощность турбины генератора остается постоянной при отсутствии автоматического регулятора скорости. Данное суждение отражает график, представленный на рис. 7. Точка пересечения отражает установление асинхронного режима.

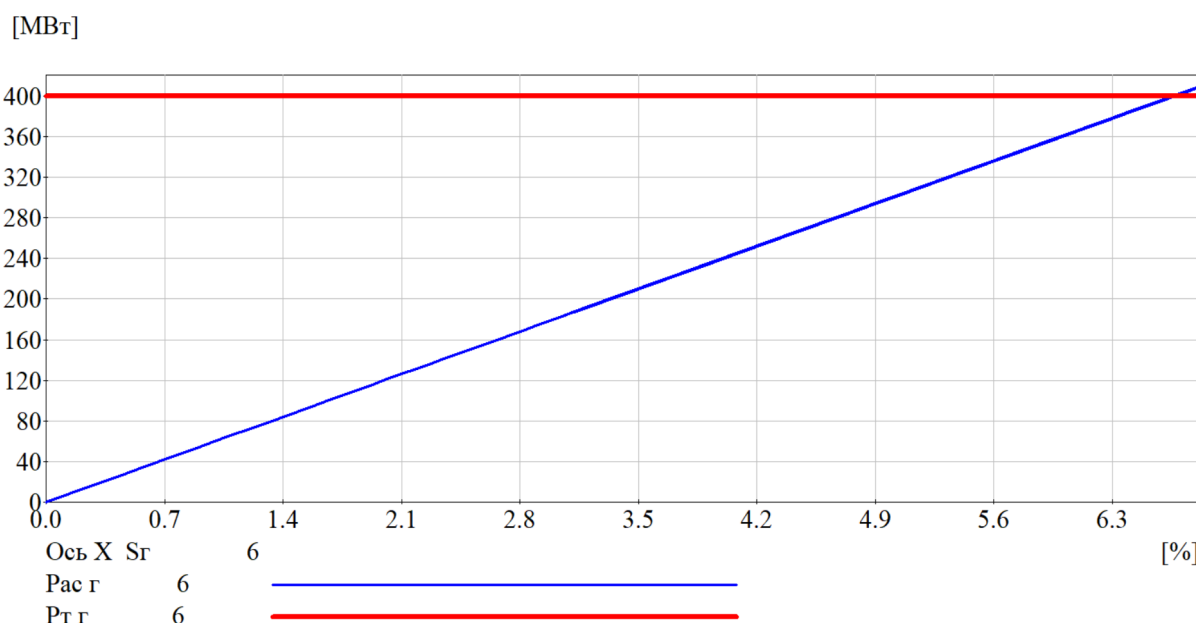


Рисунок 7 – График изменения асинхронной мощности и мощности турбогенератора от скольжения

Заключение

В ходе работы при помощи программы «Мустанг» была составлена модель ЭЭС и был произведен анализ изменения характеристик СГ при асинхронном ходе. Рассматривались режимные параметры до КЗ, в момент возмущения и после отключения поврежденного участка для случаев

сохранения и нарушения устойчивости. Характер изменения режимных параметров при асинхронном ходе отличается от режима КЗ и синхронных качаний, что позволяет выявить асинхронный режим.

Литература

1. Переходные процессы в системах электроснабжения : учебник для вузов / Г. Г. Пивняк [и др.]. – 3-е. изд.– Москва : Энергоатомиздат: Днепропетровск : НГУ, 2003. – 548 с.
2. Калентионок, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионок. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 376 с.
3. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. – 4-е. изд.– М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.

УДК 621.311

**СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ НУЛЕВОГО И ПЕРВОГО ПОРЯДКА
РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕЙЛОРА ФУНКЦИЙ НЕБАЛАНСА
COMPARISON OF ZERO-ORDER AND FIRST-ORDER TAYLOR
DECOMPOSITION METHODS FOR UNBALANCE FUNCTIONS**

К. С. Мордвинцев

Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

K. Mordvintsev

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** проведен анализ сходимости итерационных процессов для методов нулевого и первого порядка разложения Тейлора функций небаланса тока и мощности, используемых при моделировании УНН, при различных коэффициентах утяжеления и разном начальном приближении в среде Mathcad.*

***Abstract:** the convergence of iterative processes for the zero and first-order Taylor decomposition methods of current and power unbalance functions used in the modeling of UNN is analyzed for different weighting coefficients and different initial approximation in the Mathcad environment.*

***Ключевые слова:** решение систем нелинейных уравнений, итерационные процессы, сходимость.*

***Keywords:** solving systems of nonlinear equations, iterative processes, convergence.*

Введение

Основная и наиболее трудоемкая задача расчета параметров режима сети на ЭВМ – это решение систем нелинейных уравнений, которые описывают установившийся режим электрической сети. Данное решение можно найти путем последовательных приближений (итераций) по формуле $\underline{U}^{(k+1)} = \underline{U}^{(k)} + F(\underline{U}^{(k)})$ различными способами, количество которых определяется множеством способов реализации функции $F(\underline{U}^{(k)})$.

Разложение функции в ряд Тейлора:

$$\omega(U) \approx \omega(U^{(0)}) + \frac{d\omega(U^{(0)})}{dU} \Delta U + \dots = 0. \quad (1)$$

Методы нулевого порядка получаются из (1) путем использования только первого слагаемого. К данным методам можно отнести методы Z-матрицы, Якоби, Зейделя и другие. Если учитывать второе слагаемое из (1), то получим методы первого порядка: метод Ньютона и другие.

Записав для вышеперечисленных методов в среде Mathcad функции нахождения последующего приближения, можно задать итерационные процессы для нахождения решения.

При нормальном режиме работы сети нахождение решения каждым из методов возможно, но при разном количестве итераций. При расчете утяжеленного режима количество итераций может измениться, либо вовсе решение будет расходиться.

Нахождение параметров режима сети переменного напряжения сопряжено с использованием комплексных чисел, что может быть затруднительно для расчетов, особенно при использовании метода Ньютона. Поэтому иногда используют преобразование уравнений в прямоугольные и полярные координаты.

Основная часть

Зададим следующие функции для методов:

1. 1 группа:

- $W_a(x)$ – метод Якоби;
- $W_b(x)$ – метод Z -матрицы;
- $W_c(x)$ – метод Зейделя;
- $W_d(x)$ – метод Ньютона через небаланс тока;
- $W_e(x)$ – метод Ньютона через небаланс мощности;

2. 2 группа:

- $W_{Na}(x)$ – метод Ньютона через небаланс тока в прямоугольных координатах;
- $W_{Nb}(x)$ – метод Ньютона через небаланс тока в полярных координатах;
- $W_{Nc}(x)$ – метод Ньютона через небаланс мощности в прямоугольных координатах;
- $W_{Nd}(x)$ – метод Ньютона через небаланс мощности в полярных координатах.

Начальное приближение напряжения во всех узлах:

$$U_0 = (110 + 2,2i), \text{В}, \quad (2)$$

Мощности в узлах будут изменяться следующим образом:

$$S = S_0 \cdot ki, \quad (3)$$

где S_0 – начальная мощность потребителей.

Изменение начального напряжения в узлах:

$$U = U_0 \cdot ki, \quad ()$$

Тогда получим графики сходимостей, представленные на рис. 1.

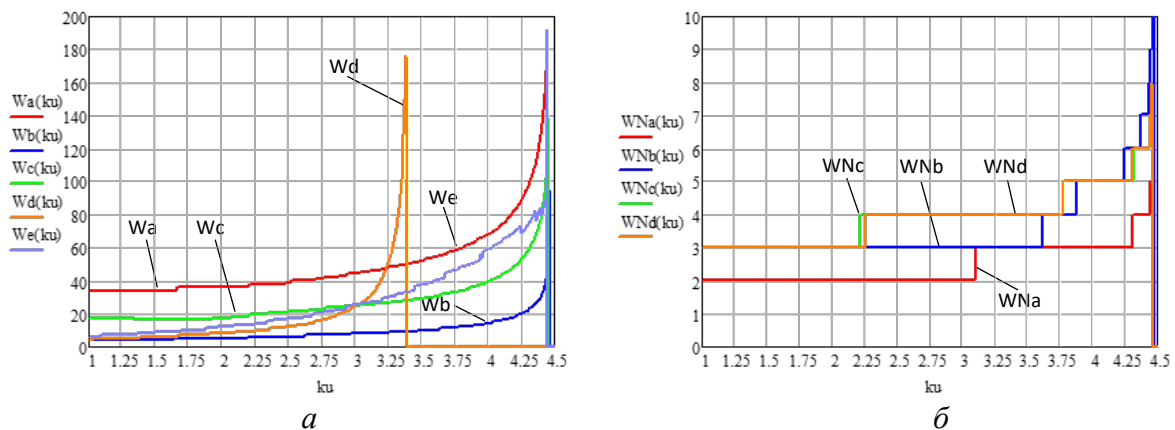


Рисунок 1 – Графики зависимости количества итераций от коэффициента утяжеления для группы 1 – а и группы 2 – б

Из рис. 1 видно, что самым быстрым методом оказался метод Ньютона через небаланс тока в прямоугольных координатах. Из методов нулевого порядка самым быстрым является метод Z-матрицы. Также стоит обратить внимание на сходимость метода Ньютона через небаланс тока и мощности при расчете в комплексных числах: при росте коэффициента утяжеления данный метод начинает проигрывать в количестве итераций методам нулевого порядка, что говорит о недопустимости использования метода Ньютона в данном случае. Это объясняется невозможностью нахождения частных производных для комплексно-сопряженных переменных.

Также на количество совершенных итераций влияет и начальное приближение напряжений в узлах сети. Используя те же функции, но задав изменение начального приближения, получим следующее:

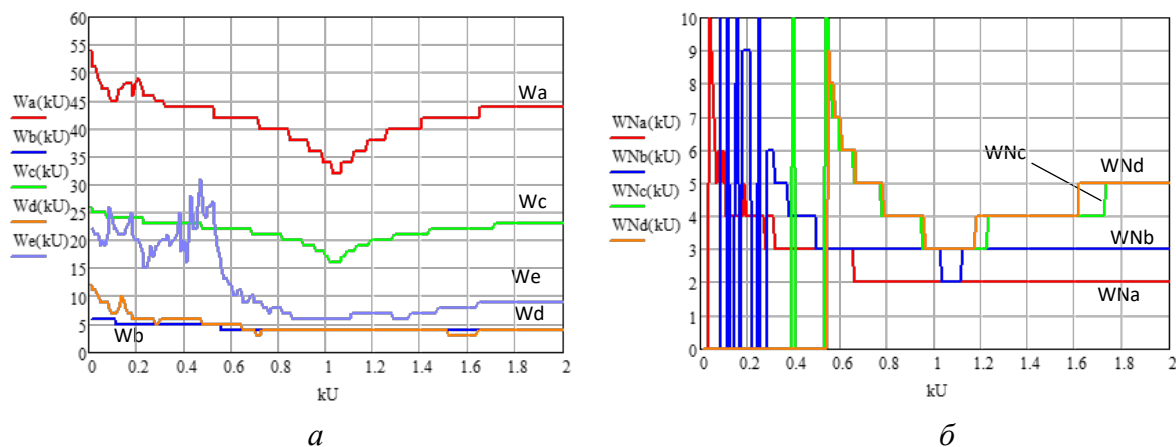


Рисунок 2 – Графики зависимости количества итераций от начального приближения напряжения в узлах для группы 1 – а и группы 2 – б

Из рис. 2 видно, что наиболее оптимальное начальное приближение напряжения в узлах (при средней загруженности сети) находится между номинальным напряжением сети и напряжением в балансирующем узле.

Заключение

Таким образом, в результате построения графиков зависимости количества итераций от различных параметров было получено, что самым оптимальным методом нахождения напряжения в узлах является метод Ньютона через небаланс тока в прямоугольных координатах, а оптимальное начальное приближение значений напряжения в узлах находится в промежутке между номинальным напряжением в сети и напряжением в балансирующем узле.

Использование наиболее оптимальных методов расчета напряжений позволяет быстрее находить решение, что при большом количестве расчетов заметно ускоряет весь процесс.

Литература

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин – 3-е изд., перераб. – М. : КНОРУС, 2012. – 648 с.
2. Аюев, Б. И. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин, В. Г. Неуймин; под ред. П. И. Бартоломея. – М. : Наука, 2008. – 256 с.

УДК 621.311

**САМОРАСКАЧИВАНИЕ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА
SELF-EXCITATION OF THE GENERATOR ROTOR**

А. С. Падрез

Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

A. Padrez

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** доклад посвящен важной теме самораскачивания ротора генератора. В нем рассматриваются ключевые факторы, влияющие на этот процесс, включая активное сопротивление цепи статора, нечувствительную зону и задержку действия устройства АРВ, а также последствия неправильной настройки устройства АРВ. Основательно было рассмотрено влияние активного сопротивления в статорной цепи.*

***Abstract:** the report is dedicated to the important topic of self-excitation of the generator rotor. It discusses the key factors influencing this process, including the active resistance of the stator circuit, the insensitive zone, and the delay in the operation of the automatic voltage regulation device, as well as the consequences of incorrect setting of the automatic voltage regulation device. The influence of active resistance in the stator circuit was thoroughly considered.*

***Ключевые слова:** самораскачивание, активное сопротивление цепи статора, демпфирующий коэффициент, нечувствительная зона, настройка устройства автоматической регулировки напряжения.*

***Keywords:** self-excitation, active resistance of the stator circuit, damping coefficient, insensitive zone, setting of the automatic voltage regulation device.*

Введение

Самораскачивание ротора генератора – это вид электромеханической неустойчивости, возникающей у генератора. В данном состоянии ротор, вращающийся с основной эксплуатационной скоростью, при некотором значении угла, начинает испытывать колебательные изменения скорости и угла. Эти колебания увеличиваются вплоть до того момента, когда ротор выпадает из синхронизма.

Самораскачивание может возникнуть по разным причинам. Вот три обобщенных фактора, которые могут способствовать этому явлению:

– большое активное сопротивление в статорной цепи: если в статорной цепи присутствует большое активное сопротивление, это может снизить демпфирование ротора и способствовать самораскачиванию;

- нечувствительная зона или задержка действия устройства автоматической регулировки возбуждения (АРВ): некорректная настройка или наличие зон, где АРВ не реагирует, может также вызвать самораскачивание;
- неправильная настройка устройства АРВ: если устройство АРВ настроено неправильно, оно может неэффективно контролировать напряжение, что повышает риск самораскачивания.

Основная часть

Для понимания влияния активного сопротивления в статорной цепи на самораскачивание ротора генератора используют уравнение движения ротора.

$$T_j \cdot \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\Delta\delta}{dt} = P_T - P_G. \tag{1}$$

В данном уравнении величина D является величиной демпферных коэффициентов, которая отражает совокупность влияние всех демпфирующих факторов, а величина данного коэффициента прямо пропорционально зависит от влияния демпфирующих факторов на машину. В ходе исследований, проведенных ранее было выяснено, что при увеличении активного сопротивления в статорной цепи демпферный коэффициент уменьшается. Данной обстоятельство непременно приведет к появлению самораскачивания ротора генератора и, как следствие, выходу генератора из синхронизма.

Для наглядной демонстрации данного факта воспользуемся программой для моделирования процессов в электроэнергетических системах Mustang. Зададимся произвольной электроэнергетической системой и в первый раз проведем расчеты для генератора с $D > 0$, а во второй зададимся отрицательным значением демпферного коэффициента. Исходные данные и результаты расчетов узлов, ветвей, параметры автоматики и генераторов представлены на рис. 1–4 соответственно.

Название	N	Код	Uстарт	Uрасч	dU	Pно	Qно	Uном	Nсxn	Uном	Pг	Qг
БУ	1	1100	115,00	115,00				115,00		110,00	-401,4	31,9
	2	11	330,00	346,48	3,4			330,00		330,00		
	3	11	330,00	345,15	4,8			330,00		330,00		
	4	11	10,50	10,29	0,9	105,00	85,00	10,50		10,00		
	5	11	330,00	347,53	6,0			330,00		330,00		
Ст	6	1010	15,75	15,75	8,6	90,00	70,00	15,75		15,75	400,0	59,4
	7	11	330,00	345,45	6,0	95,00	75,00	330,00		330,00		
Г	8	1010	20,00	20,00	10,8			20,00		20,00	300,0	23,9

Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название	R	X	G	B	Kт
БУ		2	1	T2	0,395	17,659	6,2	28,0	3,017
		2	3	Л1	5,320	45,220	2,8	-484,4	
		2	5	Л4	4,800	26,480	2,8	-270,4	
		2	7	Л5	4,560	38,760	2,4	-415,2	
		3	4	T3	2,890	74,868	2,8	20,6	31,428
Ст		5	3	Л2	2,400	25,600	1,2	-280,0	
		5	6	T1	0,428	17,659	6,2	28,0	22,027
Г		7	3	Л3	5,760	39,360	3,3	-409,2	
		7	8	T4	0,610	33,112	3,0	13,3	17,350

Рисунок 1 – Исходные данные и результаты по узлам и ветвям (начало)

Ni	Nj	Np	Название	Ui	Pij	Qij	Iij	Uj	Pji	Qji	Iji	dPн	dQн	dPобщ	dQобщ	Pкор/Pтрхх	Qr/Qтрхх	Kт
2	1	T2		346,5	402,7	-4,7	0,67	115,0	-401,4	31,9	2,02	0,53	23,82	1,28	27,19	0,75	3,37	3,017
2	3	Л1		346,5	-61,6	-10,8	0,10	345,1	62,1	-45,6	0,13	0,18	1,56	0,52	-56,37	0,34	-57,93	
2	5	Л4		346,5	-203,1	11,7	0,34	347,5	205,1	-34,9	0,35	1,68	9,28	2,02	-23,28	0,33	-32,56	
2	7	Л5		346,5	-138,1	3,8	0,23	345,5	139,1	-47,1	0,25	0,76	6,43	1,05	-43,26	0,29	-49,70	
3	4	Т3		345,1	105,8	100,5	0,24	10,3	-105,0	-85,0	7,58	0,51	13,21	0,82	15,51	0,31	2,30	31,428
5	3	Л2		347,5	103,8	6,9	0,17	345,1	-103,4	-38,0	0,18	0,23	2,40	0,37	-31,19	0,15	-33,59	
5	6	Т1		347,5	-308,9	28,1	0,52	15,8	310,0	-10,6	11,37	0,34	14,09	1,09	17,47	0,75	3,38	22,027
7	3	Л3		345,5	65,1	-30,5	0,12	345,1	-64,5	-16,9	0,11	0,20	1,40	0,59	-47,39	0,39	-48,79	
7	8	Т4		345,5	-299,2	2,6	0,50	20,0	300,0	23,9	8,69	0,46	24,87	0,82	26,46	0,36	1,59	17,350

Рисунок 2 – Исходные данные и результаты по узлам и ветвям (окончание)

	Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка	T1
T2	Действие	Ni	Nj	Nп	Парам1	Парам2
	Время				0,200	
	Шунт		2			0,001
0,050	Отключить связь		2	5		
0,050	Шунт		2			-0,001

Рисунок 3 – Исходные данные автоматики

	Название	N	Блок	Uгном	Pгном	COS(φ)	D	Mj/Tj	X'd
	БУ	1		110,00					0,419
	Ст	6		15,75	400	0,850	10,00	400,00	0,143
	Г	8		20,00	380	0,850	18,00	2100,00	0,398

Рисунок 4 – Исходные данные генераторов

После задания системы, автоматики и генераторов запустим расчет и снимем графики, полученные в результате расчета. Графики относительного сдвига угла ротора, а также мощность генератора представлены на рис. 5.

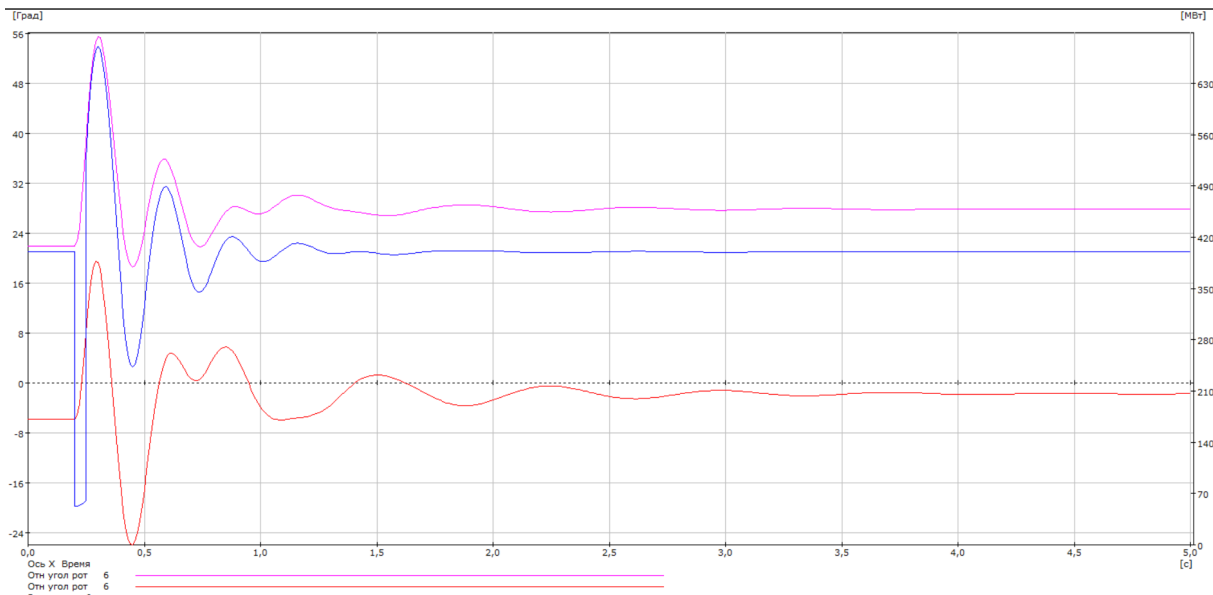


Рисунок 5 – Графики относительного сдвига угла ротора и мощности

Следующими этапом зададимся отрицательным значением D и сравним два полученных результата расчетов, после чего произведем анализ

полученных данных. Измененные параметры генераторов и результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Название	N	Блок	Uгном	Rгном	COS(φ)	D	Mj/Tj	X'd
БУ	1		110,00					0,419
Ст	6		15,75	400	0,850	10,00	400,00	0,143
Г	8		20,00	380	0,850	-2,00	2100,00	0,398

Рисунок 6 – Измененные данные генераторов

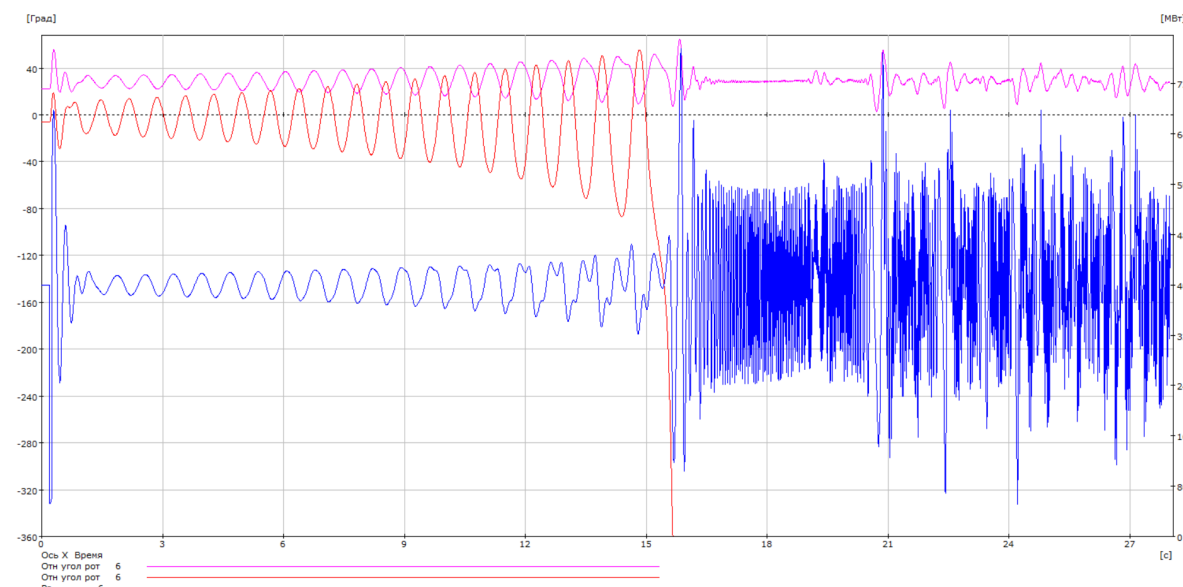


Рисунок 7 – График относительного угла ротора и мощности генератора

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при уменьшении D сохранение устойчивости становится невозможным, что может привести к нарушению функционирования всей системы. В связи с этим фактом недопустимо применение машин, имеющих демпферный коэффициент приближающийся к 0, равным 0 и тем более имеющий значение меньше 0.

