

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Энергетический факультет

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

Материалы  
78-й научно-технической конференции  
студентов и аспирантов

*Апрель 2022 г.*

Минск  
БНТУ  
2022

УДК 621.311  
ББК 31я43  
А43

**Редакционная коллегия:**

Пономаренко Евгений Геннадьевич – декан энергетического факультета БНТУ, кандидат технических наук, доцент.

Седнин Владимир Александрович – заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», доктор технических наук, профессор.

Карницкий Николай Борисович – заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции», доктор технических наук, профессор.

Фурсанов Михаил Иванович – доктор технических наук, профессор.

**Составитель:**

Жуковская Татьяна Евгеньевна – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электроника» БНТУ.

В сборник включены материалы 78-й научно-технической конференции студентов и аспирантов БНТУ «Актуальные проблемы энергетики» (апрель 2022 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 EF\_SNTK78. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 18.07.2022. Объем издания: 2,89 Мб. Заказ 425

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел (017) 292-42-32, факс (017) 292-71-73

ISBN 978-985-583-791-7

© Белорусский национальный  
технический университет, 2022

## Содержание

<b>ВЫБОР СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО УСЛОВИЮ НАДЕЖНОСТИ.....</b>	<b>5</b>
В. А. Андреев, К. А. Марчук, Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент.	
<b>РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПОДСТАНЦИИ КОЛЯДИЧИ 330 кВ .....</b>	<b>8</b>
А. В. Борщевский, М. Н. Булин Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент	
<b>АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ .....</b>	<b>12</b>
Е. В. Радюк, В. Д. Слесарев Научный руководитель – В. А. Ханевская, инженер	
<b>АВТОМАТИКА ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ .....</b>	<b>16</b>
А. Ю. Гулич Научный руководитель – В. В. Макаревич, ст. преподаватель	
<b>ПЕРЕРАБОТКА ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ .....</b>	<b>19</b>
В. В. Ефименко, М. В. Манзуля, А. А. Сотникова Научный руководитель – А. А. Бобич, к.т.н., доцент	
<b>АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ....</b>	<b>22</b>
Е. А. Сырица Научный руководитель – И. В. Шкляр, старший преподаватель	
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ RDF-ТОПЛИВА.....</b>	<b>28</b>
К. А. Михолап Научный руководитель – М. И. Позднякова, старший преподаватель	
<b>ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ТОРФОБРИКЕТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ .....</b>	<b>33</b>
Д. А. Янов Научный руководитель – В. В. Янчук, преподаватель-стажер	
<b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕЛОТЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОКОТЛАМИ .....</b>	<b>37</b>
Н. В. Лях, Д. Н. Машаро, А. И. Побережнюк Научный руководитель – И. Н. Прокопеня, старший преподаватель	
<b>УХУДШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЧНД ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБИН НА МАЛОРАСХОДНЫХ РЕЖИМАХ .....</b>	<b>41</b>
М. П. Кузьмич, А. Ю. Апанасевич, В. А. Вирко Научный руководитель – З. Б. Айдарова, старший преподаватель	
<b>СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ANSYS TWIN BUILDER.....</b>	<b>45</b>
А. С. Семененко Научный руководитель – В. И. Лазакович, преподаватель	

- АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ПОДСТАНЦИЕЙ С СХемой СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ  $Y/Y_{к.о}$ ..... 47**  
О. Д. Готенко, Т. А. Санец  
Научный руководитель – В. П. Счастный, к.т.н., доцент
- ОСОБЕННОСТИ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ РЕКЛАМНЫХ БИЛБОРДОВ С ПОМОЩЬЮ DIALUX..... 52**  
А. Д. Рубаносова, В. В. Скакалова  
Научный руководитель – В. Н. Калечиц, старший преподаватель
- КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ. ВЛИЯНИЕ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ..... 58**  
В. В. Ласица  
Научный руководитель – И. В. Колосова, старший преподаватель
- ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НОВЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВО..... 63**  
А. А. Антипов  
Научный руководитель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент
- ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ PG6111 GE ..... 67**  
А. О. Касяник, Е. А. Савенко  
Научный руководитель – С. А. Качан, к.т.н., доцент
- ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ – ЗЕЛЕНЫЙ ВОДОРОД ..... 72**  
С. В. Черневич  
Научный руководитель – В. В. Кравченко, к.э.н., доцент
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ ЗАНОСА ОТЛОЖЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА В КОТЛЕ ..... 77**  
Г. В. Алимов, П. А. Болбас, А. Д. Яковенко  
Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д.т.н., профессор
- ПРОГРАММА РАСЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ В БАССЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА..... 82**  
З. В. Ковганов, Е. В. Таранко  
Научный руководитель – В. А. Романко, старший преподаватель
- СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕАЛЬНЫХ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ..... 86**  
Е. Р. Сазоненко  
Научный руководитель – Г. Т. Кулаков, д.т.н., профессор
- СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ ..... 91**  
А. М. Ярохович  
Научный руководитель – Е. Н. Савкова, к.т.н., доцент

УДК 621.316.11

**ВЫБОР СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО УСЛОВИЮ  
НАДЕЖНОСТИ**  
**CHOICE OF THE POWER SUPPLY SCHEME ON THE CONDITION OF  
RELIABILITY**

В. А. Андреев, К. А. Марчук,  
Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент.  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
astarginsky@bntu.by

Marchuk K. A., Andreev V. A.  
Supervisor – A. L. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация:* сравнение вариантов схем электроснабжения по условию надежности, на основании расчета в программе TOPAS.

*Abstract:* comparison of options for power supply schemes according to the reliability condition, based on the calculation in the TOPAS program.

*Ключевые слова:* схема электроснабжения потребителей, коэффициент неготовности, надежность, TOPAS.

*Keywords:* consumer power supply scheme, unavailability factor, reliability, TOPAS.

### **Введение**

Вопрос надежности систем электроснабжения на современном этапе развития электроэнергетических систем имеет большое значение. В связи с широким распространением и быстрым ростом количества сложных производств и систем, требующих непрерывности технологических процессов, ростом качества жизни населения и многих других факторов появляется возрастающее требование к качеству электроснабжения. Аварийные ситуации и, как следствие, внезапные перерывы электроснабжения могут оказать существенный вред системам народного хозяйства: поломка оборудования, порча сырья и материалов, недовыпуск продукции, простой технологического оборудования и рабочей силы. Также немаловажной является проблема морального устаревания, старения и износа, усложнения работы оборудования ПС, что является одним из основных факторов снижения надежности систем электроснабжения.

### **Основная часть**

Особое место надежность занимает при технико-экономическом расчете. Сравнивая варианты с разной надежностью электроснабжения, появляется необходимость учитывать вероятностный ущерб от перерывов электроснабжения потребителей. При этом приведенные затраты записываются в следующем виде:

$$Z = I + E_n \cdot K + Y, \quad (1)$$

где  $I$  – годовые эксплуатационные расходы;

$E_n$  – норма дисконта;

$K$  – единовременные капитальные вложения;

$У$  – вероятностный ежегодный народнохозяйственный ущерб от перерывов электроснабжения потребителей.

Показатели надежности, рассчитанные в данной работе, используются в технико-экономическом расчете, так как на основании этих показателей может быть оценен ущерб от недоотпуска электроэнергии, а также произведен выбор схемы электроснабжения потребителей по условию надежности.

Логические показатели надежности главной схемы вычисляются на путем определения всевозможного числа комбинаций событий  $C(k)$ , приводящих к отказу схемы  $k$ -го вида:

$$C(k) = \sum_i \sum_j \sum_s L(k), \quad (2)$$

где  $L(k)$  – логическая функция, принимающая значение 0 или 1 [1].

Ущерб от недопуска электроэнергии определяется следующими основными показателями:

- частота отказа [1/год];
- длительность послеаварийного восстановления [ч];
- длительность ремонтного режима [ч].

Показатели надежности схем электроснабжения оценивались при помощи программы «ТОPAS», которая осуществляла симуляцию аварийного режима и оценивала вероятность погашения схемы подстанции, при выходе из строя различной группы элементов главной схемы.

Схемы типовых ПС представлены на рис. 1.