Необходимо так же отметить, что современные системы АРВ при правильной настройке могут подавлять самораскачивание ротора генератора из-за большого активного сопротивления в статорных цепях. Так же следует помнить, что не все колебания АРВ способно подавить и необходимо учитывать данный факт.

Так же ранее было сказано, что самораскачивание возникает при наличии зоны нечувствительности и запаздывания сигналов в системе АРВ. Эта проблема является так же актуальной несмотря на то, что в современных машинах данная система практически не применяется и их рассмотрение представляет собой исключительно теоретический интерес. Когда система АРВ имеет зону нечувствительности, она может проявлять недостаточную реакцию на изменения в работе генератора в этой зоне. Это может привести к нежелательным колебаниям напряжения и токов в системе, особенно если генератор находится в режиме, где требуется чувствительное регулирование, например, при быстрых изменениях нагрузки. Запаздывание сигналов системы АРВ также может

сыграть свою роль в этом процессе. Если сигналы регулирования приходят слишком поздно, система может не успевать эффективно реагировать на изменения в работе генератора, что также может способствовать возникновению колебаний и нестабильности. Совместное воздействие зоны нечувствительности и запаздывания сигналов системы АРВ может привести к возникновению самораскачивания ротора генератора, что может вызвать нежелательные колебания напряжения и токов в системе, а также привести к ухудшению стабильности работы генератора.

При неправильной настройке устройства АРВ может произойти самораскачивание ротора генератора. Неправильная настройка может привести к тому, что АРВ будет реагировать неадекватно на изменения в работе генератора, например, при скачкообразных изменениях нагрузки. Это может вызвать нежелательные колебания напряжения и тока в системе. При неправильной настройке АРВ могут возникнуть резонансные условия, когда система начнет «перерегулироваться» в ответ на изменения, что приведет к колебаниям и нестабильности в работе генератора. Также это приведет к самораскачиванию ротора генератора, что вызовет увеличение амплитуды колебаний напряжения и тока, что в свою очередь может привести к сбою или аварии в работе генератора и системы в целом.

Заключение

Исходя из полученных данных можно прийти к выводу, что рассмотренные в докладе факторы играют значительную роль в процессе самораскачивания и существенно влияют на эффективность работы генератора и системы в целом. В ходе работы было рассмотрено влияние коэффициента демпфирования и сделан вывод о его влиянии на сохранение устойчивости генератора. Оптимизация этих параметров может привести к улучшению производительности и надежности генератора.

Однако, несмотря на проведенное исследование, остаются вопросы, требующие дальнейшего изучения. В частности, необходимо более глубокое понимание взаимосвязи между этими факторами и их влияния на процесс самораскачивания.

В целом, данное исследование представляет собой важный шаг в понимании процесса самораскачивания ротора генератора и может служить основой для дальнейших исследований в этой области.

Литература

1. Гуревич, Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. М. : Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
2. Калентионюк, Е. В. Основы противоаварийного управления в энергосистемах : учебное пособие / Е. В. Калентионюк, Ю. Д. Филипчик. – Минск : Техноперспектива, 2018. – 49 с.
3. Хрущев, Ю. В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах / Ю. В. Хрущев, К. И. Заповодников, А. Ю. Юшков. – Томск : Томский политехнический университет, 2012. – 160 с.

УДК 621.311

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПРЕДПРИЯТИЯ «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
ЗАВОД»****INVESTIGATION OF THE RELIABILITY OF TRANSFORMERS OF
THE «BELARUSIAN STEEL WORKS»**

Д. В. Телица, С. Ю. Паншин

Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

D. Tselitsa, S. Panshyn

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** на сегодняшний день вопрос надежности оборудования стоит достаточно остро, т. к. от этого зависит стабильность и соблюдение технологических режимов различных производств. Расчеты позволяют выявить наиболее уязвимые места и режимы, в случае нештатных ситуаций, а также спрогнозировать предпринимаемые меры по сохранению оборудования в работе и исключить его повреждение.*

***Abstract:** to date, the issue of equipment reliability is quite acute, because stability and compliance with technological regimes of various industries depend on it. Calculations make it possible to identify the most vulnerable places and modes in case of emergency situations, as well as predict the measures taken to keep the equipment in operation and eliminate damage to it.*

***Ключевые слова:** надежность, трансформатор, БМЗ.*

***Keywords:** reliability, transformer, BSW.*

Введение

Белорусский металлургический завод (далее – БМЗ) является одним из флагманов белорусской промышленности. На сегодняшний день на БМЗ функционируют 2 электросталеплавильных цеха, которые оборудованы тремя современными дуговыми электропечами с потребляемой мощностью 60 МВт каждая.

Для соблюдения технологического процесса производства необходимо достижение огромных температур при помощи дуговых электропечей. Соответственно, для достижения температур необходима большая активная мощность, потребляемая из энергосистемы. Особенность скрывается в графиках нагрузки, т. к. при включении печей происходит резкий скачок нагрузки на оборудование (до 200 МВт) и такой же резкий сброс при отключении печей. Предприятие работает круглосуточно, поэтому данная ситуация с энергопотреблением сохраняется постоянно. Это создает определенные сложности для работы энергосистемы, т. к. в разные годовые периоды, в зависимости от суммарной нагрузки и генерации ОЭС Беларуси, нагрузка

БМЗ может достигать до 3–5 % от суммарной по стране, что делает его самым крупным потребителем электроэнергии.

Основная часть

Расчет надежности проведем на примере трансформаторов подстанции Жлобин-330 (рис. 1), на которой установлены 2 трансформатора АТДЦТН-125000/330/110 при помощи программы TOPAS. Необходимо также составить расчетную схему (рис. 2) и пронумеровать ее элементы в соответствии с программой [1].

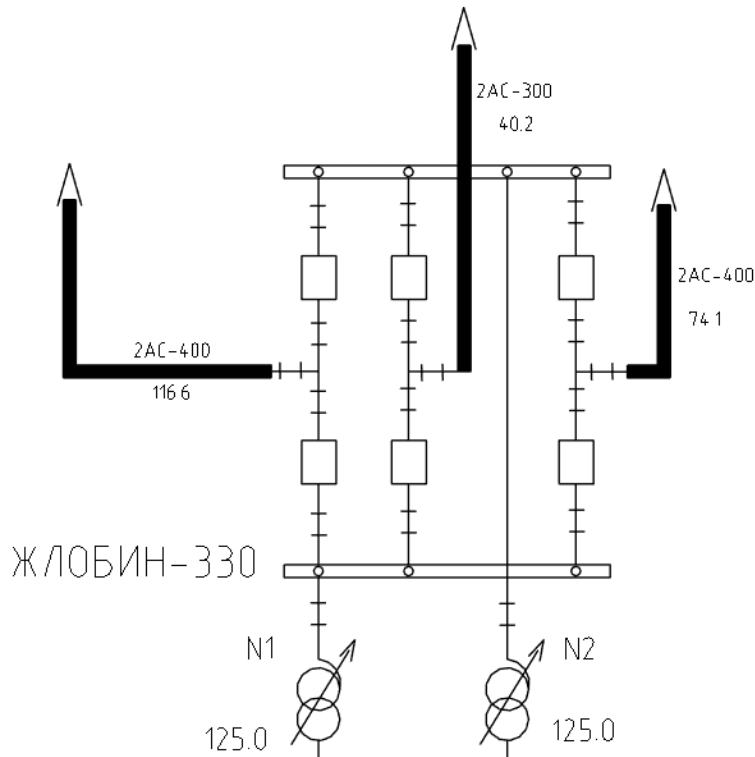


Рисунок 1 – Схема ПС «Жлобин – 330»

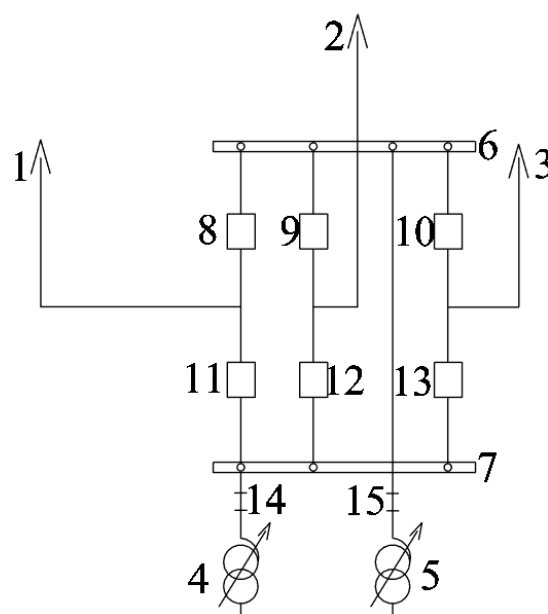


Рисунок 2 – Расчетная схема ПС «Жлобин – 330»:
1,2,3 – линии; 4,5, – автотрансформаторы; 6,7 – сборные шины

Далее необходимо составить матрицу связей узлов с ветвями. При составлении будем следовать логике, согласно которой каждой ветви расчетной схемы ставятся в соответствие два примыкающих к ней узла в порядке увеличения их номеров (табл.1).

Таблица 1 – Матрица связей узлов с ветвями

Номер КА	8	9	10	11	12	13	14	15
1-й узел	1	2	3	1	2	3	4	5
2-й узел	6	6	6	7	7	7	7	6

Для расчета надежности в программном комплексе TOPAS необходимо задаться исходными данными по каждой группе элементов. Показатели надежности автотрансформаторов были получены по запросу от предприятия (табл. 2)

Таблица 2 – Показатели надежности оборудования

Элементы схемы	Частота от-каза 1/год	Время п-авар восст., ч	Частота план-го рем-та, ч	Длител. план-го рем-та, ч
Линия 330 кВ дли-ной 116,6 км	0,10494	4,9	0,3	14,1
Линия 330 кВ дли-ной 40,2 км	0,03618	4,9	0,3	14,1
Линия 330 кВ дли-ной 74,1 км	0,06669	4,9	0,3	14,1
Сборные шины 330кВ	0,00395	0,5	0,5	9
Автотрансформа-торы	0,04	45	0,5	9,5
Выключатели	0,02	48	0,2	90

Используя исходные данные получим результат расчета надежности схемы по отключаемым автотрансформаторам и их количеству (табл. 3).

Таблица 3 – Результат расчета надежности

Код аварии	Суммарная частота, 1/год	Среднее время восст. , ч
2АТ 3Л	0,0288	16,22
1АТ 1Л	0,486	21,6

Коэффициент неготовности вычисляется по формуле 1 [2]:

$$K_{\text{н}} = \frac{T(k)\lambda}{8760},$$

Отключены 1АТ 1Л:

$$K_{\text{н}} = \frac{T(k)\lambda}{8760} = \frac{0,486 \cdot 21,6}{8760} = 13,65 \cdot 10^{-4}$$

Отключены 2АТ 3Л:

$$K_{\text{н}} = \frac{T(k)\lambda}{8760} = \frac{0,0288 \cdot 16,22}{8760} = 53,33 \cdot 10^{-6}$$

Заключение

Выполнив расчеты, можем сделать несколько выводов. Вероятность отключения всех трансформаторов и питающих линий, т. е. погашения подстанции, довольно большая, по сравнению с трансформаторными подстанциями, которые имеют более равномерную и постоянную нагрузку без резких изменений. Это обусловлено специфическим графиком нагрузки предприятия. На данный момент существуют различные методы по повышению надежности оборудования, такие как меры по усилению охлаждения автотрансформаторов, внедрение актуальных методов контроля изоляции, снижение времени восстановления после аварий и др.

Помимо вопросов надежности оборудования при таких графиках нагрузки, стоит обратить внимание и на вопрос сохранения устойчивости, а также функционирования предприятия в целом при «развале» энергосистемы на части, в случае потери генерации или аварийных отключениях системных ЛЭП. На этот случай на предприятии установлены собственные генераторные мощности и устройства автоматического ввода резерва [3].

Белорусский металлургический завод – это большое и сложное, с инженерной точки зрения, предприятие, функционирование которого напрямую влияет на все сферы деятельности государства от энергетики до экономики. В связи с тем, что это самый большой и главный потребитель электрической энергии в Беларуси, за ним требуется постоянный контроль, во избежание его остановки.

Литература

1. Волков, Н. Г. Исследование надежности систем электроснабжения предприятий : методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Надежность электроснабжения» для студентов V курса, обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение» направления 140200 «Электроэнергетика» / Н. Г. Волков, А. А. Сивков. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 23 с.
2. Шеметов, А. Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение». – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. – 138 с.
3. Старжинский, А. Л. Определение показателей надежности схем электрических соединений подстанций / А. Л. Старжинский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Десятой международной научно-технической конференции : в 4 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калининиченко. – Минск : БНТУ, 2012. – Т. 1 – С. 32.

УДК 621.315

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ КЭС 1200 МВт
INVESTIGATION OF THE RELIABILITY OF THE ELECTRICAL
CONNECTION SCHEME OF THE 1200 MW CPP**

И. Н. Адамович, К. Д. Сырцов, И. С. Вабищевич
Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь
I. Adamovich, K. Sirtsov, I. Vabishevich
Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в работе была исследована надежность схемы электрических соединений конденсационной электростанции мощностью 1200 МВт при помощи программы «ТОПАС», а также проанализированы результаты и сделаны выводы.*

***Abstract:** the paper examines the reliability of the electrical connection scheme of a 1200 MW condensing power plant using the TOPAS program and includes results analysis and conclusions.*

***Ключевые слова:** конденсационная электростанция, распределительное устройство, коэффициент неготовности, частота отказов, надежность, ТОПАС.*

***Keywords:** condensing power plant, switchgear, unavailability factor, failure rate, reliability, TOPAS.*

Введение

Надежность – способность системы энергоснабжения или оборудования работать без сбоев и обеспечивать непрерывное и стабильное обслуживание потребителей. Надежность в энергетике является критически важным аспектом для обеспечения устойчивости и эффективности работы всей инфраструктуры энергетической отрасли.

Исследование надежности и ее влияния на работу систем электроснабжения является важной частью не только учебного, но и рабочего процессов. Вероятность развития разных сценариев с различными последствиями требует постоянного мониторинга и контроля надежности в энергосистеме, ведь в конечном итоге это влияет на качество электроснабжения. Аварийные и внезапные перерывы электроснабжения потребителей могут иметь последствия в виде ущерба, обусловленного поломкой оборудования, порчей сырья и материалов, затратами на ремонты, недовыпуском продукции, простоями технологического оборудования и рабочей силы.

Кроме того, на этапе проектирования электростанции надежность является одним из ключевых аспектов, который необходимо учитывать для обеспечения безопасной и эффективной работы энергетической системы.

Важно предусмотреть различные меры и технические решения, которые обеспечат надежную работу электростанции в различных условиях эксплуатации.

Расчет показателей надежности схемы электрических соединений производится на основе определения количества комбинаций событий $C(n)$, приводящих к отказу ее функционирования k -го вида:

$$C(n) = \sum_i \sum_j \sum_s L(n), \tag{1}$$

где $L(n)$ – логическая функция, принимающая значение 0 или 1.

Определение частот отказов функционирования n -го вида $\lambda(n)$ и длительностей аварийного восстановления $T(n)$ в общем случае осуществляется по следующим выражениям:

$$\lambda(n) = \sum_j \sum_i q(j)\lambda(i)Q(s/i)L(n); \tag{2}$$

$$T(n) = \frac{1}{\lambda(n)} \sum_j \sum_i q(j)\lambda(i) \min \left\{ \frac{t(j)}{2}; t(i); t_{0.п.} \right\} Q(s/i)L(n), \tag{3}$$

где $q(j)$ – относительная длительность j -го ремонтного режима (о.е.);

$\lambda(i)$ – частота повреждения i -го элемента схемы (1/год);

$t(i)$ – длительность послеаварийного восстановления i -го элемента схемы (ч);

$t(j)$ – длительность j -го ремонтного режима работы схемы;

$t_{0.п.}$ – время оперативных переключений (ч);

$Q(s/i)$ – вероятность отказа в срабатывании s -го устройства РЗ или КА.

Основная часть

Для исследования выберем схему, изображенную на рис. 1.

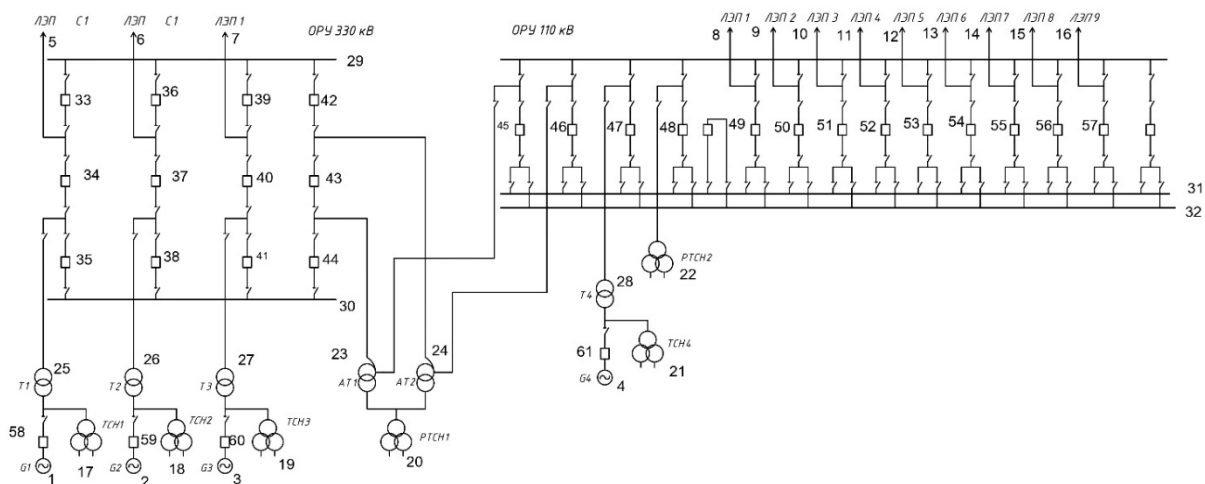


Рисунок 1 – Схема КЭС с пронумерованными элементами

Главная схема электрической станции включает в себя ОРУ 330 кВ, выполненное по схеме 3/2 с тремя отходящими на нагрузку линиями, а также ОРУ 110 кВ по схеме с двумя рабочими шинами и одной обходной с девятью линиями, связанные между собой автотрансформаторами связи мощность

400 МВА. Питание осуществляется от 4-х генераторов мощностью по 300 МВт, подключенных к ОРУ по блочным схемам. Кроме того, в схеме присутствует четыре трансформатора собственных нужд и два РТСН, питающихся от ОРУ 110 кВ и обмоток низшего напряжения трансформаторов связи.

Задача расчета состоит в исследовании выбранных схем ОРУ и схем подключения элементов схемы на совокупную надежность электроснабжения. Расчет данной схемы вручную является весьма трудоемкой задачей, поэтому прибегнем к использованию специального программного обеспечения.

С помощью программного комплекса TOPAS можно производить исследование надежности сложных электрических схем с большим количеством присоединений, в число которых входят ЛЭП, генераторные и трансформаторные присоединения, присоединения ТСН, а также РУ различных классов напряжения.

Составим исходные данные для программы и пронумеруем последовательно элементы в следующем порядке (рис. 1):

- генераторы мощности;
- линии электропередач;
- автотрансформаторы связи;
- блочные трансформаторы;
- сборные шины и ошиновка;
- выключатели.

Данные по надежности элементов возьмем из электротехнического справочника [1].

Таблица 1 – Исходные данные

№	Элементы схемы	Параметр потока отказов ω , 1/год	Среднее время восстановления T_B , ч.	Частота планового ремонта μ_r , 1/год	Продолжительность планового ремонта T_p , ч.	Вероятность отказа при отключении КЗ	Вероятность отказов основных комплектов РЗ при КЗ
1	2	3	4	5	6	7	8
1–4	Генераторы 300 МВт	0,59	83	1,0	880	–	0,001
5–7	Нагрузка (ЛЭП 330 кВ – 100 км)	0,3	15,3	2,9	20	–	0,001
8–16	Нагрузка (ЛЭП 110 кВ – 100 км)	0,66	11	1,6	15,5	–	0,001
17–21	ТСН 10 кВ (10–80 МВА)	0,012	70	0,75	26	–	0,001
22	ТСН 110 кВ (10–80 МВА)	0,014	70	0,75	28	–	0,001

Окончание таблицы 1.

23–24	АТ связи	0,053	45	1,0	30	–	0,001
25–27	Блочные трансформаторы	0,053	45	1,0	30	–	0,001
28	Блочный трансформатор	0,075	95	1,0	30	–	0,001
29–30	Сборные шины 330 кВ (по 3 присоединения)	0,013	5	0,498	9	–	0,001
31–32	Сборные шины 110 кВ (по 15 присоединений)	0,016	5	2,49	60	–	0,001
33–44	Элегазовые выключатели 330 кВ	0,03	60	0,2	113	0,002	–
45–57	Элегазовые выключатели 110 кВ	0,02	20	0,2	45	0,004	–
58–61	Элегазовые выключатели 20 кВ	0,04	20	0,2	40	0,013	–

По исходным данным произведем расчет надежности системы. Реализованная в программе TOPAS модель позволяет вычислить длительности T и частоты Λ отключения потребителей в нормальном режиме и режимах аварийного простоя электрооборудования систем рабочего и резервного электроснабжения. Сведем полученные в результате расчета значения в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета режимов

Код аварии	Суммарная частота Λ , 1/год	Среднее время восстановления T , ч.	Коэффициент неготовности K_H , о. е.
1Г	3,24	72,94	0,027
1Г 4Л	$1,08 \cdot 10^{-1}$	28,61	$3,53 \cdot 10^{-4}$
2Г 6Л	$1,17 \cdot 10^{-3}$	13,17	$1,76 \cdot 10^{-6}$
2Г 10Л	$2,61 \cdot 10^{-4}$	0,5	$1,49 \cdot 10^{-8}$
3Г 6Л	$3,37 \cdot 10^{-6}$	0,5	$1,92 \cdot 10^{-10}$
4Г 12Л	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,5	$8,56 \cdot 10^{-11}$

По известным значениям Λ и T рассчитаем коэффициенты неготовности по выражению [2]:

$$K_H = \frac{T \cdot \Lambda}{8760}, \quad (4)$$

где K_H – вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в данный момент времени (т. е. коэффициент неготовности).

Отключен 1Г:

$$K_H = \frac{3,24 \cdot 72,94}{8760} = 0,027.$$

Отключены 1Г 4Л:

$$K_H = \frac{1,08 \cdot 10^{-1} \cdot 28,61}{8760} = 3,53 \cdot 10^{-4}.$$

Отключены 2Г 6Л:

$$K_H = \frac{1,17 \cdot 10^{-3} \cdot 13,17}{8760} = 1,76 \cdot 10^{-6}.$$

Отключены 2Г 10Л:

$$K_H = \frac{2,61 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5}{8760} = 1,49 \cdot 10^{-8}.$$

Отключены 3Г 6Л:

$$K_H = \frac{3,37 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{8760} = 1,92 \cdot 10^{-10}.$$

Отключены 4Г 12Л:

$$K_H = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{8760} = 8,56 \cdot 10^{-11}.$$

Полученные результаты показаны в табл. 2. Чем больше количество поврежденных элементов, тем меньше коэффициент неготовности.

Заключение

Как видно из полученных результатов, вероятность того, что произойдет отказ работы всей схемы (то есть при отключении всех четырех генераторов и двенадцати линий) очень мала ($K_H = 8,56 \cdot 10^{-11}$). Следовательно, можно заключить, что рассматриваемая схема станции является достаточно надежной и ее можно использовать для дальнейшего проектирования электрической станции.

Литература

1. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике : Учеб. пособие для вузов / Ю. Б. Гук – М. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 208 с.
2. Черновец, А. К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец. – Спб. : Санкт-Петербург. государственный университет, 1992. – 89 с.

УДК 621.039

ЯДЕРНЫЕ БАТАРЕИ NUCLEAR BATTERIES

К. В. Макаренкова, П. В. Зайцев, А. М. Колбасич
Научный руководитель – С. В. Константинова, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

K. Makarenkova, P. Zajcev, A. Kolbasitch
Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматривается новое направление развития ядерной энергетики – ядерные батареи, работа которых основана на радиоактивном распаде.*

***Abstract:** this article discusses a new direction in the development of nuclear energy – nuclear batteries, the operation of which is based on radioactive decay.*

***Ключевые слова:** ядерная энергия, ядерная батарея, ядерные отходы, радиоактивный распад, модульная конструкция, электрический ток.*

***Keywords:** nuclear energy, nuclear battery, nuclear waste, radioactive decay, modular design, electric current.*

Введение

Изучение ядерной энергетики дает человечеству возможность получения огромных объемов энергии. В настоящее время ставится задача миниатюризации размеров ядерных установок, обеспечение безопасной их эксплуатации, расширения их сферы использования.

Активно ведутся работы над новыми видами батарей, которые работают на ядерных отходах, срок действия которых намного дольше, чем у литий-ионных. Такая концепция получения электроэнергии не является новой. Ученые исследуют превращение радиоактивных веществ в электрический ток с начала 20 века. Уже в 1970-х годах в кардиостимуляторах применялись бета-вольтаические батареи, в них изотопы стронция выдают малые электрические токи. Мощность, вырабатываемая Бета-вольтаическими батареями составляет десятки микроватт.

Основная часть

Атомная батарея, также известная как ядерная батарея или радиоизотопная батарея, представляет собой устройство, которое использует энергию, выделяющуюся при распаде радиоактивных изотопов, для производства электроэнергии. В отличие от ядерного реактора, радионуклидная батарея получает энергию не за счет ядерного деления, а за счет радиоактивного распада.

Атомные батареи компании Arkenlight.

Ученые из института Cabot в Бристоле (Великобритания) создали из графитовых радиоактивных отходов синтетический алмаз, который может быть использован как средство генерации электроэнергии.

Одним из опасных побочных продуктов использования графита в качестве замедлителя на АЭС является углерод (C-14), который образуется в результате облучения графита нейтронами в реакторе. Изготовленные из радиоактивного графита синтетические алмазы, содержащие в качестве примеси углерод (C-14), способны генерировать небольшой электрический ток, т. е. работать в качестве «ядерных батареек». В ходе естественного распада углерода бета-частицы выбивают электроны в алмазе, создавая электрический ток. По примерным расчетам такая батарея прослужит без подзарядки не менее 13 до 4000 лет. По данным Британского управления по атомной энергии, для производства миллионов радиоактивных алмазных батарей потребуется всего 45 килограммов углерода (C-14). В настоящее время мини-батарея от переработки радиоактивных отходов содержит 1 грамм углерода-14 и может генерировать 15 джоулей в течение суток.

Представители компании Arkenlight отмечают, что они разработали более оптимальную и емкую ядерную батарею, чем те, которые изготавливались ранее, так как введение радиоизотопа внутрь алмазного материала увеличивает выходную мощность (рис. 1–2). Отличительной особенностью алмазной решетки является ее плотность, которая не дает бета-частицам вырываться наружу. Такая прочная связь элементов обеспечивает безопасность использования изделия в различных областях.

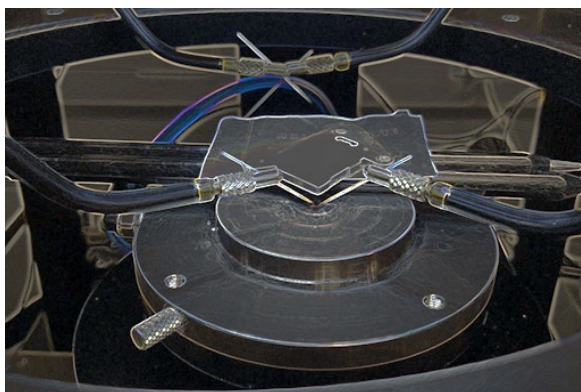


Рисунок 1 – Атомная алмазная батарея компании Arkenlight



Рисунок 2 – Гамма-электрическая батарея Arkenlight, преобразующая гамма-излучение от ядерных отходов в электроэнергию

Батареи компании NDB.

Калифорнийская компания NDB предлагает решение проблемы небольшой выходной мощности бета-вольтаических батарей. Предприятие работает над прототипом нано-алмазных батарей, которые, работают не только за счет бета-распада радиоизотопов, но и альфа-распада. Глава

датчики, бытовая электроника (телефоны и ноутбуки), и даже высокомогущные устройства, такие как электромобили и самолеты. «Все, что может работать на существующих литий-ионных батареях, мы можем запитать с помощью батареи NDB» – утверждает Голшарифи.

Выходная мощность прототипа компании достигает 50 милливатт на грамм. Представители NDB утверждают, что их устройства не прослужат так же долго, как те, которые работают только благодаря бета-распаду, но, даже при этом, заряда батареи, встроенной в смартфон, все равно хватит на 9 лет, а электромобиль – до 90 лет.

Батареи компании Betavolt New Energy Technology.

Компания Betavolt New Energy Technology – создатель батареи Betavolt. Разрабатываемая с середины 2021 года китайская миниатюрная атомная батарея сочетает в себе две новые технологии: ядерный распад изотопа никеля 63 и самый первый алмазный полупроводниковый модуль 4-го поколения.

Батарея по своей структуре представляет собой модульную конструкцию. Каждый модуль состоит как минимум из двух слоев монокристаллического алмазного конвертера толщиной 10 мкм и слоя никеля 63 толщиной 2 мкм. Затем группы модулей соединяются параллельно последовательно.

В данной батарее используется энергия, которая образуется в результате распада никеля-63, а преобразователями этой энергии служат алмазные полупроводники. Разработка данной технологии началась еще в 1950-х годах.

Никелевая пластина толщиной 2 микрометра помещается между парой алмазных полупроводниковых пластин, толщина которых 10 микрометров. Никель-63 испускает β -частицы, активирующие алмазную матрицу как полупроводник, в результате чего генерируется электроэнергия.

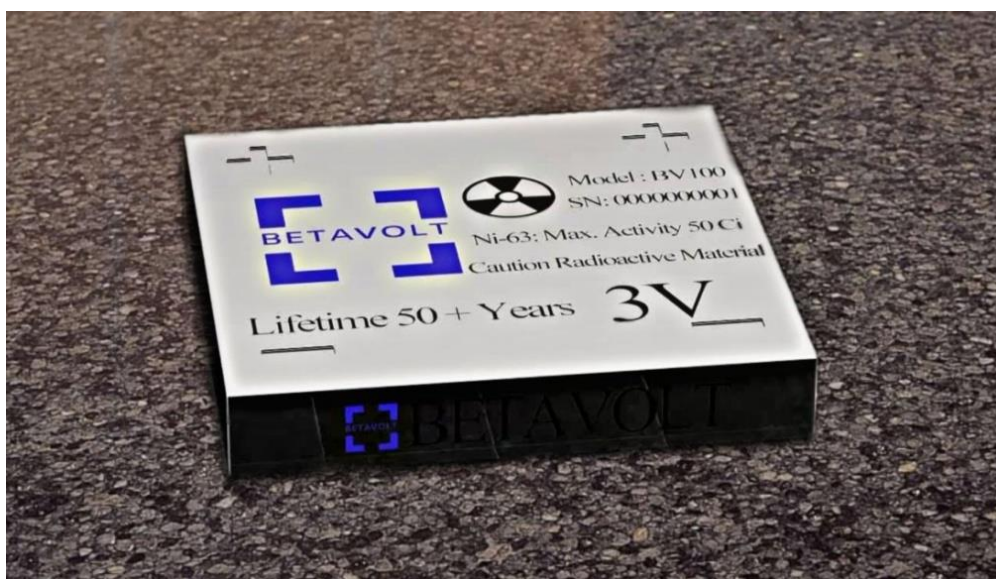


Рисунок 3 – Батарея Betavolt, преобразующая излучение от распада никеля-63 в электроэнергию

Использование радиоизотопных термоэлектрических генераторов началось в космических зондах, таких как «*Voyager-1*» и «*Voyager-2*», запущенных в 1977 году, в которых использование солнечной энергии было невозможно. Также данную технологию используют в сердечных стимуляторах. Разработчики Betavolt обещают революцию в сфере мобильных источников питания.

Прототип батареи данной компании BV100 имеет размеры лишь 15x15x6 мм и вырабатывает мощность равную 105 микроватт. К концу 2025 года ожидается выпуск версии, которая способна выдать 1 Ватт электроэнергии. Параллельное соединение этих батарей способно увеличить выдаваемую мощность, что значительно расширяет сферу их применения.

Также данные батареи, в отличие от современных литиевых, не могут взорваться или воспламениться. Как утверждают создатели, многослойная конструкция батареи позволяет избежать возгорания или взрыва из-за внешнего воздействия. Она также способна работать при температуре от минус 60 до плюс 120 градусов Цельсия. Экстремальные холода и высокие температуры не могут нанести вред радионуклидной батарее. Кроме того, элемент не горюч.

Поскольку батарея, в составе которой имеются радиоактивные элементы, будет располагаться рядом с телом человека, возникает вопрос, о безопасности. Компания Betavolt заявляет, что атомная батарея абсолютно безопасна для здоровья человека и окружающей среды

Преимущество состоит в том, что. По истечении срока действия ядерный материал полностью разложится, поэтому проблем с ядерными отходами быть не должно. Благодаря этим факторам источники энергии Betavolt можно считать одними из самых безопасных. Более того, такие батареи легко утилизируются, так как используемый в составе радиоактивный никель-63 распадается на стабильную медь.

Заключение

Производство и выпуск ядерных батарей с большей долговечностью миниатюрного размера является новаторством в мире технологий. Их интеграция на рынок существенно изменяет представления об автономных мобильных устройствах. Кроме того, такие аккумуляторы способны выдерживать экстремальные условия окружающей среды. Высокие температуры (до 700 °С), такие как высокая влажность и агрессивная среда, не влияют на ядерные батареи.

Литература

1. NEWATLAS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://newatlas.com/energy/arkenlight-nuclear-diamond-batteries/>. – Дата до-ступа: 24.03.24.
2. Хабр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – Дата доступа: 25.03.24 .

3. Электротехника и электроника. Учебник для вузов. – В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники / Г. П. Гаев, В. Г. Герасимов, О. М. Князьков и др.; Под ред. проф. В. Г. Герасимова. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.

4. Overclockers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://overclockers.ru/blog/GOTREK/show/120789/uchenye-arkenlight-i-ndb-sozdajut-almaznye-batarei-iz-yadernyh-othodov>. – Дата доступа: 27.03.24

УДК 621.311

**ОСОБЕННОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДКИ С КОЗЛОВЫМ
КРАНОМ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 30 ТОНН
LIGHTING FEATURES OF THE SITE WITH A GANTRY CRANE
WITH A LIFTING CAPACITY OF 30 TONS**

Д. В. Лагунов, Д. А. Козловская

Научный руководитель – В. Н. Калечиц, к. т. н.,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

D. Lagunov, D. Kozlovskaya
Supervisor – V. Kalechyts, Candidate of Technical Sciences
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье приведен пример светотехнического расчета козлового крана грузоподъемностью 30 тонн с светодиодными светильниками и дуговыми ртутными лампами.*

***Abstract:** the article provides an example of a lighting calculation of a gantry crane with a lifting capacity of 30 tons with LED lamps and arc mercury lamps.*

***Ключевые слова:** освещение, освещенность, светильник, электропотребление.*

***Keywords:** lighting, illumination, luminaire, power consumption.*

Введение

Для безопасной эксплуатации грузоподъемного оборудования важно обеспечить видимость зоны выполнения работ и освещенность на мосту или тележке при выполнении наладочных и ремонтных работ.

Освещение козлового крана обеспечивает безопасность проведения работ в темное время суток. Для этих целей чаще всего применяются мощные светодиодные прожекторы мощностью от 100 Вт до 2 кВт. Выбор зависит от площади освещаемой площадки и высоты его установки.

Для освещения рабочей зоны используются прожекторы на поворотных кронштейнах, которые позволяют направлять световой поток на место проведения погрузо-разгрузочных работ. Это нужно для обеспечения безопасности рабочих.

Основная часть

Для того, чтобы осветить площадку, установим две мачты высотой 23 м. По СН 2.04.03-2020 «Естественное и искусственное освещение» для площадок приема и подачи оборудования, материалов и изделий должна обеспечиваться освещенность 10 лк.

Рассмотрено сравнение расчетных значений освещенности (табл. 1) площадки с козловым краном грузоподъемностью 30 тонн (рис. 1) с светодиодными светильниками и дуговыми ртутными лампами [1].

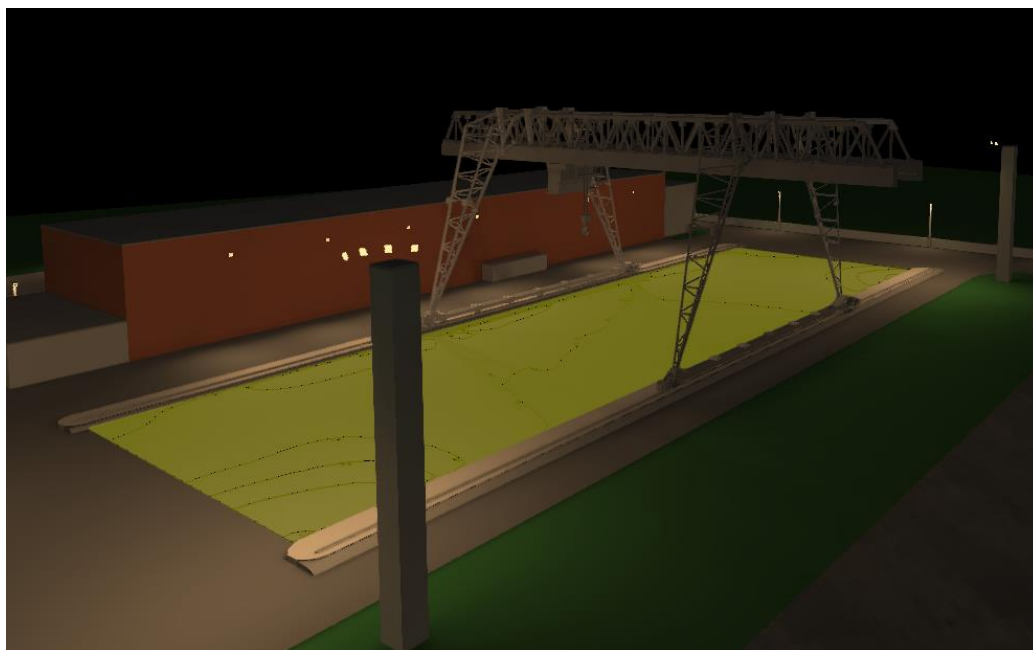


Рисунок 1 – Площадка с козловым краном г/п 30 тонн

В первом варианте освещение площадки козлового крана выполним с помощью светодиодных прожекторов LEADER LED мощностью 240 Вт, со степенью защиты IP66, световым потоком 31200 лм, световой отдачей 130 лм/Вт, производства компании «Световые технологии» [2]. Этот светильник устанавливается на мачту с помощью лиры с фиксируемым углом поворота. Пример светильника изображен на рис. 2. Результаты светотехнического расчета сведены в табл. 1.

Во втором варианте освещение площадки козлового крана выполним с помощью ламп типа ДРЛ мощностью 400 Вт, со степенью защиты IP66, световым потоком 24000 лм, световой отдачей 60 лм/Вт, производства компании «ПитерСвет» [2]. Пример светильника изображен на рис. 3. Результаты светотехнического расчета сведены в табл. 1.



Рисунок 2 – Светодиодный прожектор типа LEADERLED 240W



Рисунок 3 – Лампа типа ДРЛ 400 Вт

Таблица 1 – Результаты светотехнического расчета для двух вариантов расчета

Название	Светодиодный прожектор типа LEADERLED240W	Лампа типа ДРЛ 400 Вт
Светотехнические данные светильников		
Световой поток, лм	31 200	24 000
Потребляемая мощность, Вт	240	400
Световая отдача, лм/Вт	130	60
Степень защиты	IP66	IP66
Срок службы, ч	30 000	15 000
Цветовая температура, К	4 000	3 800
Результаты светотехнического расчета светильников		
$E_{\text{ср}}$, лк	13,9	10,7
E_{min} , лк	2,16	1,66
E_{max} , лк	40,3	31
$E_{\text{min/ср}}$, лк	0,16	0,16
$E_{\text{min/max}}$, лк	0,054	0,054

По результатам светотехнического расчета значение освещенности площадки козлового крана 10 лк было обеспечено с использованием 13 светодиодных прожекторов типа LEADER LED 240W и с использованием 13 ламп типа ДРЛ 400 Вт.

Распределение освещенности площадки с козловым краном представлено на рис. 3 и рис. 4 соответственно, вид сверху.

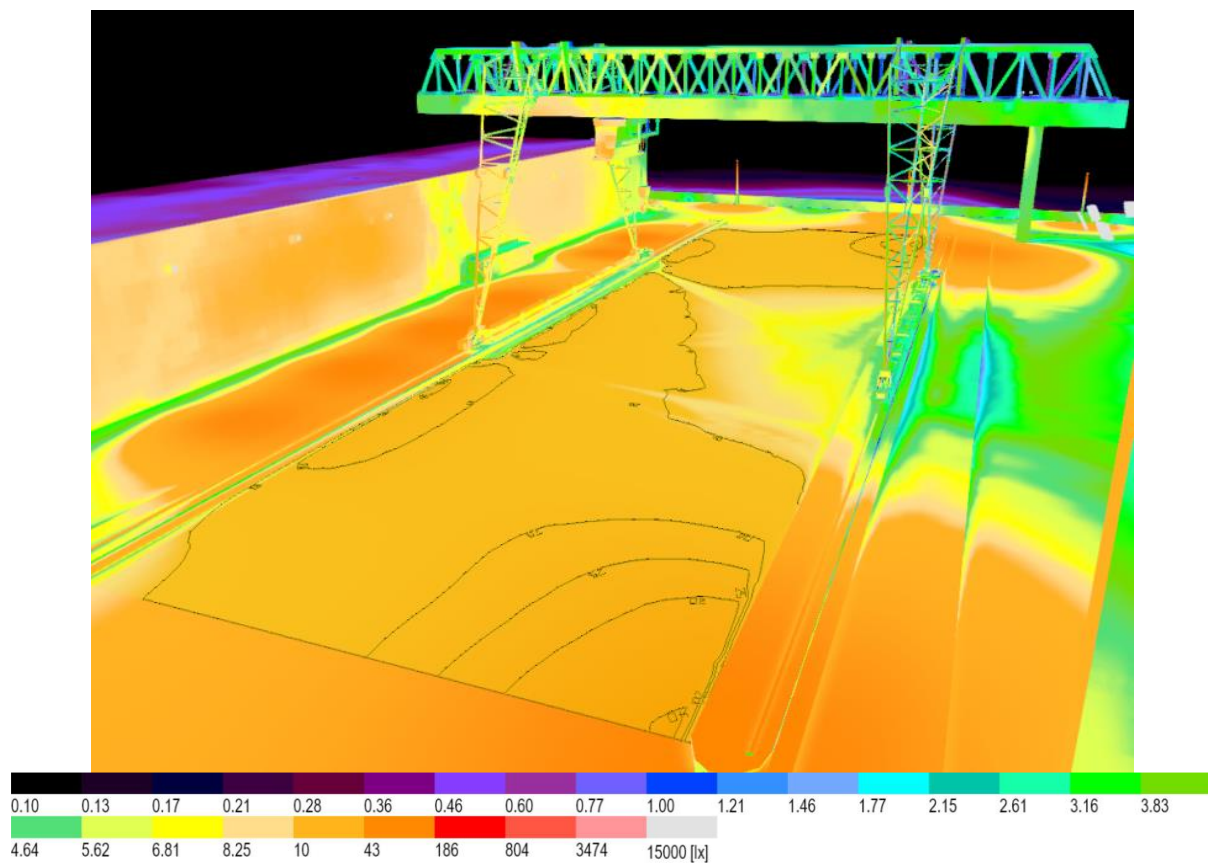


Рисунок 3 – Результат светотехнического расчета со светодиодными прожекторами LEADER LED 240W

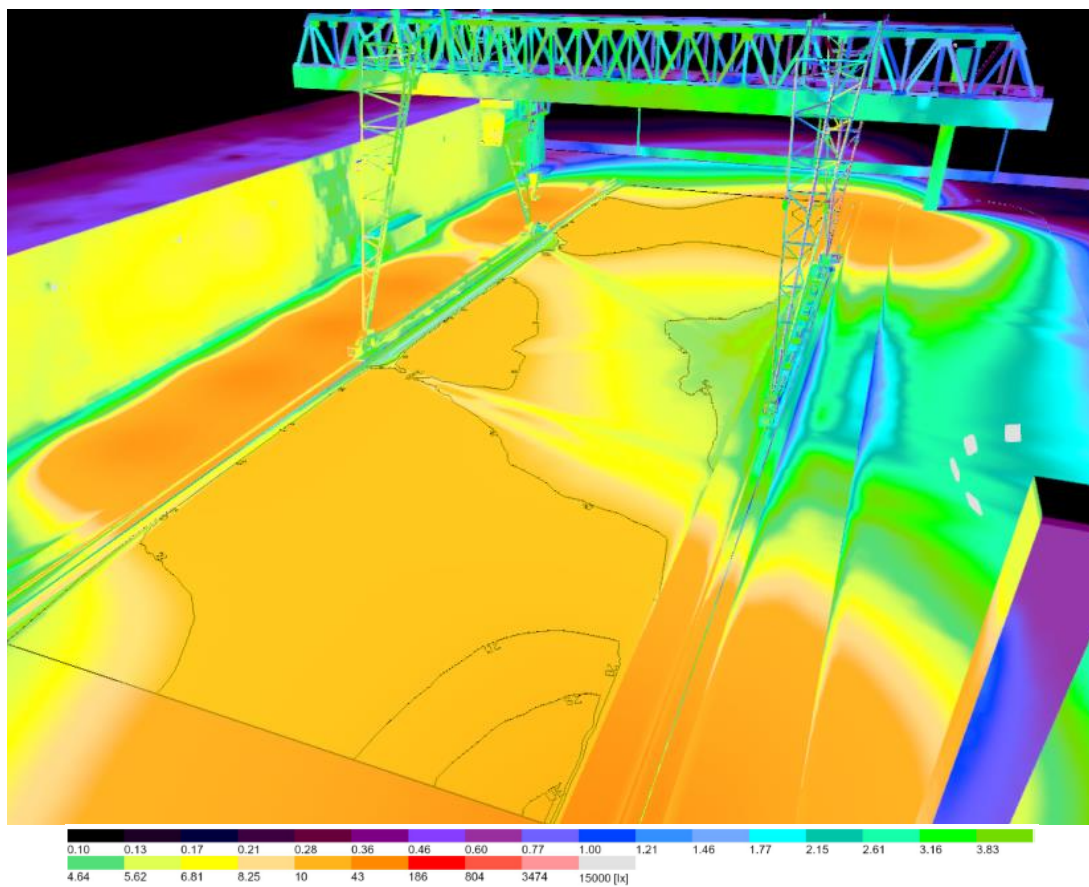


Рисунок 4 – Результат светотехнического расчета с лампами типа ДРЛ 400 Вт

Заключение

На площадке с козловым краном грузоподъемностью 30 тонн размещены 10 светильников и произведен светотехнический расчет с светодиодными светильниками и дуговыми ртутными лампами.

Срок службы ламп ДРЛ вдвое меньше по сравнению со светодиодным источником света, у ламп типа ДРЛ к концу срока службы световой поток снижается до 70 % от начального. Также недостатком ламп типа ДРЛ является не лучшее качество цветопередачи. ДРЛ в эксплуатации требуют дополнительных затрат. Это расходы на замену перегорающих ламп. Существенно снизить расход электроэнергии позволяют уличные светильники на базе светодиодов. Светодиодные лампы характеризуются высокой энергоэффективностью. При этом светодиоды имеют больший срок службы. Благодаря высокому КПД светодиоды обеспечивают низкое энергопотребление и малое тепловыделение. Переход на светодиодное освещение требует затрат. Для освещения одного и того же помещения светодиодных светильников потребуется в несколько раз меньше. Это означает, что удастся сэкономить на монтаже световых точек и прокладке кабеля, кабель понадобится меньшего сечения.

Литература

1. DIALuxLuminaireFinder [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://luminaires.dialux.com/ru/article/qGqDz1LtQ7m-Ts1Bh4mr8Q?_Y=600. – Дата доступа: 29.04.2024.
2. Световые технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ltcompany.com/series/leader-led/leader-led-240w-d75-750-ral9006>. – Дата доступа: 29.04.2024.
3. Аспрос [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://tdm-electric.by/katalog/svetotehnika/rtutnye_gazorazrjadnye_lampy_drl/lampa_rtutnaja_vysokogo_davlenija_drl_400_vt_e40_TDM.html. – Дата доступа: 29.04.2024.

УДК 621.32

РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ
REACTIVE POWER IN LIGHTING INSTALLATIONS

П. А. Крупень

Научный руководитель – В. Б. Козловская, к. т. н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

P. Krupen

Supervisor – V. Kozlovskaya, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: описывается природа реактивной мощности в осветительных установках и способы борьбы с ней, а также подробно описывает элементы компенсационных установок и их разновидности.

Annotation: describes the nature of reactive power in lighting installations and ways to combat it, and also describes in detail the elements of compensation installations and their varieties.

Ключевые слова: реактивная мощность, осветительные установки, компенсация, лампы ДРЛ, лампы ДРИ, люминесцентные лампы, компенсационный конденсатор, групповая компенсация, индивидуальная компенсация.

Keywords: reactive power, lighting systems, compensation, DRL lamps, DRI lamps, fluorescent lamps, compensation capacitor, group compensation, individual compensation.

Введение

Для освещения различных объектов, как правило, практикуются газоразрядные лампы, обычно запитываемые сетью низковольтного напряжения. Электрический разряд в газовой среднестабилен. Любые изменения напряжения переменного тока могут разорвать разряд. В таком случае люминофор будет приходить в негодность гораздо быстрее, вызывая дополнительные расходы.

Чтобы не допустить этого разрядный ток контролируется подключенным параллельно к газоразрядной трубке лампы лимитирующим балластным сопротивлением. В качестве балласта обычно используется специальная катушка индуктивности – дроссель, имеющая сердечник из стали. Также дроссель используют для образования взрывозажигательного импульса посредством функций электродвижущей силы (ЭДС) самоиндукции. Данная катушка индуктивности сглаживает колебания переменного тока и, как результат, понижает отклонение светового потока, который излучает газоразрядная лампа высокого или низкого давления.

Также при применении дроссель использует реактивную мощность. Коэффициент мощности осветительных устройств типа ДРЛ, ДРИ и ДНаТ, обозначаемый в технической литературе как $\cos \varphi$, обычно находится в диапазоне от 0,52 до 0,61. Обмотка катушки индуктивности в составной части

дресселя вызывает некоторое количество потерь активной мощности и, как правило, это число составляет от 10 % до 20 % от номинальной мощности ОУ. Основная часть газоразрядных ламп являются потребителями реактивной мощности и. Это приводит к огромному влиянию на настройки электрического потребления как осветительной сети, так и всей электрической системы в целом посредством увеличения полной мощности. При завышенных значениях или превышении максимального значения допуска реактивной мощности главными способами контроля являются установка силовых трансформаторов и увеличение допустимого сечения сетевых проводников. При повышении процентного соотношения реактивной нагрузки в сети сказываются следующие последствия:

- падение коэффициента мощности. Коэффициент мощности является отношением активной мощности к полной. Пониженные значения $\cos \varphi$ могут приводить к увеличению сечений питающих линий и повышению стоимости электроэнергии;

- падение напряжения;
- перегрев компонентов лампы. Может приводить к сокращению срока службы;
- уменьшение эффективности. Проявляется в уменьшении светоотдачи и преждевременном перегорании лампы.

Способы компенсации реактивной мощности в освещении.

В осветительных установках возможны два типа компенсации реактивной мощности:

- групповой, посредством установки специальных компенсационных конденсаторов у осветительных щитков. Такие конденсаторы обслуживают сразу n -ое количество осветительных линий (рис. 1);

- индивидуальный, посредством установки компенсационного конденсатора напрямую к каждой осветительной линии (рис. 2).

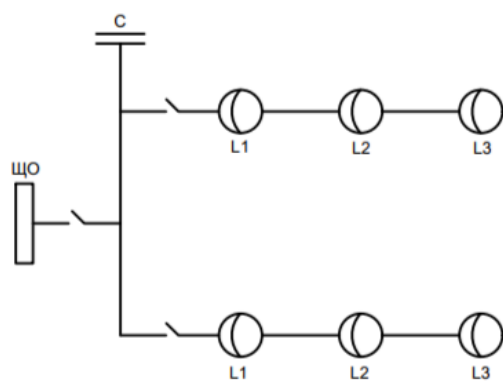


Рисунок 1 – Групповая компенсация

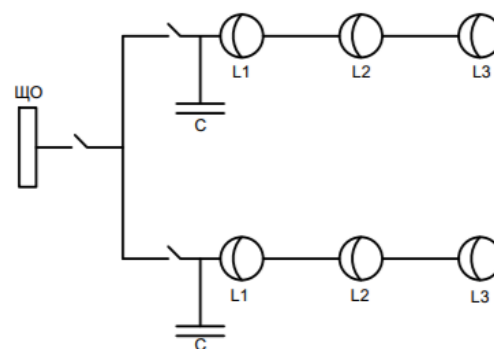


Рисунок 2 – Индивидуальная компенсация

У каждого из этих способов есть свои плюсы и минусы. Групповая компенсация, по сравнению с индивидуальной, позволяет устанавливать более

качественные и подходящие к данным условиям эксплуатации конденсаторы.

В установках с люминесцентными лампами низкого давления специалисты рекомендуют использовать пускорегулирующие устройства по так называемой «двухламповой стартерной схеме». Это объясняется тем, что конденсаторы создают в цепи опережающий ток и, тем самым, повышают $\cos \varphi \approx 0,92$.

Для дуговых ламп высокого давления, типа ДРЛ, ДРИ и ДНаТ, возможно применять как групповую, так и индивидуальную схему компенсации. В табл. 1 приведено соответствие мощностей с компенсационной емкостью.

Таблица 1 – Соответствие мощностей с компенсационной емкостью

Мощность ламп, Вт	300	550	800	1000
Емкость конденсаторов, мкФ	25	45	65	85

В установках с групповой компенсацией необходимая мощность конденсатора Q может быть определена по формуле:

$$Q = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2), \quad (1)$$

где P – мощность световых приборов, кВт;

$\tan \varphi_1$ и $\tan \varphi_2$ – значения исходного и желаемого коэффициента реактивной мощности.

Для компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях устанавливают одни из следующих типов устройств:

– статические конденсаторы: получили наибольшее распространение в связи с относительно небольшой массой и возможностью легкого ремонта, что влияет на простоту обслуживания таких установок. Эти показатели обуславливают их дешевизну и преимущественность закупок на подстанции, питающие предприятия. Так возможно наиболее выгодно компенсировать реактивную мощность;

– синхронные компенсаторы: имеют исполнение в виде синхронных двигателей в ненагруженном состоянии, которые подключаются к линиям электропередач на большие длины и сверхвысокое напряжение. Эти компенсаторы позволяют регулировать ток возбуждения, что приводит к пропорциональным изменениям в реактивной мощности;

– шунтирующие реакторы: необходимы при высоких зарядных мощностях и фиксации напряжения в допустимых диапазонах.

Компенсационные конденсаторы (рис. 3).

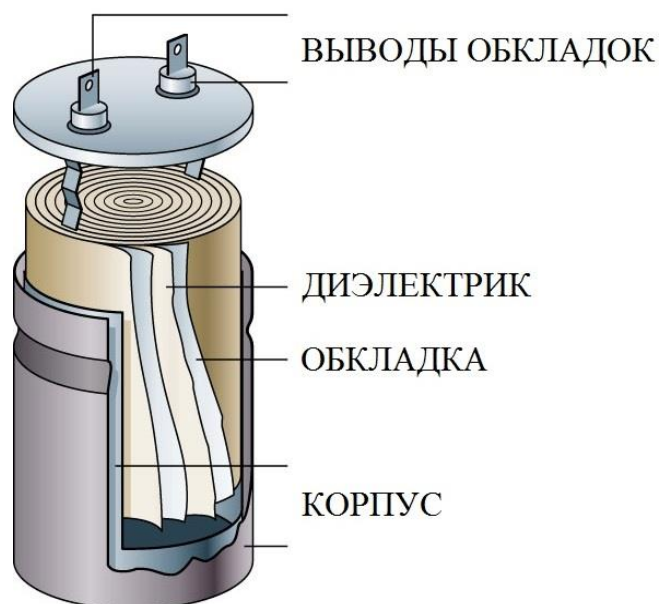


Рисунок 3 – Образец компенсационного конденсатора

Конденсаторы состоят из следующих основных частей:

– корпус: низковольтные конденсаторы имеют герметичный цилиндрический корпус из алюминия с крепежным винтом снизу и клеммным терминалом сверху. Для предотвращения разрыва оболочки из-за избыточного внутреннего давления качественные конденсаторы оснащают предохранительной складкой на корпусе. Вместе с особой «зарубкой» на внутренних соединениях это обеспечивает отключение конденсатора от сети в аварийных ситуациях, что предотвращает повреждение других элементов установки. Конденсаторы среднего напряжения имеют герметичный прямоугольный корпус из нержавеющей стали. Для крепления служат нижние кронштейны и боковые держатели;

– конденсаторные рулоны: изготавливаются в одно- или трех фазном исполнении. Могут соединяться по схемам Y или Δ. Рулон представляет собой своего рода обкладку, состоящую из металлической пленки. Ее параметры зависят от мощности и напряжения конденсатора: чем выше, тем толще и шире применяется пленка. Рулоны соединены с клеммным терминалом медными проводниками;

– импрегнат: наполнение конденсатора зависит от его напряжения и исполнения. Конденсаторы низкого напряжения наполняются инертным газом или нетоксичной массой растительного происхождения, а для среднего напряжения используется пропитка синтетической жидкостью без ПХБ. Это решение позволяет сохранить параметры конденсатора в течение длительного времени и снизить влияние внешних факторов, таких как температура;

– клеммный терминал: для конденсаторов низкого напряжения предлагаются два типа выводов – двойные хомутные выводы и болтовые (по числу фаз), а для конденсаторов среднего напряжения – только болтовые. Поскольку корпус полностью герметичный, степень защиты определяется

типом выводов: IP20 для хомутных и IP00 для болтовых. Для увеличения степени защиты до IP54 можно заказать специальные крышки. Необходимым требованием безопасности является наличие в конструкции разрядных резисторов, которые снижают напряжение конденсаторов до безопасного уровня при их отключении от сети в заряженном состоянии.

Литература

1. Реактивная мощность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/37721/Reaktivnaya_moshchnost_v_osvetitelnyh_ustanovkakh.pdf?sequence=1. – Дата доступа: 25.04.24
2. Компенсационные конденсатора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lsys.by/katalog/oborudovanie_dlya_kompensatsii_reaktivnoy_moshchnosti/kondensatory/#:~:text=Компенсационные%20конденсаторы%20предназначены%20для%20компенсации,также%20в%20фильтрах%20высших%20гармоник. – Дата доступа: 27.04.24
3. Школа для электрика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/main/osnovy/2130-energiya-zaryazhennogo-kondensatora-primenenie-kondensatorov.html>. – Дата доступа: 27.04.24
4. Компенсационные конденсаторы Epcos [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.promelec.ru/news/2615/#:~:text=Они%20представляют%20собой%20самовосстанавливающиеся%20С%20металлизированные,400%20и%20525%20В.> – Дата доступа: 27.04.24

УДК 621.311

**ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ КАК
ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ
GEOTHERMAL HEAT PUMPS AS INNOVATIVE TECHNOLOGIES
FOR THE USE OF RENEWABLE RESOURCES**

В. И. Хамицкая

Научный руководитель – В. В. Кравченко, к. э. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

V. Khamitskaya

Supervisor – V. Kravchenko, Candidate of Economic Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются основные принципы работы геотермальных тепловых насосов, их преимущества и недостатки, а также их роль в современной энергетике и сохранении окружающей среды.*

***Annotation:** this article discusses the basic principles of geothermal heat pumps, their advantages and disadvantages, as well as their role in modern energy and environmental conservation.*

***Ключевые слова:** геотермальная энергия, тепловой насос, теплообменник, отопление, геотермальные ресурсы.*

***Key words:** geothermal energy, heat pump, heat exchanger, heating, geothermal resources.*

Введение

Геотермальная энергия – это возобновляемый источник энергии, который является экологически чистым, поскольку при его использовании не выделяются парниковые газы и другие загрязнители атмосферы. Эта энергия может быть использована как источник тепла для работы тепловых насосов, особенно в случае геотермальных тепловых насосов. Оба этих аспекта играют важную роль в развитии энергетической отрасли и в снижении негативного воздействия на окружающую среду.

Геотермальные тепловые насосы (ГТН) – инновационная технология использования возобновляемых источников энергии. Они позволяют эффективно использовать тепло, накапливающееся в земле, для обогрева и охлаждения зданий. В отличие от традиционных методов отопления, которые часто используют ископаемые топлива, геотермальные тепловые насосы используют тепловую энергию, которая непрерывно поступает из недр Земли.

Основная часть

Большинство ГТН устанавливаются в пределах 6 метров от поверхности Земли, где поддерживается постоянная температура от 10 до 16 °С. Следовательно, это тепло может быть использовано для обогрева зданий в холодные

месяцы года, когда температура воздуха падает ниже температуры земли. Точно так же в теплые месяцы года теплый воздух может вытягиваться из здания и циркулировать под землей, где он теряет большую часть своего тепла, и возвращаться.

Принцип работы оборудования базируется на обратном термодинамическом цикле или цикле Карно [1]. Устройство геотермального теплового насоса (рис. 1) обычно включает в себя компрессор, испаритель, конденсатор и расширительный клапан. Компрессор отвечает за повышение давления и температуры теплоносителя, а испаритель используется для нагрева теплоносителя, пока он находится в почве или воде. Конденсатор используется для передачи тепла в систему отопления, а расширительный клапан регулирует поток теплоносителя и позволяет его расширяться перед возвращением в источник тепла. ГТН обеспечивает обогрев помещений в холодное время года, летом этот процесс можно обратить для охлаждения помещений.

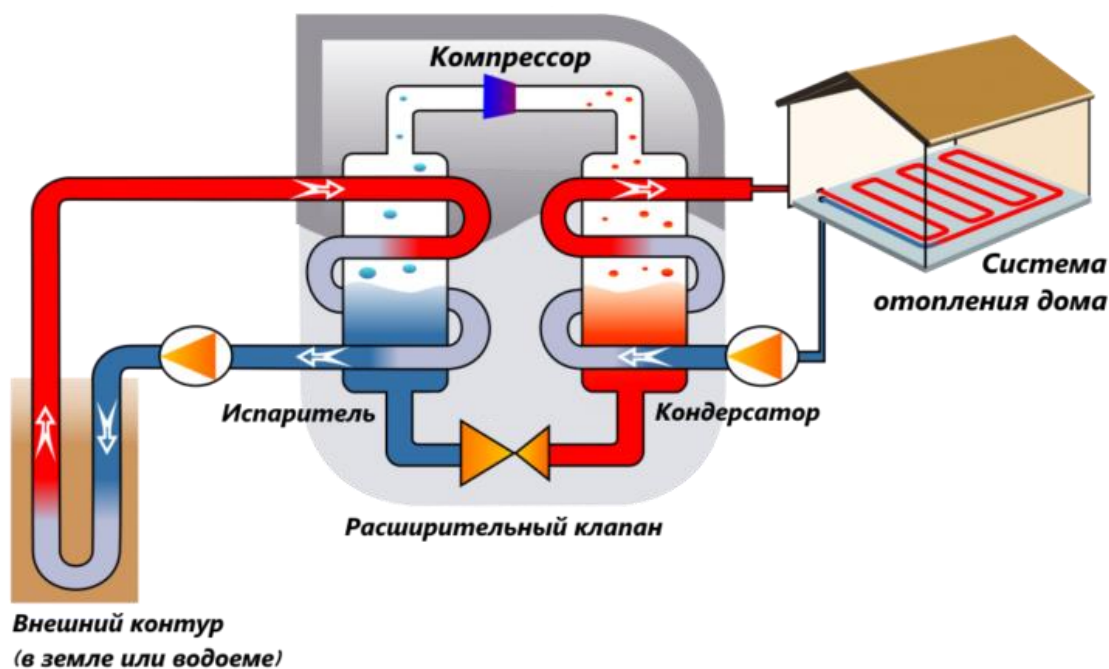


Рисунок 1 – Принцип работы геотермального теплового насоса [2]

Перейдем к достоинствам и недостаткам геотермального теплового насоса.

Достоинства ГТН:

- высокая энергоэффективность за счет использования стабильного источника тепла из земли;
- экологически чистый способ обогрева и охлаждения;
- работают круглый год и не зависят от изменений температуры воздуха;
- длительный срок службы и защита от внешних погодных условий.

Недостатки ГТН:

- установка требует значительных инвестиций в связи с необходимостью закапывания коллекторов или зондов;
- требуют регулярного обслуживания для поддержания оптимальной производительности;
- некоторые местоположения могут иметь ограничения на использование из-за сложностей с доступом к земле или недостаточной площади для установки коллекторов.

В Беларуси геотермальная энергетика находится на начальном этапе развития. В стране имеется потенциал для использования геотермальной энергии благодаря наличию горячих источников подземных вод и геотермальных ресурсов. Некоторые исследования и проекты были проведены для оценки этого потенциала и определения возможностей использования геотермальной энергии в различных областях (рис. 2).

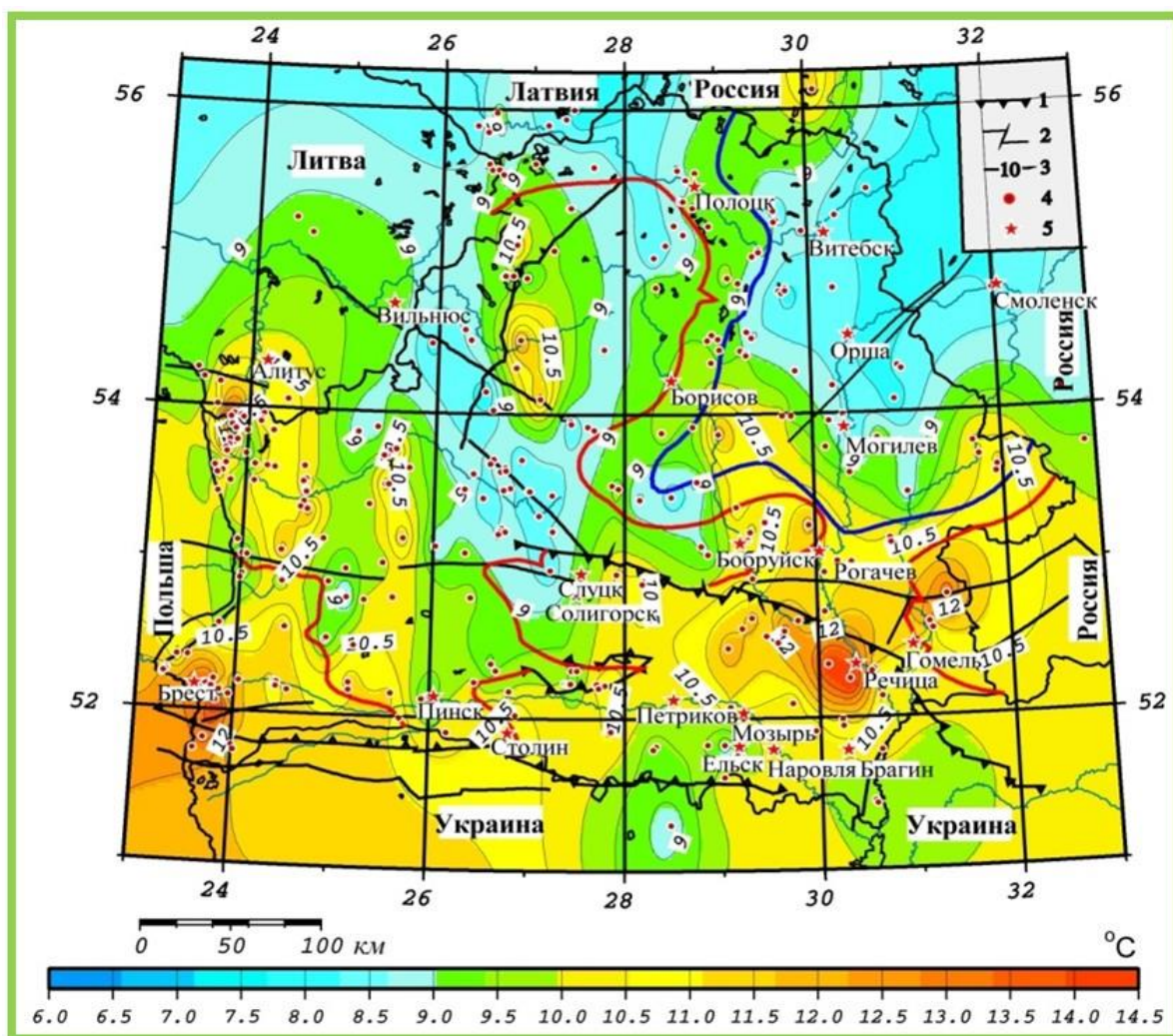


Рисунок 2 – Карта распределения температуры на глубине 200 метров [3]

В стране действуют около 100 геотермальных установок (с учетом коттеджей) на базе тепловых насосов с суммарной установленной

мощностью около 5,5–6,0 МВт. Наиболее крупная геотермальная станция мощностью 1 МВт создана в Тепличном комбинате «Берестье», г. Брест [3].

В рамках стратегии развития возобновляемой энергетики в Беларуси проводятся работы по исследованию и освоению геотермальных ресурсов. Проведение более подробных исследований может способствовать развитию этого направления и созданию более широких возможностей для использования геотермальной энергии в стране.

Заключение

Исходя из всего выше сказанного можно утверждать, что геотермальные тепловые насосы являются перспективным решением для обеспечения комфортных условий внутри зданий при минимальных экологических и экономических затратах. Развитие и распространение этой технологии будет способствовать сокращению зависимости от ископаемых топлив и улучшению экологической обстановки.

Литература

1. Принцип работы геотермального теплового насоса [Электронный ресурс] / Геотермальный тепловой насос. – Режим доступа: <https://teplosfera.com/ru/blog/teplovi-nasosi/>. – Дата доступа: 07.04.2024.

2. Тепловые насосы: преимущества и недостатки [Электронный ресурс] / Геотермальный тепловой насос. – Режим доступа: https://ihomesystems.ru/repair_and_construction/teplovye-nasosy-nedostatki-preimusestva-i-raznovidnosti.html/. – Дата доступа: 07.04.2024.

3. Геотермальные ресурсы недр [Электронный ресурс] / Экологический портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://ecoportal.gov.by/nedra/mineralno-syrevaaya-baza/dobyvaemoe-syre/geotermalnye-resursy-nedr/>. – Дата доступа: 07.04.20.

УДК 621.311

**ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧНОСТИ КОНДЕНСАЦИОННЫХ
ЭНЕРГОБЛОКОВ**
**EVALUATION OF THE ECONOMICAL EFFICIENCY
OF CONDENSING POWER UNITS**

А. О. Боровикова

Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д. т. н., профессор
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

A. Borovikova

Supervisor – N. Karnitsky, Doctor of Technical Sciences, Professor
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматривается применение электрогенерирующих мощностей энергосистемы Республики Беларусь в качестве резервных в случае останова энергоблоков Белорусской атомной электростанции.*

***Annotation:** this article discusses the use of electricity generating capacities of the power system of the Republic of Belarus as backup in the event of a shutdown of power units of the Belarusian Nuclear Power Plant.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, электрочотлы, мощность, атомная энергетика, инфраструктура.*

***Key words:** energy efficiency, electric boilers, power, nuclear power industry, infrastructure.*

Введение

Главной целью электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей, подстанций, диспетчерских пунктов управления является производство, преобразование, распределение и отпуск электрической и тепловой энергии потребителям (далее – энергопроизводство).

Основными технологическими звеньями энергопроизводства являются областные энергосистемы (предприятия – РУП-облэнерго) с входящими в их состав филиалами – электростанциями, электрическими и тепловыми сетями, связанными общностью режимов работы и имеющими центральные оперативно-диспетчерские службы. Процветание стран и народов напрямую зависит от объема потребляемой энергии, что естественным образом мотивирует людей стремиться увеличивать это потребление. Энергия играет особое значение в системе человеческих ценностей, без нее нынешняя цивилизация недееспособна.

Основная часть

Беларусь развивается быстрыми темпами. Однако для достижения уровня развития социально-промышленного сектора и сельского хозяйства, как в США, Швеции и других развитых стран, необходимо иметь аналогичное количество собственных электрогенерирующих источников на душу населения. Если исходить из расчета хотя бы 1 млн. кВт генерирующей

мощности на 1 млн. жителей республики, то установленная энергогенерирующая мощность должна быть в пределах 10 млн. кВт. Плюс еще необходимо до 30 % мощности, находящейся в горячем резерве (как в США), для обеспечения надежного и бесперебойного электроснабжения всей страны. Таким образом, суммарная собственная энергомощность республики должна достичь как минимум 12–15 млн. кВт.

Современные исследования и разработки ищут новые способы для максимального замещения органических источников энергии. В настоящее время основной акцент делается на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – ветровые, гидро- и солнечные электростанции, установки, работающие на биомассе, торфе, древесине, лигнине, отходах жизнедеятельности человека и др. К сожалению, на данный момент доля электроэнергии, производимой из возобновляемых источников энергии, остается невысокой даже в самых развитых странах мира, не учитывая крупные гидроэлектростанции. Она составляет всего 12–17 % от общего объема потребления электроэнергии.

В Беларуси удовлетворить такой уровень спроса на электроэнергию за счет ВИЭ будет очень трудно. Беларусь расположена в зоне с очень малым количеством солнечных дней в году по сравнению с Западной Европой. Тот же минус можно отнести и к ветроэнергетике так как трудно ожидать многого в связи с тем, что преобладающая скорость ветра в пределах государства, где возможна экономичная и целесообразная выработка электроэнергии составляет всего 2–3 м/сек. Что касается гидроэлектростанций, то даже если они будут построены почти на всех водоемах республики, где это конечно экономически выгодно, будет трудно получить даже 500 МВт. Поэтому неудивительно, что энергия ядерного деления вытесняет традиционные источники энергии, работающие на углеводородном топливе, во многих странах мира.

Уран – это один из наиболее распространенных элементов на Земле, и его запасы практически неограничены. Его обнаруживают в различных горных породах, включая граниты, сланцы и песчаники, а также в воде морей и океанов. Современные технологии позволяют добывать уран из различных источников, что обеспечивает его доступность для применения в различных отраслях промышленности, включая производство электроэнергии. Кроме того, атомные электростанции, работающие на уране, являются более экологически чистыми по сравнению с тепловыми станциями, так как не производят вредных выбросов в атмосферу. В то время как тепловые электростанции, работающие на каменном угле, производят 950 г/(кВт·ч) вредных выбросов, на мазуте – 700, на природном газе – 530 г/(кВт·ч).

Благодаря тому, что происходит запуск двух энергоблоков на Белорусской АЭС, энергосистема страны значительно усилится и станет второй по установленной мощности после Лукомльской ГРЭС. Строительство атомной станции – это огромный проект, который требует особого внимания и уникальных решений в сфере энергетики. Этот проект не только создаст

новый источник энергии, но и представляет собой сложную задачу по передаче больших объемов электроэнергии от АЭС к потребителям, что требует развития и модернизации электрических сетей в стране.

Для обеспечения связи АЭС с Белорусской энергосистемой параллельно со строительством атомной электростанции будет реализован проект под названием «Строительство АЭС в Республике Беларусь. Выдача мощности и связь с энергосистемой». Он предусматривает строительство воздушных линий электропередачи 330 кВ протяженностью 1032,5 км, реконструкцию 672,4 км действующих ВЛ 110–330 кВ, реконструкцию 4 распределительных устройств со строительством ячеек 330 кВ на подстанциях 330 кВ «Россь» и «Сморгонь» (с установкой второго автотрансформатора), 220 кВ «Столбцы» (она будет переведена на напряжение 330 кВ) и Минской ТЭЦ-4, а также строительство новой ПС 330 кВ «Поставы» [1]. Реализация проекта охватывает территорию Гродненской, Минской и Витебской областей.

Энергосистема Беларуси постоянно совершенствуется для обеспечения стабильного и надежного энергоснабжения. Это включает в себя развитие электростанций, расширение сетевой инфраструктуры, повышение энергоэффективности и внедрение новых технологий [2]. Концепция энергетической безопасности стремится защитить граждан, общество и экономику от возможных угроз, связанных с дефицитом энергоресурсов и прерываниями поставок энергии (табл. 1).

Таблица 1 – Данные по установленной мощности ОЭС Беларуси [1]

№	Наименование электростанций	Код	Мощность-МВт	Примечание
1	БелАЭС (прием в эксплуатацию 1 квартал 2021г) – 1 блок		1 194,0	РУП БелАЭС
	ИТОГО АЭС:		1 194,00	
1	Лукомльская ГРЭС	ГРЭС-20	2 889,5	Витебскэнерго
2	Минская ТЭЦ-4	ТЭЦ-4	1 035	Минскэнерго
3	Березовская ГРЭС	ГРЭС-15	1 095,12	Брестэнерго
4	Гомельская ТЭЦ-2	ТЭЦ-26	544	Гомельэнерго
5	Новополоцкая ТЭЦ	ТЭЦ-14	270	Витебскэнерго
6	Минская ТЭЦ-3	ТЭЦ-3	442	Минскэнерго
7	Могилевская ТЭЦ-2	ТЭЦ-21	297,3	Могилевэнерго
8	ТЭЦ-5	ТЭЦ-5	719,6	Минскэнерго
9	Светлогорская ТЭЦ	ТЭЦ-7	155	Гомельэнерго
10	Мозырская ТЭЦ	ТЭЦ-24	206	Гомельэнерго
11	Бобруйская ТЭЦ-2	ТЭЦ-22	182,6	Могилевэнерго
12	Гродненская ТЭЦ-2	ТЭЦ-23	312,45	Гродноэнерго
	ИТОГО по основным станциям:		8 148,57	

С появлением двух новых блоков на АЭС возникают сложности с управлением нагрузкой в энергосистеме из-за изменений в процессе генерации. Для эффективного решения этой проблемы необходимо активное

взаимодействие с ТЭЦ. Интеграция новой АЭС в энергосистему Беларуси является ключевой задачей для Министерства энергетики и ГПО «Белэнерго». Это означает, что все плановые мероприятия по строительству резервных и пиковых источников энергии и электрокотлов должны быть выполнены точно и в срок. Важными элементами также для обеспечения стабильности энергосистемы являются различные типы энергетических установок.

На данный момент предпринято ряд мер по интеграции Белорусской АЭС в энергосистему. Одним из главных событий является, строительство электрокотлов, которые позволяют в определенной степени выровнять суточный график нагрузки. Это представляет собой значительный шаг в направлении улучшения энергетической инфраструктуры страны. Внедрение электрокотлов поможет смягчить ночные провалы в электросети и повысит техническую гибкость существующего оборудования.

Эксплуатация электрокотлов также приведет к экономии топливно-энергетических ресурсов, поскольку уменьшит количество запусков и остановок оборудования [2]. Кроме того, это позволит создать дополнительные резервы по видам топлива, что способствует диверсификации энергетического комплекса страны.

На сегодняшний день уже запущены в эксплуатацию электрокотлы общей мощностью 170 МВт на ТЭЦ и 26 МВт на котельных. Несмотря на некоторые задержки из-за пандемии COVID-19, процесс внедрения электрокотлов продолжается успешно. Загрузка электрокотлов будет определяться конкретными потребностями в тепле и условиями эксплуатации источников.

Плановый естественный физический износ оборудования, конструкций, материалов в распределительных электрических сетях приводит к снижению надежности электроснабжения, а увеличение подключенных к сети нагрузок – к снижению качества электроэнергии и повышению потерь электроэнергии.

Заключение

Предложенные мероприятия направлены на увеличение продолжительности интервалов между техническими обслуживаниями и сокращение времени и затрат на обслуживание энергетической сети. После запуска в эксплуатацию Белорусской АЭС мощностью 2400 МВт возможны исследования по повышению надежности энергосистемы. Введение в эксплуатацию электрокотлов с баками-аккумуляторами и работа паротурбинного оборудования ТЭЦ помогут смягчить ночные провалы электрической нагрузки, особенно в летний период.

Рассмотрены технические решения определения эффективности резервирования энергоблоков АЭС в отопительный период с помощью паротурбинных энергоблоков и ПГУ-427 Лукомльской ГРЭС. Так, при пиковой мощности в энергосистеме 6200 МВт при максимальной нагрузке

предлагаются для резервирования 2 блока 315 МВт 1 очереди и ПГУ-427 Лукомльской ГРЭС (без АЭС) и ПГУ-427 (в работе один блок АЭС).

В межотопительный период с включенной пиковой мощностью энергосистемы 4850 МВт предлагаются варианты резервирования от Лукомльской ЛГРЭС составом оборудования из ПГУ-427 и 1 очереди станции мощностью 1255 МВт (без АЭС) и ПГУ-427 и 1 блок 315 МВт (в работе один блок АЭС).

Литература

1. Дубровенский, А. Н. Оптимизация режимов работы ТЭС в энергосистеме / А. Н. Дубровенский // Энергетика Беларуси. – 2018. – № 3. – С. 5–10.
2. Романюк, В. Н. Оценка термодинамической эффективности функционирования энергосистемы Беларуси в условиях работы Белорусской АЭС / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. – 2016. – № 4. – С. 2–9.

УДК 621.438

**ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ СТАВЯТ РЕКОРДЫ
ЭФФЕКТИВНОСТИ
COMBINED CYCLE POWER PLANTS SET EFFICIENCY RECORDS**

Н. Д. Рудаков, И. Г. Черенкевич

Научный руководитель – С. А. Качан, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

N. Rudakov, I. Cherenkevich

Supervisor – S. Kachan, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассмотрены предпосылки повышения экономичности и маневренности современных парогазовых установок на базе самых совершенных газотурбинных установок. Перечислены наиболее эффективные парогазовые установки с трехконтурными котлами-утилизаторами, чей КПД производства электроэнергии превысил 60 %. Показаны их некоторые основные характеристики.*

***Abstract:** the prerequisites for increasing the efficiency and maneuverability of modern combined-cycle plants based on the most advanced gas turbines are considered. The most efficient steam and gas plants with three-circuit waste heat boilers, whose efficiency of electricity production exceeded 60 %, are listed. Some of their main characteristics are shown.*

***Ключевые слова:** парогазовые установки, газотурбинные установки, котлы-утилизаторы, экономичность, маневренность.*

***Keywords:** combined-cycle plants, gas turbine units, waste heat boilers, efficiency, flexibility.*

Введение

В современных условиях к парогазовым установкам (ПГУ) предъявляются высокие требования по эффективности и маневренности для того, чтобы снизить выбросы CO₂ на выработку 1 кВт·ч и поддерживать генерацию в энергосистеме с учетом переменного спроса на электроэнергию в течение суток. Для Беларуси эта задача обострилась в связи с вводом мощных «базовых» блоков Белорусской АЭС, а в мире – с ростом доли экологически чистой, но не стабильной во времени «зеленой» генерации – в основном ветровой и солнечной.

Основная часть

Утилизационные парогазовые установки обеспечивают наивысшую тепловую экономичность среди установок, работающих на органическом топливе. В последние десятилетия эта отрасль интенсивно развивается. Вновь вводимые ПГУ на базе наиболее перспективных газотурбинных установок (ГТУ) с трехконтурными котлами-утилизаторами и

промперегревом пара (рис. 1) устанавливают мировые рекорды эффективности.

Значения электрического КПД самых современных ПГУ давно превысили уровень 60 %. Отметим, что это почти в полтора раза выше показателей тепловой экономичности традиционных паротурбинных тепловых электростанций (ТЭС), построенных на основе цикла Ренкина на водяном паре.

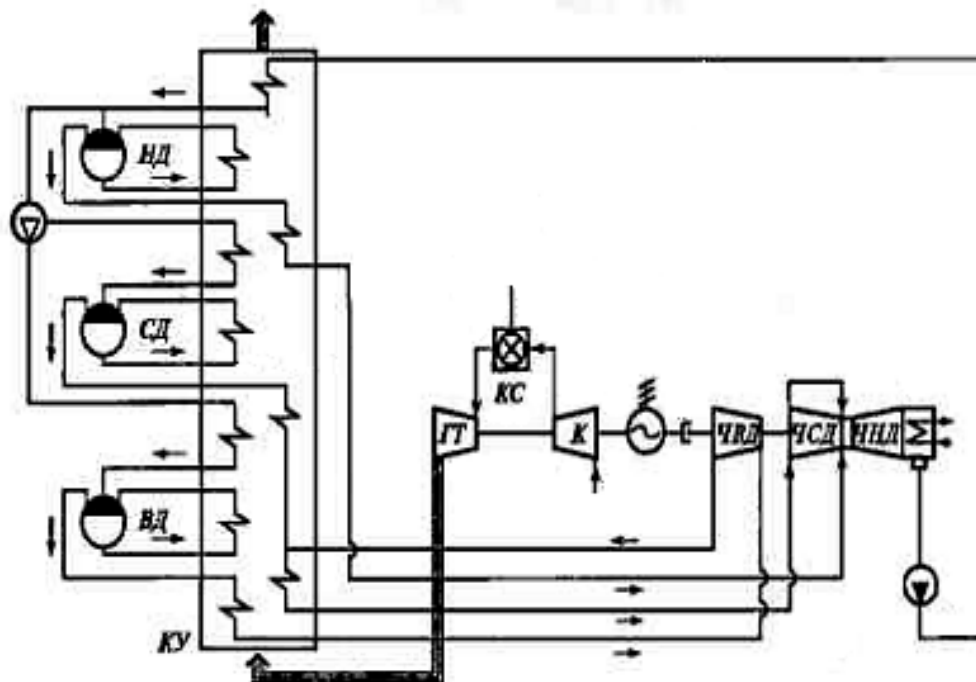


Рисунок 1 – Принципиальная тепловая схема однофазной ПГУ с трехконтурным котлом-утилизатором и промежуточным перегревом пара:

ГТ – газовая турбина; *КС* – камера сгорания; *К* – компрессор; *КУ* – котел-утилизатор; *ВД, СД, НД* – высокое, среднее, низкое давление, *ЧВД, ЧСД, ЧНД* – части *ВД, СД* и *НД* паротурбинной установки

Первым с КПД 60,75 %, был блок ПГУ № 4, введенный в эксплуатацию на электростанции Иршинг (Irsching 4) в Баварии на юге Германии. В 2009 году компания Siemens здесь провела пробный пуск своей газотурбинной установки SGT5-8000H, самой мощной ГТУ в мире на тот момент. Рекордный КПД был зафиксирован в мае 2011 года с выходной мощностью ПГУ более 578 МВт.

Другой энергоблок компании Siemens Fortuna в Дюссельдорфе на электростанции Лаусвард, принадлежащей муниципальному коммунальному предприятию Stadtwerke Düsseldorf, устанавливает новый мировой рекорд электрического КПД в 61,5 % в январе 2016 года [1].

В состав однофазной парогазовой установки производства Siemens входят: газотурбинная установка типа SGT5-8000H; электрогенератор SGen5-3000W; паровая турбина SST5-5000, включающая части высокого, среднего и низкого давлений; горизонтальный трехконтурный котел-утилизатор HRSG 3P-RH с прямоточным исполнением испарителя контура

высокого давления по технологии BENSON и испарителями среднего и низкого давления с естественной циркуляцией.

Замена толстостенного барабана высокого давления на сепаратор с тонкими стенками уменьшает время, требуемое на прогрев котла во время пуска. Это и многие другие примененные в энергоблоке SCC5-8000H 1S инновации повышают маневренность парогазовой установки.

Мощность ГТУ составляет около 2/3 от суммарной мощности ПГУ, которая равна примерно 600 МВт, еще 1/3 – мощность паротурбинной установки. КПД ГТУ по выработке электроэнергии порядка 40 % и добавление паровой турбины на высокие параметры: давление пара в верхнем контуре котла-утилизатора 170 бар при температуре пара высокого давления и пара промежуточного перегрева 600 °С, повышает КПД ПГУ в целом до уровня более 60 %.

В 2016 году, компании GE (General Electric) и EDF (Electricite de France) официально открыли первую в мире ПГУ на базе ГТУ типа HA компании GE, в Бушене, Франция. Испытания показали рекордный КПД преобразования топлива в электроэнергию 62,22 % [2].

Электростанция Бушен представляет собой интегрированную высокоэффективную систему, включающую следующие ключевые компоненты (рис. 2): газовую турбину «H-класса» 9HA.01, паровую турбину D-650, усовершенствованный генератор W86 и трехконтурный котел-утилизатор [2]. Расцепная муфта SSS позволяет запускать ГТУ без паровой турбины одновальной ПГУ.

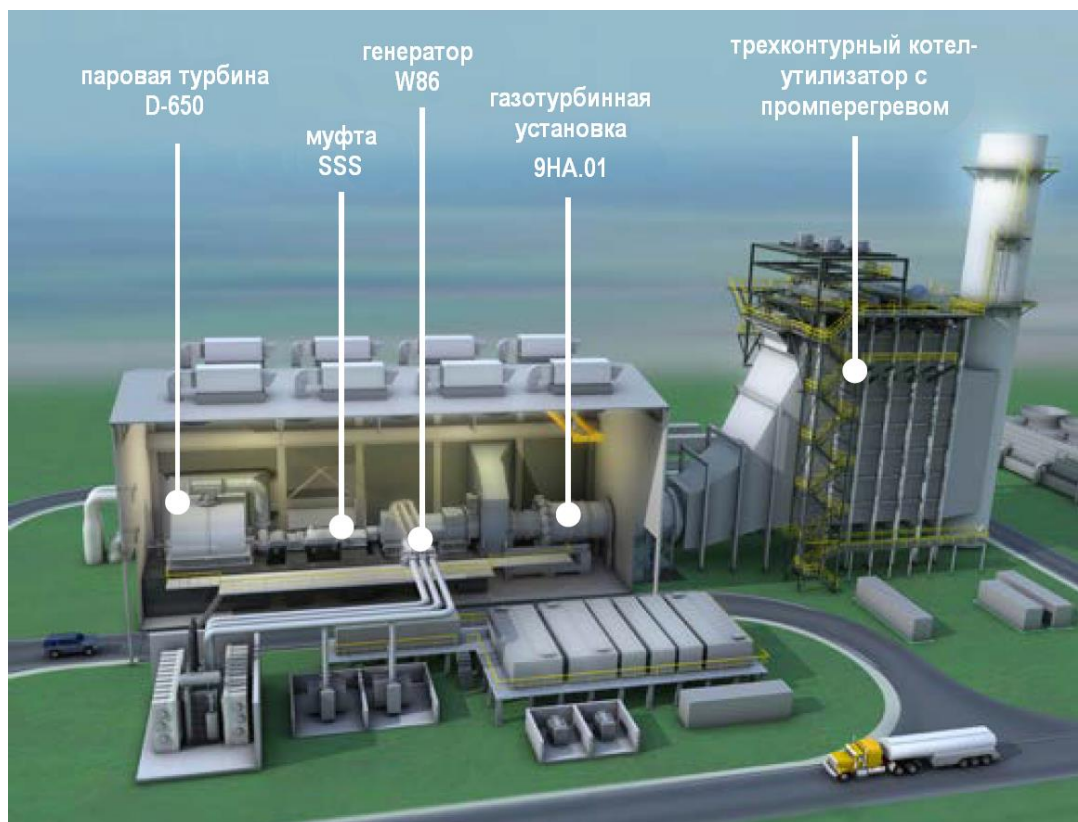


Рисунок 2 – Одновальная ПГУ с трехконтурным котлом-утилизатором [2]

Как и Siemens, General Electric также подчеркивает высокую маневренность своих установок комбинированного цикла на базе НА, которые, как сообщается, способны выйти на полную мощность менее чем за 30 минут, а также допускают глубокую разгрузку с приемлемыми выбросами в атмосферу [2].

В 2018 году Нагойская ТЭЦ в Японии внесена в Книгу рекордов Гиннеса как самая эффективная электростанция комбинированного цикла в сегменте 60 Гц, достигнув КПД 63,08 %.

Установка представляет собой многовальную ПГУ: на электростанции используется одна паровая турбина, поставленная Toshiba Energy Systems and Solutions Corporation, и три газотурбинные установки 7НА.01, поставленные General Electric Company. Три ГТУ GE 7НА.01 обеспечивают мощность более 1188 МВт.

Заключение

В настоящее время ГТУ GE НА приводят в действие самые эффективные электростанции в мире с частотой как 50 Гц, так и 60 Гц. 7НА может использоваться для широкого спектра газового и жидкого топлива, включая сжиженный природный газ (СПГ) и газ с высоким содержанием этана. Высокая маневренность ПГУ на базе этой ГТУ обеспечивает большую стабильность сети при использовании возобновляемых и альтернативных источников энергии.

При этом, отметим, что производители газотурбинных и парогазовых установок намереваются повысить экономичность своих ПГУ до 65 % уже в текущем десятилетии.

Литература

1. Dusseldorf's Lausward Power Plant Fortuna Unit Wins POWER's Highest Award [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.powermag.com/dusseldorfs-lausward-power-plant-fortuna-unit-wins-powers-highest-award/>. – Дата доступа 28.03.2024.
2. Powering a new record at EDF. 9НА.01 sets efficiency world record [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/products/gas-turbines/gea32885-bouchain-whitepaper-final-aug-2016.pdf/. – Дата доступа: 29.03.2024.

УДК 621.311

СОВРЕМЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН
MODERN STEAM TURBINE CAPACITORS

Г. Ю. Витецкая, А. И. Сироткин

Научный руководитель – Е. В. Пронкевич, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

G. Vitetskaya, A. Sirotkin

Supervisor – A. Pronkevich, Senior lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в современном мире уже изобретено множество оборудования, которое активно используется в энергетической промышленности. Конструктивные особенности у каждого свои. В нашей статье мы предлагаем провести сравнительный анализ некоторых из них, а также обратить внимание на особенности их устройства. Тема обсуждения – конденсаторы паровых турбин. Заранее можно отметить, что конструкция конденсаторов напрямую зависит от условий их эксплуатации, поэтому, несмотря на общие черты, все приведенные ниже устройства имеют свои особенности.*

***Abstract:** in the modern world, a lot of equipment has already invented, which is actively used in the energy industry. Each of them has its own design features. In our article, we propose to conduct a comparative analysis of some of them, as well as pay attention to the features of their device. The topic of discussion is steam turbine capacitors. It can be noted in advance that the design of capacitors directly depends on their operating conditions, therefore, despite the general features; all the devices listed below have their own characteristics.*

***Ключевые слова:** электрическая станция, конденсатор, модернизация, конденсат, турбина, отопительный отбор, отбор на регенерацию, энергетика.*

***Keywords:** electric station, capacitor, modernization, condensate, turbine, heating extraction, regeneration extraction, energy.*

Введение

Конденсатор – необходимая часть тепловой электростанции. В нем происходит конденсация пара, вышедшего из выхлопа ЦНД турбины, за счет его теплообмена с технической водой, циркулирующей внутри конденсатора [1]. После конденсации вода может вновь участвовать в цикле электростанции, пройдя систему регенеративного подогрева и очистку от коррозионно-агрессивных газов в деаэраторе. В этом заключается суть самого термодинамического цикла ТЭС, позволяющая использовать рабочее тело для выработки электроэнергии большое число раз.

Основная часть

Конденсаторы изготавливаются на заводах по производству паровых турбин и обычно идут в комплекте с самой турбиной. Однако со временем любое оборудование стареет, из-за чего возникает необходимость в его

реконструкции. Так, например, за последние 5–7 лет специалисты Уральского турбинного завода провели масштабную переработку конструкции выпускаемых на предприятии конденсаторов, которые придут на смену устаревшему оборудованию и будут устанавливаться с новыми турбинами [2].

Начнем с конденсаторной группы КГ2-6300. Ее внешний вид представлен на рис. 1. Данная группа состоит из двух конденсаторов К-3150. Особенности их строения заключаются в наличии как основных пучков для подачи воды, так и встроенного пучка. Данный тип конденсаторной группы можно считать модернизацией группы КГ2-6200. В ходе изменений была увеличена площадь поверхностного теплообмена, преобразовано паровое пространство конденсатора и изменен способ крепления водяных камер к корпусу. Результатом проведенных изменений стало повышение прочности конденсатора, а также улучшение его плотности. При минимальных нагрузках у этого конденсатора слишком малая деаэрирующая способность. Учитывая эту негативную особенность, при модификации конденсаторную группу вновь укомплектовали двумя сборниками конденсата. Сборники конденсата помогают минимизировать содержание кислорода в среде, что является важным фактором при работе конденсаторной группы. Для станций, которые работают не по тепловому графику, предусмотрено упрощение схемы в местах циркуляционных водоводов.

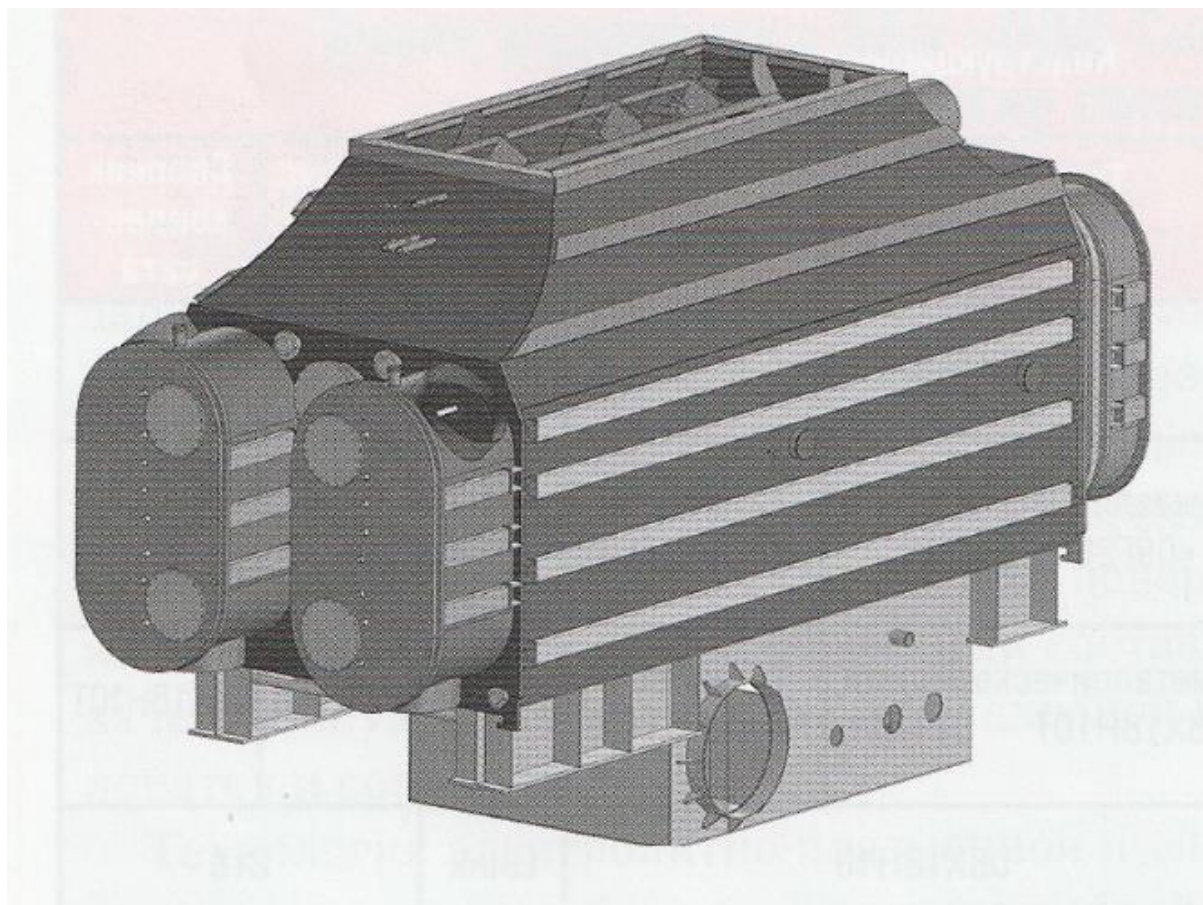


Рисунок 1 – Общий вид конденсаторной группы КГ2-6300 [2]

Еще один конденсатор, прошедший модернизацию – К-9500 – представленный на рис. 2. Несмотря на изменения в конструкции, во время его установки фундамент турбины не подвергается сильным изменениям, так как конденсатор устанавливается в специально установленную ячейку. Вместе с тем его установка имеет ряд сложностей. Во-первых, невозможность беспрепятственно транспортировать конденсатор. Транспортировке мешают его крупные размеры. Но эта проблема решается путем разделения конденсатора на пять блоков, которые после перевозки на место установки соединяют при помощи сварки. Во-вторых, нестандартной является сама схема расположения блоков конденсатора. На УТЗ обычно применяют вертикальный способ расположения блоков, но в К-9500 блоки расположены горизонтально в одной плоскости. Еще одна особенность этого конденсатора заключается в подключении двух паропроводов Ду1000 отопительного отбора и отбора на регенерацию. Для уменьшения нагрузки на крепления их проводят между выхлопной частью цилиндра низкого давления и самим конденсатором.

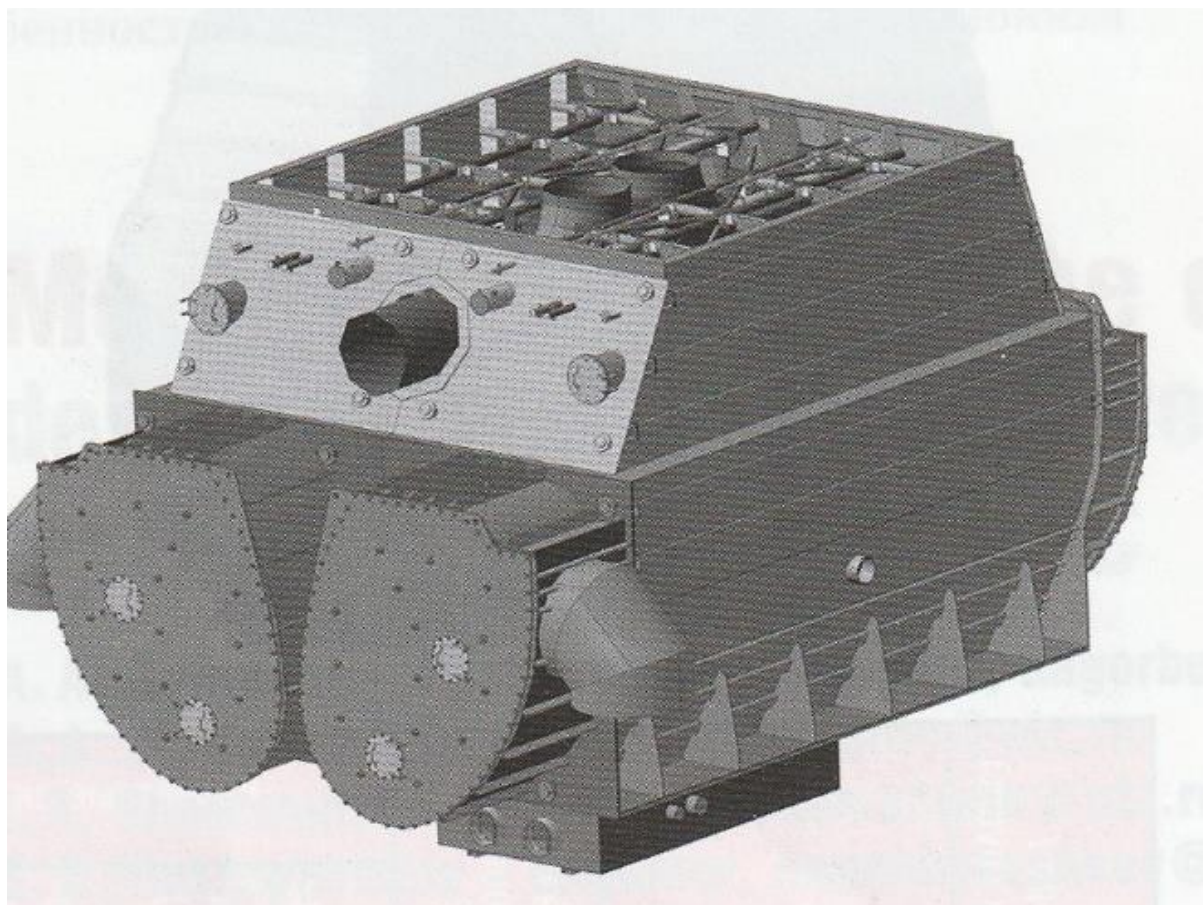


Рисунок 2 – Общий вид конденсатора К-9500 [2]

Для турбин типа Т и ПТ, работающих в режиме с «ухудшенным вакуумом» используют конденсаторы К-3100 и К-1900. Они также прошли модернизацию. В их конструкции предусмотрен встроенный сетевой подогреватель, который используют в зимний период для подогрева сетевой воды, когда нагрузка на теплофикационные отборы высокая [3]. Это позволяет

увеличить энергоэффективность работы турбоустановки и в некоторой степени снизить тепловые потери в конденсаторе.

В последние годы активно в России активно используются электростанции, расположенные в морских заливах. При таких условиях для конденсации пара уместно использовать в качестве технической воды морскую. Подобные электростанции распространены также в Китае, Индии, Франции, США. Уральский завод разработал новые типоразмеры конденсаторов, используемых на таких электростанциях. Примером таких конденсаторов являются модели К-1900-Im и К-3650-IIIм. Поскольку в соленой воде металл корродирует гораздо быстрее чем в пресной, большую часть морских конденсаторов приходится выполнять из коррозионностойких материалов. Для этого используют медно-никелевые сплавы и нержавеющую сталь.

Заключение

Таким образом, инженеры Уральского турбинного завода при модернизации конденсаторов паровых турбин придерживаются следующих тенденций:

- повышение энергоэффективности конденсаторов за счет разработки и внедрения новых конструкторских решений;
- сохранение высокой надежности конденсаторного оборудования;
- сохранение простоты обслуживания и ремонта модернизированных конденсаторов.

Это позволяет устанавливать обновленное оборудование не только на уже построенных электростанциях в ходе их реконструкции, но и на новых энергоблоках с новыми паровыми турбинами УТЗ.

Литература

1. Паровые и газовые турбины : учебник для вузов / А. М. Трубилов [и др.]; под ред. А. Г. Костюка, В. В. Фролова. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
2. Современные конденсаторы паровых турбин разработки и производства АО «Уральский турбинный завод» / А. А. Горбунов [и др.] // Турбины и дизели. – 2023. – № 5. – С. 44–48.
3. Баринберг, Г. Д. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода / Г. Д. Баринберг [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Бродова, В. В. Кортенко. – Екатеринбург, 2010. – 488 с.

УДК 621.165

**ТУРБОУСТАНОВКА TWIN CA56 GT7
TURBO INSTALLATION TWIN CA56 GT7**

В. В. Бакалова, В. Д. Лукьяненко

Научный руководитель – Н. В. Пантелей, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

V. Bakalova, V. Lukyanenko

Supervisor – N. Panteley, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в данной статье представлено техническое описание турбоустановки TWIN CA56 GT7 и ее принцип работы. Отдельно рассмотрен принцип управления и обслуживания данной турбиной во время работы. В заключении делается вывод о значимости внедрения турбоустановок немецкой компании «Сименс» для эффективной работы электростанции.

Annotation: this article provides a technical description of the TWIN CA56 GT7 turbine unit and its operating principle. The principle of control and maintenance of this turbine during operation is considered separately. In conclusion, the conclusion is made about the importance of the introduction of turbine installations of the German company Siemens for the efficient operation of the power plant.

Ключевые слова: паровая турбина, уплотнительные материалы, шкаф управления, маслосистема, дренажная система.

Key words: steam turbine, sealing materials, control cabinet, oil system, drainage system.

Введение

Турбины «Сименс» применяются как в качестве оборудования для выработки энергии, так и для механического привода насосов или компрессоров. В силу своей экономичности, надежности, огромного разнообразия турбин различных мощностей (от 12 до 250 МВт), а также широкого ряда моделей, турбины «Сименс» нашли широкое применение в промышленности, в том числе и на электростанциях. Далее в статье представлена подробная информация о турбине, эксплуатируемой на Могилевской ТЭЦ-1 (рис. 1).

Основная часть

Паровая турбина TWIN CA56 GT7 состоит из двух цилиндров: цилиндра высокого давления (ЦВД) и цилиндра низкого давления (ЦНД), каждый из которых посредством ротора и зубчатого колеса передает усилие на генератор. Основные параметры турбины TWIN CA56 приведены в табл. 1.



Рисунок 1 – Турбоустановка на Могилевской ТЭЦ-1

Таблица 1 – Основные параметры турбины TWIN CA56

Наименование параметра		Значение	Ед. Изм.
Электрическая мощность	номинальная	6,0	МВт
Частота вращения выходного вала редуктора	номинальная	1500	об/мин
Частота вращения, вызывающая срабатывание противоразгонной защиты	предельная	1650	об/мин
Расход пара на турбину	номинальный	40	т/ч
Давление свежего пара	номинальное	3,5	МПа
Температура свежего пара	номинальная	435,0	°С
Давление отработанного пара	номинальное	0,6	МПа
Температура отработанного пара	предельная	262,0	°С

ЦВД и ЦНД – одноступенчатые, активного типа. Свежий пар из главного паропровода поступает в сопловой аппарат через стопорный и регулирующие клапаны в ЦВД. Здесь пар расширяется, после чего направляется к рабочему колесу в радиальном направлении. Далее пар через пароперепускной паропровод отводится в ЦНД. На последнем предусмотрен импульсный предохранительный клапан. Отработанный пар из ЦВД поступает в сопловой аппарат через стопорный и регулирующие клапаны в корпус ЦНД. После расширения в соплах пар поступает к рабочему колесу в осевом направлении, после чего отводится через выхлопной патрубок и направляется в сетевые подогреватели. На паропроводе отработанного пара установлен импульсный предохранительный клапан. Таким образом, осуществляется преобразование тепловой энергии пара в кинетическую. За счет изменения направления потока на рабочих лопатках кинетическая энергия преобразуется в механическую. Роторы ЦВД и ЦНД вращаются по часовой стрелке относительно генератора, а ротор генератора вращается в противоположную сторону.

В качестве уплотнительных материалов вала ЦНД и ЦВД используют графитовые уплотнительные кольца. Их размещают в точке прохождения вала через корпус. Протечки пара отводятся в атмосферу, конденсат протечек – в безнапорный коллектор дренажей. Однако при использовании уплотнений из чистого графита возможно разуплотнение клапана и утечки воды. Данный эффект исчезает при температурном расширении после подогрева турбины.

Управление турбоустановкой осуществляется со «шкафа управления ТГ-3», представленного на рис. 3. Шкаф управления турбиной используют для основного управления на всех режимах работы. Блок приборов шкафа управления представлен на рис. 2, где 1 – активная мощность генератора; 2 – значение $\cos \varphi$; 3 – реактивная нагрузка генератора; 4 – ток обмотки U ; 5 – ток обмотки V ; 6 – ток обмотки W ; 7 – напряжение выбранной обмотки генератора (слева) и напряжение сети (справа); 8 – частота генератора (слева) и частота сети (справа); 9 – синхроскоп; 10 – указатель частоты вращения ведомого вала (вала ротора генератора); 11 – напряжение аккумулятора резервного питания. Ниже блока приборов расположен блок органов управления, еще ниже которого находится кнопка аварийного останова турбоагрегата, функцией которой является аварийный останов турбины. После нажатия кнопки для повторного запуска турбины кнопку необходимо вернуть в начальное положение при помощи ключа. Автоматические приборы регулирования и защиты турбины и генератора установлены на шкафу защиты. Текущие контролируемые параметры турбины, критерии готовности к пуску, уведомления об ошибках, сработавших сигнализациях и защитах, информация о параметрах режима консервации. Дополнительно турбиной можно ограниченно управлять с местного пульта управления, установленного около турбины. Местный пульт управления используют при проведении пуско-наладочных работ и для проверки защиты от разгона.

Турбина оснащена системой блокировок и автоматического ввода резерва (АВР) турбины, предназначенных для обеспечения безопасного

процесса эксплуатации, а также для исключения ошибочных действий оперативного персонала.

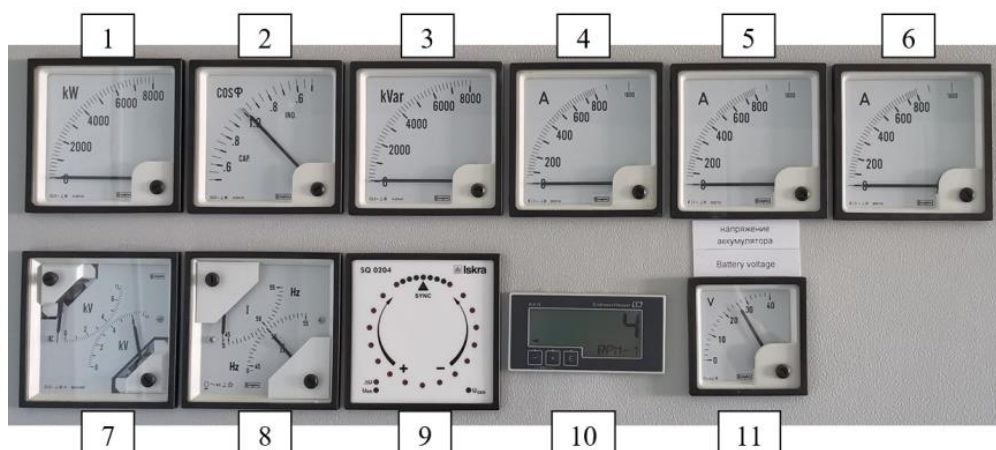


Рисунок 2 – Блок приборов шкафа управления ТГ-3



Рисунок 3 – Шкаф управления ТГ-3

Дренажные системы турбины предназначены для удаления из турбины и паропроводов конденсата в результате работы турбины. Дренажная система включает в себя дренажи ЦВД, ЦНД, дренажи паропровода острого пара (от главного паропровода до стопорного клапана), дренажи выхлопного паропровода.

Главный масляный насос (ГМН) установлен в корпусе редуктора. Он приводится в действие механически от вала ЦВД. ГМН предназначен для подачи масла в систему смазки и регулирования турбоагрегата. Пусковой масляный насос (ПМН) насос выполняет функцию ГМН во время пуска и останова, а также в случае неисправности ГМН, и работает от электродвигателя. Масляные фильтры предназначены для очистки масла во время эксплуатации, однако в одно время в работе находится только один из фильтров, переключение фильтров осуществляется вручную. Степень загрязненности фильтра можно определить визуально с помощью датчика перепада давления. Между маслофильтрами и редуктором турбоагрегата установлен электронный сигнализационный блок с двумя световыми индикаторами. При нормальном перепаде давления на фильтре (фильтр чистый) непрерывно горит зеленый индикатор. При увеличении перепада давления на фильтре выше допустимого (фильтр загрязнен) загорается красный индикатор. Для охлаждения масла до требуемой температуры предусмотрено 2 маслоохладителя. Единовременно в работу вводится только один из них, переключение осуществляется также вручную.

Параметры рабочей среды должны соответствовать строго установленным нормам, в противном случае превышение пределов установок может привести к выбросу рабочей среды в окружающее пространство, что в свою очередь может привести к тяжким увечьям персонала. Результатом повышения влажности пара и температуры являются значительные повреждения турбины и ее отдельных компонентов. Пар на входе в турбину при любых обстоятельствах должен быть абсолютно сухим ($x = 1$ на h_s -диаграмме). Несоблюдение требований к качеству пара может привести к образованию отложений в оборудовании, что отрицательно сказывается на регулировочных характеристиках турбины и на работе системы аварийного отключения.

Заключение

Обеспечение надежного и стабильного энергоснабжения с учетом необходимых требований по защите окружающей среды от негативных последствий производства – одна из основных задач в настоящее время. Немецкая компания «Сименс» как раз-таки и предлагает продукцию, характеризующуюся снижением выброса парниковых газов и отвечающую вышеуказанным требованиям.

Литература

1. Инструкция по эксплуатации турбоустановки TWIN CA56 CT. № 3 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kurs-na-energoeffektivnost/viewer/>. – Дата доступа: 15.04.2024.
2. Энергобезопасность и энергосбережение. Курс на энергоэффективность [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kurs-na-energoeffektivnost/viewer/>. – Дата до-ступа: 16.04.2024.

УДК 621.1; 62-637.8

**РАСПЫЛЕНИЕ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ
ГЕНЕРАТОРОМ ГАРТМАНА
SPRAYING OF HIGH-VISCOSITY LIQUID FUELS WITH
A HARTMANN GENERATOR**

А. В. Казейка

Научный руководитель – М. А. Ярмольчик, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

A. Kazeika

Supervisor – M. Yarmolchyk, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассмотрен принцип работы генератора Гартмана. Описано возникновение колебаний для возникновения звуковых и ультразвуковых волн.*

***Abstract:** this article discusses the principle of operation of the Hartmann generator. The occurrence of vibrations for the occurrence of sound and ultrasonic waves is described.*

***Ключевые слова:** излучатели, генератор Гартмана, трубка Пито, резонанс, колебания.*

***Keywords:** radiators, Hartmann generator, Pitot tube, resonance, vibrations.*

Введение

Возможность создания высокоинтенсивных колебаний в замкнутых трактах многоканальных систем представляет фундаментальный научный интерес, а применение этого явления были бы полезны в промышленности. Наиболее хорошо изучены механические и газоструйные генераторы. Принципиально иной способ генерации колебаний – газоструйные излучатели, где источником энергии является кинетическая энергия газовой струи. Рабочим телом таких устройств является газ, а динамические процессы, происходящие в газовой среде, лежат в основе работы многих систем.

Работа генераторов основана на механическом перекрытии потока газа, а принцип действия заключается в колебаниях, которые возникают в результате взаимодействия струи с препятствием, которое не рассчитывается.

Основная часть

Исследование генераторов Гартмана началось с открытия Юлием Гартманом эффекта в резонирующих системах, названных в его честь. Эффект Гартмана может быть легко продемонстрирован в эксперименте: направлением сжатого воздуха в открытый конец металлического цилиндра (рис. 1).

Основная часть генератора – сопло 1, откуда вытекает сверхзвуковая газовая струя, в которой возникают волны уплотнения и разрежения. Если соосно с соплом поместить на некотором расстоянии резонатор 2, то при торможении струи перед резонатором возникает отсоединенный скачок

уплотнения 3. В результате взаимодействия основной струи и струи, вытекающей из резонатора, при определенном расстоянии между соплом и резонатором участок струи за скачком становится источником звуковых и ультразвуковых волн. [1]

Этот эффект был обнаружен в 1918 году во время экспериментов со сверхзвуковыми струйными потоками. Когда экспериментатор помещал трубку Пито в определенную область струи, возникали сильные колебания. Гартман понял, что частота колебаний связана с геометрией трубки Пито, а зоны струи, где происходил «резонанс», названы областями неустойчивости. За пределами этих областей поток воспринимал трубку Пито как препятствие, но не как резонатор. Дальнейшие работы с более глубокими полостями привели к лучшему пониманию резонансного эффекта Гартмана и причин его возникновения. Наиболее благоприятные условия в отношении излучения в том случае, когда диаметр выходного отверстия сопла D , диаметр отверстия резонатора d и его длина l равны между собой ($D = d = l$) [2].

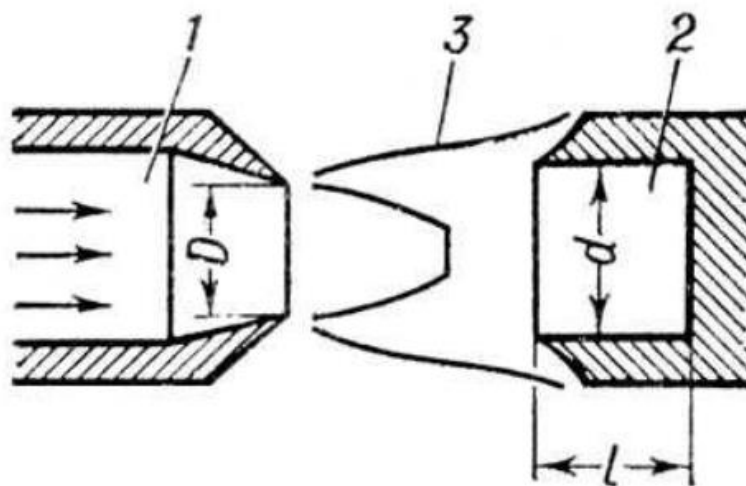


Рисунок 1 – Генератор Гартмана

Изменение давления вдоль высокоскоростной воздушной струи, создаваемое давлением от 0,9 до 5 атм. превышение нормы определяли с помощью простой трубки Пито и определяли периодические интервалы.

Форма колбы. Когда маленькое отверстие колбы помещается в один из этих промежутков так, что частицы воздуха входят в отверстие и выходят из него, возникают пульсации, подобные звукам сирены, при этом звуки не являются чистыми. Основная частота зависит от объема колбы, размера отверстия и положения в струе и может легко изменяться от 1/10 до 5000 в секунду.

Цилиндрическая форма. Когда простой цилиндрический резонатор помещается одним концом в интервал неустойчивости, получаются чистые тона, за исключением определенных положений, где могут присутствовать обертоны. Частота является основной для резонатора и может достигать 125 000 колебаний в секунду при использовании очень короткой трубки, около 0,5 мм, длина и диаметр отверстия. При использовании водородной струи частоты, конечно,

в 3,8 раза выше. Эффективность таких источников поразительна, они легко достигают невероятной интенсивности.

Заключение

В заключение можно сказать, генератор Гартмана – одна из разновидностей газоструйного излучателя звуковых и ультразвуковых волн. Используется для интенсификации процессов теплообмена и массообмена в УЗ-поле, для коагуляции аэрозолей, пеногашения, распыления жидкостей и т. д. [3].

Особенности течений при работе Гартмановских генераторов вызывают интерес как с научной, так и с прикладной точки зрения, а принцип его работы ложится в основу прогрессивных технологий в разных областях.

Актуальность проблемы обусловлена необходимостью исследования волновых взаимодействий, происходящих в тракте многоканальных систем. Особенность исследуемой в представленной работе многоканальной системы в ограниченности канала, в котором формируется газодинамический поток. Ограниченность тракта системы выгодно отличает систему от классического генератора Гартмана.

Литература

1. Физическая энциклопедия [Электронный ресурс] / Гартмана генератор. – Режим доступа: <https://rus-physical-enc.slovaronline.com/519-ГАРТМАНА%20ГЕНЕРАТОР>. – Дата доступа: 07.04.2024.
2. Aps [Электронный ресурс] / On a New Method for the Generation of Sound-Waves. – Режим доступа: <https://journals.aps.org/pr/abstract/>. – Дата доступа: 07.04.2024.
3. Википедия [Электронный ресурс] / Генератор Гартмана. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генератор_Гартмана. – Дата доступа: 07.14.2024.

УДК 66.042

ОСОБЕННОСТИ И УСТРОЙСТВО КОЛПАКОВОЙ ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ

FEATURES AND CONSTRUCTION OF THE VACUUM HOOD FURNACE

А. С. Шенец

Научный руководитель – И. Л. Иокова, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

A. Shenets

Supervisor – I. Iokova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассмотрены особенности, принцип действия и устройство колпаковой вакуумной печи.*

***Abstract:** this article considers the features, principle of operation and device of the vacuum hood furnace.*

***Ключевые слова:** колпаковая вакуумная печь, термообработка, термообработка в вакууме, автоматика, энергосбережение*

***Keywords:** vacuum hood furnace, heat treatment, vacuum heat treatment, automation, energy saving.*

Введение

Колпаковая вакуумная печь – это экологически безвредное устройство, предназначенное для осуществления разнообразных термических операций в вакууме при $t \leq 1500$ °С. Также возможна работа в среде инертных газов высокой чистоты при избыточном давлении, не превышающем 0,2 бар, и также в токе осушенного водорода при $t \leq 1300$ °С [1].

Основная часть

Данные печи имеют следующие преимущества:

- высокая чистота поверхности благодаря отсутствию процесса окисления и реакций с другими газами;
- отсутствие температурных напряжений из-за чего не изменяются форма и размеры садки;
- за счет равномерного распределения тепла улучшается структура материала;
- вакуум увеличивает скорость протекания процесса и снижает время термообработки, что обеспечивает экономию энергетических ресурсов.

В свою очередь, колпаковые высокотемпературные установки применяются при дегазации, закалке стали для инструментов, литье керамики под давлением, алитировании лопаток турбин и лопастей, диффузионном склеивании лопаток турбовентиляторов, насыщении углеродом деталей систем впрыска и других сферах деятельности промышленности.

Создание крупных высокотемпературных вакуумных колпаковых печей сопровождается определенными трудностями, такими как конструирование нагревателей, компоновка системы откачки и безопасность в эксплуатации оборудования.

В конструкции печи (рис. 1) колпак совместно с нагревателем является подвижным и вертикально перемещающимся элементом, расположенным в вакуумно-плотном каркасе, при этом колпак включает в себя водоохлаждаемый корпус, верхнюю крышку с токоприемником и совокупность необходимых датчиков.



Рисунок 1 – Конструкция колпаковой вакуумной печи

Во время загрузки заготовки колпак поднимается при помощи гидравлического устройства. После загрузки происходит опускание колпака на стол и его фиксация посредством замков.

В печь встроена двухконтурная система охлаждения жидкостного типа H_2O/H_2O (в первом контуре циркулирует химически чистая (дистиллированная) вода, а во втором контуре – жидкость из охлаждающей системы предприятия).

Автоматика вакуумной печи позволяет управлять температурой, давлением и другими параметрами процесса, обеспечивая безопасную и бесперебойную работу оборудования. В программе управления печью предусмотрены различные режимы работы (ручной, полуавтоматический и автоматический), что позволяет оператору детально контролировать процесс вакуумной термообработки материалов на каждой стадии [2].

Установленное программное обеспечение (ПО) обеспечивает ряд функций:

- регулирование температуры по пропорционально-интегрально-дифференцирующему закону с системой самоконтроля;
- хранение необходимых данных в энергонезависимой памяти;
- контролирование состояния вакуума для безопасной эксплуатации;
- сигнализация об авариях;

- поддержание безопасных значений параметров для предотвращения повреждений оборудования;
- использование специальных датчиков для измерения вакуума;
- подключение модуля архивации для обмена данными о температуре и давлении (рис. 2).

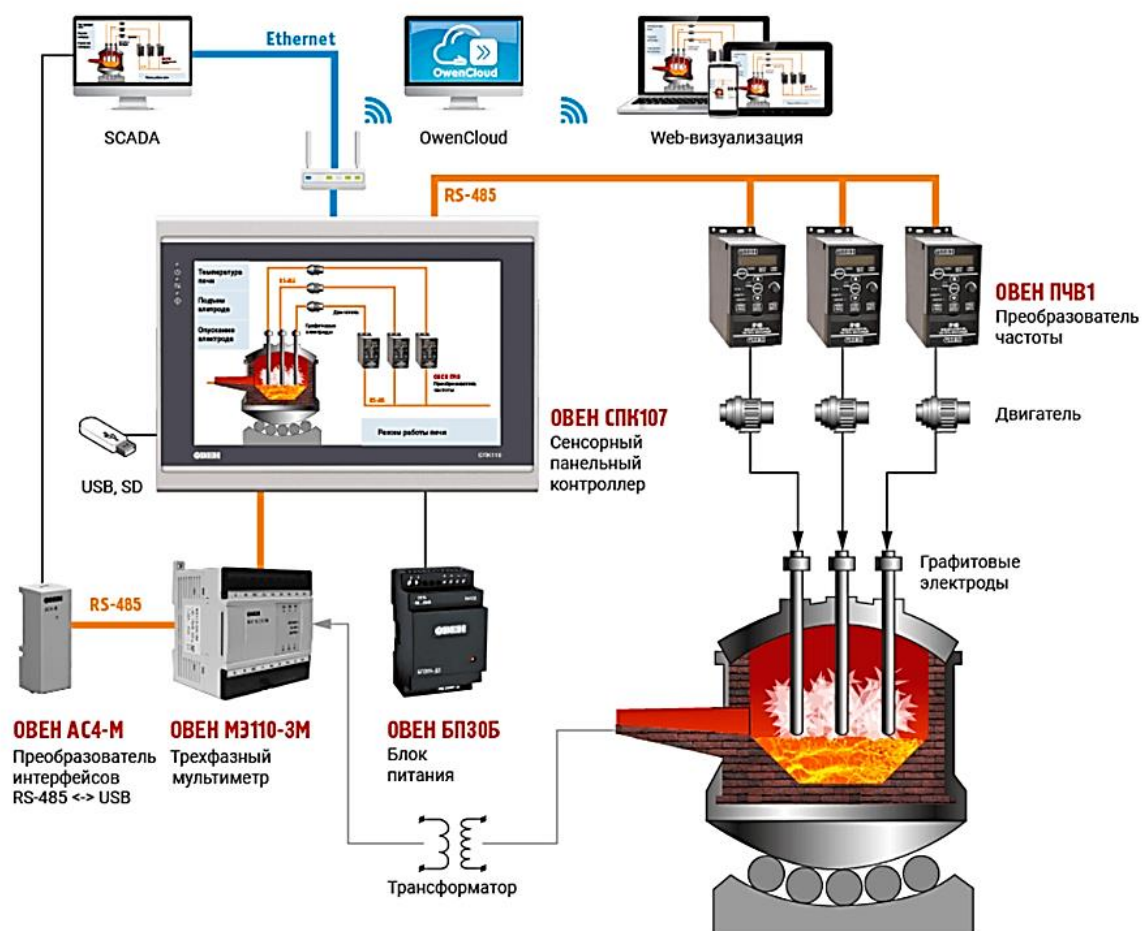


Рисунок 2 – Автоматика печи

Минимально возможное рабочее давление достигается в вакуумных печах, у которых изоляция выполнена из металлов [3].

Используемые в топочной камере материалы, характеризуются минимальным давлением паров при самых высоких температурах. Это означает, что максимальная рабочая температура может быть достигнута без риска возникновения разрушительных реакций между материалом нагревательного элемента и изоляцией печи. Также печь изолирована радиационным экраном из того же материала, что и нагревательный элемент.

Заключение

Термообработка различных металлических изделий в вакууме получила широкое распространение во многих секторах промышленности, так как представляет собой практичную и универсальную технологию, являющейся в определенных ситуациях безальтернативной.

Колпаковые печи имеют модульную систему, которая помогает снабдить ее добавочными стендами, генераторами, вырабатывающими N_2 и O_2 , внутренним теплообменником, машиной для мойки, разнообразными специальными элементами и функциональными модулями в совокупности с системами управления.

Литература

1. Колпаковые вакуумные печи [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://istra-vniieto.ru/kolpakovye-vakuumnye-pechi/>. – Дата доступа: 16.04.2024.
2. Технические характеристики вакуумных колпаковых печей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tula-term.ru/products/vakuumnoe-oborudovanie/kolpakovye-vakuumnye-pechi-sgv/>. – Дата доступа: 16.04.2024.
3. Лейканд, М. С. Вакуумные электрические печи / М. С. Лейканд. – Москва : Энергия, 1968. – 328 с.: ил.

УДК 621.57

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ
ELECTROMAGNETIC REFRIGERATION UNITS**

А. П. Каменко, Е. А. Русакевич

Научный руководитель – З. Б. Айдарова, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

А. Kamenko, E. Rusakevich

Supervisor – Z. Aidarova, Senior Lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: изучение процесса магнитного охлаждения, в котором в качестве хладагента используются твердые материалы, такие как соединения гадолиния с кремнием и др.

Abstract: the study of the magnetic cooling process, in which solid materials such as gadolinium compounds with silicon, etc. are used as a refrigerant.

Ключевые слова: магнитокалорический эффект, магнитное охлаждение, компрессорное охлаждение, теплопередача.

Keywords: magnetocaloric effect, magnetic refrigeration, compressor refrigeration, heat transfer.

Введение

Магнитное охлаждение представляет собой передовую технологию, способную произвести революцию в системах охлаждения. Основанная на концепции магнитокалорического эффекта, она обеспечивает превосходную энергоэффективность и экологическую чистоту по сравнению с традиционными методами охлаждения.

Принцип магнитного охлаждения – магнитокалорический эффект – представляет собой явление, при котором температура материала изменяется под воздействием магнитного поля. Впервые этот эффект был замечен в начале XX века, но в последние годы он привлек к себе значительное внимание благодаря перспективному применению в холодильных системах [1].

Основная часть

Впервые данный эффект наблюдал в 1881 году немецкий физик Эмиль Варбург, затем французский физик П. Вейс и швейцарский физик А. Пиккар в 1917 году. Фундаментальный принцип был предложен П. Дебай (1926) и В. Гиаук (1927). Первые работающие магнитные холодильники были построены несколькими группами начиная с 1933 года. Магнитное охлаждение было первым методом, разработанным для охлаждения ниже 0,3 К (температура, достижимая при накачке паров ^3He) [2].

На рис. 1 показано как гадолиниевый сплав нагревается в магнитном поле и теряет тепловую энергию в окружающую среду, поэтому, выходя из поля, он становится холоднее, чем при входе в него.

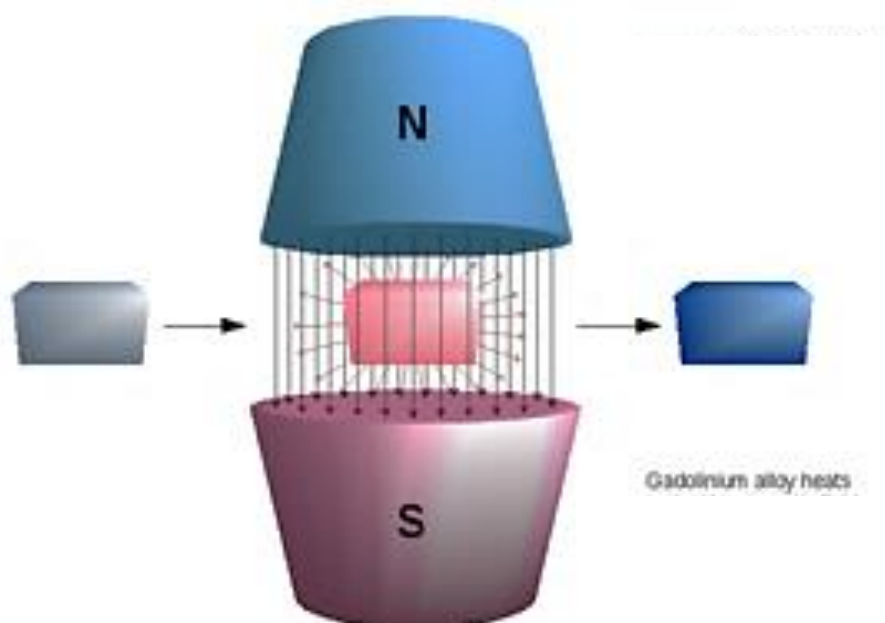


Рисунок 1 – Магнитное охлаждение гадолиниевого сплава [2]

Основным термодинамическим циклом электромагнитной холодильной установки является цикл Эрикссона, который работает между двумя адиабатическими и двумя изомагнитными линиями поля. Магнитную холодильную систему можно разделить на четыре основных этапа (рис. 2). Температура горячего и холодного теплообменников оказывает большое влияние на производительность холодильника [3].

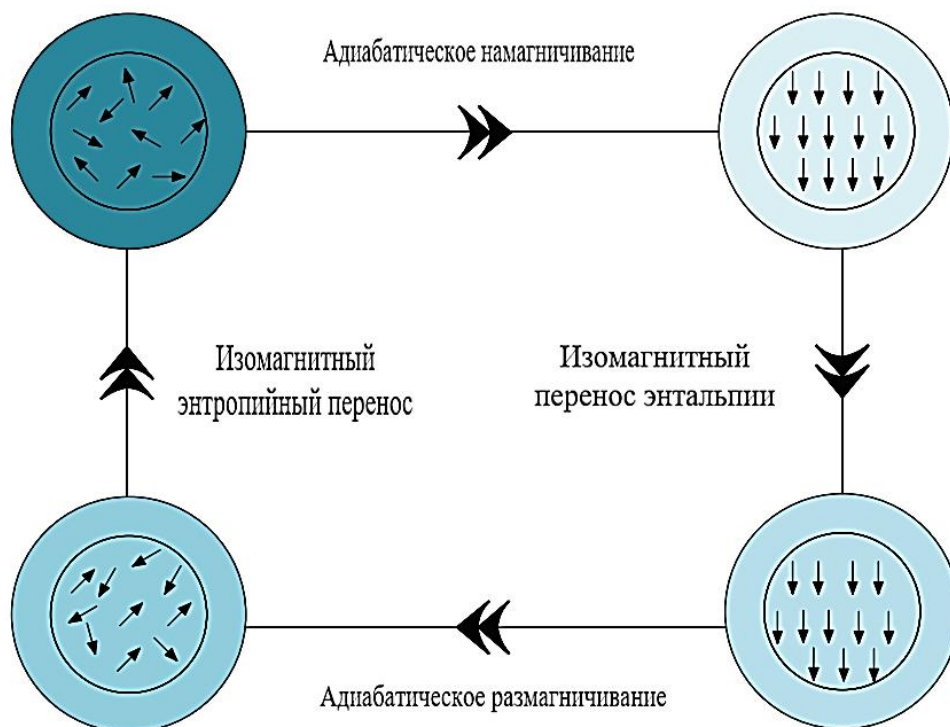


Рисунок 2 – Термодинамический цикл электромагнитной холодильной установки [3]

Адиабатическое намагничивание: магнитокалорический материал, если его поместить в изолированную среду ($Q = 0$) и увеличить внешнее магнитное поле ($+H$), заставляет магнитные диполи атомов выравниваться, тем самым уменьшая магнитную энтропию и теплоемкость материала.

Изомагнитный перенос энтальпии: магнитное поле поддерживается постоянным в течение этого процесса ($H = 0$), а тепло, полученное во время адиабатического намагничивания, отводится ($-Q$) жидкостью или газообразным веществом, чтобы предотвратить повторное поглощение тепла диполями.

Адиабатическое размагничивание: вещество возвращается к другому адиабатическому процессу ($Q = 0$), и, следовательно, общая энтропия остается постоянной. Однако на этот раз магнитное поле уменьшается, тепловая энергия заставляет магнитные моменты преодолевать поле, и таким образом образец охлаждается, т. е. происходит адиабатическое изменение температуры.

Изомагнитный энтропийный перенос: магнитное поле поддерживается постоянным, чтобы предотвратить обратный нагрев материала.

Источниками магнитного поля, которые могут быть использованы в магнитокалорических устройствах, являются постоянные магниты и электромагниты. Исходя из теории, магнитные холодильные системы можно разделить на холодильные системы с движущимися частями (роторные, линейные) и без движущихся частей. В качестве магнитокалорической суспензии в данной машине используется рабочая жидкость.

Преимущества электромагнитных холодильных систем:

- экологичность – используемый хладагент твердый и нелетучий, а значит, не имеет парникового эффекта. В обычных установках используются хладагенты, содержащие фреон или гексафреон, которые связаны с разрушением озонового слоя и глобальным потеплением. Некоторые хладагенты, например, аммиак, токсичны и огнеопасны;

- низкие эксплуатационные расходы – в магнитных холодильных установках отсутствует компрессор, который является самой неэффективной и дорогостоящей частью. Это приводит к меньшему потреблению энергии и, следовательно, к низким эксплуатационным расходам;

- высокая эффективность – благодаря отсутствию необходимости расширения и сжатия жидкости магнитный холодильник потребляет меньше энергии и может работать с эффективностью порядка 60 %;

- надежность – более компактное устройство с меньшим количеством движущихся частей по сравнению с традиционными системами;

- бесшумная работа – данный тип установок работает значительно тише, чем традиционные холодильные системы;

- компактность – возможно достижение высокой энергетической плотности компактным устройством. Это связано с тем, что в магнитном холодильнике рабочим веществом является твердый материал (например, гадолиний), а не газ, как в парокомпрессионных циклах;

Недостатки электромагнитных холодильных систем:

- первоначальные инвестиции очень высоки по сравнению с традиционным охлаждением;
- магнитокалорические материалы являются достаточно редкими для массового использования;
- защита электронных компонентов рядом стоящего оборудования от магнитных полей. Однако следует отметить, что данные поля статичны, имеют малый радиус действия и могут быть экранированы;
- постоянные магниты имеют ограниченную силу поля, а электромагниты и сверхпроводящие магниты очень дороги;
- температурные изменения ограничены. Многоступенчатые машины теряют эффективность из-за теплообмена между ступенями;
- холодильные системы с движущимися частями требуют высокой точности, чтобы избежать уменьшения магнитного поля из-за зазоров между магнитами и магнитокалорическим материалом [3].

Заключение

Несмотря на многочисленные преимущества магнитного охлаждения, прежде чем оно получит широкое распространение, необходимо решить несколько проблем. Во-первых, очень важно найти подходящий магнитокалорический материал – эффективный и доступный по цене. Во-вторых, технология требует сильных магнитных полей, которые могут оказаться достаточно дорогими и сложными для поддержания.

Однако исследователи прилагают все усилия, чтобы преодолеть эти препятствия. В настоящее время ведутся исследования по открытию новых магнитокалорических материалов, работающих в различных температурных диапазонах, включая комнатную температуру. Кроме того, предпринимаются усилия по оптимизации конструкции магнитных холодильных систем, чтобы сделать их более практичными и экономически эффективными.

Магнитное охлаждение представляет собой убедительное видение будущего систем охлаждения. Благодаря присущей ему энергоэффективности и экологическим преимуществам, оно способно заменить традиционные методы охлаждения. Несмотря на то, что на пути к широкому распространению этой технологии остаются нерешенные проблемы, проводимые исследования и разработки вселяют оптимизм. По мере того как мы все больше осознаем, что потребляем энергию и влияем на окружающую среду, такие технологии, как магнитное охлаждение, несомненно, будут приобретать все большее значение.

В условиях глобального потепления и острой необходимости экономии энергии можно с уверенностью сказать, что магнитное охлаждение – это не просто интересная концепция, оно может стать важной частью нашего устойчивого будущего.

Литература

1. Refrigeration industry [Электронный ресурс] / Magnetic Cooling. – Режим доступа: <https://refindustry.com/articles/articles/magnetic-cooling/>. – Дата доступа: 31.03.2024.
2. Wikipedia [Электронный ресурс] / Magnetic refrigeration. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_refrigeration. – Дата доступа: 31.03.2024.
3. Dorin, B. The efficiency of magnetic refrigeration and a comparison with compressor refrigeration systems / B. Dorin, J. Avsec // Journal of energy technology, 2018. – 70 p.

УДК 620.91

**УВЕЛИЧЕНИЕ КПД СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ
INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS**

Д. В. Ридель, А. В. Чернушевич

Научный руководитель – И. Н. Прокопеня, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

D. Ridel, A. Chernushevich

Supervisor – I. Prokopenya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются способы по увеличению КПД солнечных панелей с помощью современных методов.*

***Abstract:** this article discusses ways to increase the efficiency of solar panels using modern methods.*

***Ключевые слова:** солнечная панель, инновационные материалы.*

***Keywords:** solar panel, innovative materials.*

Введение

Классические солнечные панели на основе кремния имеют небольшой КПД – 20–25 %. Поэтому солнечные электростанции не могут конкурировать с традиционными электростанциями, работающими на сжигании топлива. В связи с этим ученые по всему миру ищут способы по увеличению КПД солнечных панелей.

Основная часть

Весомым преимуществом галлий-арсенидных элементов служит возможность добавления различных примесей для улучшения характеристик панелей. Так, к примеру, одной из самых энергопроизводительных комбинаций является применение трехслойной структуры, состоящей из германия, арсенида галлия и фосфида индия-галлия. Солнечная панель с такими кристаллами имеет ряд преимуществ: теоретический КПД почти вдвое выше, чем у кристаллического кремния, значительно меньшая толщина фотоэлектрических преобразователей, что позволяет делать тонкопленочные солнечные элементы, хорошая термостойкость (максимальная рабочая температура до +150 °С), высокая чувствительность при низком освещении. Недостатком является высокая стоимость из-за дорогих материалов и сложной технологии производства.

Российские ученые нашли вариант, который позволяет решить эту проблему. Они предлагают подобрать химические элементы так, чтобы оптика солнечной панели была максимальной. После долгих поисков вариантов они остановились на квартете: галлий – фосфор – нитрит – мышьяк. Исследователи подсчитали, что КПД такой панели составит около 40 %.

Ученые из университета Райса создали пленку из нанотрубок, способную поглощать отходящее тепло и превращать его в свет. Этот свет необходимо собрать с помощью фотоэлектрического элемента и превратить в электрическую

энергию. Вопреки логике, здесь добавление дополнительного этапа преобразования на самом деле повышает КПД, поскольку позволяет получить энергию от фотонов на частотах, которые обычно уходят впустую. По их расчетам, при преобразовании всей тепловой энергии с помощью нанотрубок можно увеличить КПД до 80 %.

Как известно, большая часть, более 44 %, солнечной энергии приходится на инфракрасный спектр в области с длиной волны от 0,75 до 3 мкм. Именно поэтому основная часть энергии в существующих солнечных элементах на основе кристаллического кремния не используется при преобразовании в электрическую энергию. Чтобы увеличить преобразование излучения в электрическую энергию можно создать примесную электрическую зону в кристаллах кремния. Существуют специальные методы легирования, которые позволяют создать условия для формирования наноразмерных кластеров марганца в решетке кремния. Этот метод основан на диффузии, когда температура плавно повышается до необходимой. Таким образом, кремний не разрушается, исключается эрозия поверхности кристалла и обеспечивается максимальное участие атомов марганца в образовании кластеров. Таким образом, при изготовлении солнечных элементов на основе кремния с наноразмерными кластерами и структурами, они будут иметь в условиях солнечного освещения КПД более 40 %.

Заключение

Таким образом, современные научные разработки и технологии позволяют значительно увеличить КПД солнечных панелей и сделать их более конкурентоспособными. Замена кремния на арсенид галлия, использование нанотрубок и создание примесных электрических зон в кристаллах кремния – все это позволяет улучшить эффективность солнечных элементов и повысить получение электрической энергии. Российские и зарубежные ученые активно работают над разработкой новых технологий, которые могут изменить отношение к солнечным электростанциям и сделать их более доступными и эффективными. В перспективе, возможно, мы увидим полноценную революцию в области солнечной энергетики и переход к более экологически чистым и эффективным источникам энергии.

Литература

1. Увеличение КПД солнечной панели [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://surl.li/szmlh/>. – Дата доступа: 26.04.2024.
2. Использование нанотрубок [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://news2.rice.edu/2019/07/12/rice-device-channels-heat-into-light/>. – Дата доступа: 26.04.2024.
3. Нанокластеры марганца [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://surl.li/sznfb>. – Дата доступа: 26.04.2024.

УДК 66.042

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ
MODERNISATION OF THERMAL FURNACES
IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

П. Д. Кагочкин

Научный руководитель – И. Л. Иокова, к. т. н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

P. Kagochkin

Supervisor – I. Iokova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассмотрены достижения в области модернизации термических печей в Республике Беларусь.*

***Abstract:** this article reviews the achievements in the modernisation of thermal furnaces in the Republic of Belarus.*

***Ключевые слова:** термическая печь, ресурсосбережение, энергосбережение, эффективность, модернизация.*

***Keywords:** thermal furnace, resource saving, energy saving, efficiency, modernization.*

Введение

Всякий раз, когда речь заходит об инженерных отраслях, таких как строительство, энергетика и промышленное производство, становится ясно, что развитие в них невозможно без постоянного усовершенствования оборудования и материалов, используемых в процессе работы.

Кроме получения новых материалов возможно улучшать качество уже давно применяемых в инженерном деле. Ведущую роль здесь занимают такие высокотемпературные теплотехнологические процессы как термическая обработка металлов (в частности – стали). Изменения внутренней структуры материалов делают их более пригодными для различных видов деятельности. Например, в строительстве применяют закалку металлических опорных конструкций для улучшения их механических свойств. В энергетике же прибегают к таким термическим операциям как закалка и отжиг с целью повышения качества металла при изготовлении котлов и прочего энергетического оборудования, применяемого на котельных и тепловых станциях, что обеспечивает большую устойчивость к высоким температурам и давлениям.

Термическая обработка производится в специальных высокотемпературных теплотехнологических установках – термических печах. Современные термические печи – это сложные устройства, предназначенные для нагрева и термической обработки различных материалов. Сложная и многообразная технология промышленного производства накладывает серьезные требования на работу и организацию температурного режима печного

оборудования, включая правильное составление и контроль режима тепловой обработки [1].

Основная часть

В настоящее время кроме вопросов ресурсосбережения и энергосбережения, которые никогда не теряют своей актуальности, стратегически важным становится сохранение работоспособности энергетического оборудования белорусских промышленных предприятий, а также, при наличии такой возможности, улучшение качества их работы с максимальным продлением срока службы. Этот вопрос решает разработка мер по модернизации оборудования.

Модернизация термических печей включает в себя улучшения с целью повышения эффективности, безопасности, экономичности и удобства использования. На промышленных предприятиях Республики Беларусь регулярно проводятся мероприятия по модернизации существующего парка промышленных печей, а также разрабатываются новые методики для реализации новых проектов.

При модернизации важно учитывать специфику производственного процесса и нужды конкретного предприятия. Так, например, для печей, используемых в пищевой промышленности, важно обеспечить соблюдение стандартов безопасности и гигиены, а также равномерность нагрева для сохранения качества продукции. В то же время, в металлургической отрасли модернизация может включать в себя увеличение производительности, сокращение времени цикла нагрева и улучшение условий окружающей среды. В машиностроении для производства и обработки качественных и доступных металлических изделий требуются усовершенствования в области проектирования термических печей. Это приводит к увеличению требований по отношению к технологии нагрева и конструкции печей. На основе сформулированных требований также разработаны методики подбора огнеупорных и теплоизоляционных материалов, позволяющих уменьшить теплопотери в окружающую среду. Также проведены исследования в области режимов эксплуатации печей, что позволяет получить более качественную продукцию на выходе из печи.

Еще одним примером модернизации термических печей может быть печь с интегрированной системой рециркуляции газов, позволяющая повысить эффективность процесса сгорания и сократить выбросы вредных веществ. Такие технологии помогают улучшить экологическую устойчивость производства и соответствовать современным стандартам охраны окружающей среды.

Кроме всего прочего в научной литературе отмечается, что исследования в области процессов горения в значительной степени расширили потенциал горелочных устройств как в области использования технического оборудования, так и в сборке их комплектующих элементов. Особое внимание уделяется автоматизированному импульсному отоплению, возможности автоматического розжига, контролю пламени с индивидуальными запорными

и регулируемыми органами, а также высокотемпературному подогреву воздуха [2].

Текущие требования к автоматизации горелочных устройств и управлению тепловыми режимами печей также претерпели значительные изменения. Среди них можно выделить применение быстродействующих управляющих устройств для горелок с импульсным отоплением, передовых цифровых регуляторов, использование контроллеров с расширенными возможностями программного управления и создание эффективной информационной базы для поддержки работы печей.

Одним из наиболее успешных примеров улучшения качества работы термической печи является модернизация газовой камерной термической печи на Барановичском станкостроительном заводе ЗАО «Атлант» (рис. 1). Данная печь на протяжении более 20 лет выполняла функции, рассчитанные на массу садки 15 тонн с установленной мощностью 2,3 МВт и КПД в пределах 8–10 %. Процесс модернизации основан на детальном теплофизических расчетах и проектных решениях, разработанных Институтом тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.



Рисунок 1 – Модернизированная камера термической печи

Основным изменением в результате модернизации стала новая система автоматического управления, обеспечившая значительное улучшение равномерности и качества нагрева. После проведенных изменений тепловая мощность печи была снижена с 2300 до 700 кВт, а электрическая мощность – с 85 до 10 кВт, что позволило достичь КПД в размере 46 % при номинальной массе садки 15 тонн. Удельный расход топлива уменьшился в 3–4 раза в зависимости от режима работы. Новые конструктивные решения предоставили печи возможность осуществлять термическую обработку садки массой до 25 тонн. Равномерность температурного поля в рабочей камере печи в течение всего процесса нагрева составила ± 5 °С, что гораздо превышает средние показатели эксплуатационного оборудования текущего времени. Приведенные изменения подчеркивают значительный потенциал энергосбережения, который вкладывается в процесс модернизации печного оборудования [3].

Заключение

Модернизация белорусских термических печей на основе современных критериев позволяет отказаться от приобретения нового печного оборудования и достичь высокого ресурсосбережения. Разработанные методики позволили значительно увеличить эффективность работы высокотемпературной теплотехнологической установки и могут быть применены для дальнейшей модернизации парка термических печей, которые давно находятся в эксплуатации. Для достижения дальнейших высоких результатов необходимо непрерывно стимулировать рост научных и технологических достижений в данной области.

Литература

1. Несенчук, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла: учебное пособие для политехнических и машиностроительных вузов по машиностроительным и энергетическим специальностям / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин. – Минск : Вышэйшая школа, 1974. – 160 с.
2. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике (проблемные вопросы) [Электронный ресурс] / Репозиторий БНТУ. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/18053/%D0%A1.%2021-28.pdf?sequence=1>. – Дата доступа: 11.04.2024.
3. Модернизация парка промышленных печей [Электронный ресурс] / Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modernizatsiya-parka-promyshlennyh-pechey.pdf>. – Дата доступа: 11.04.2024.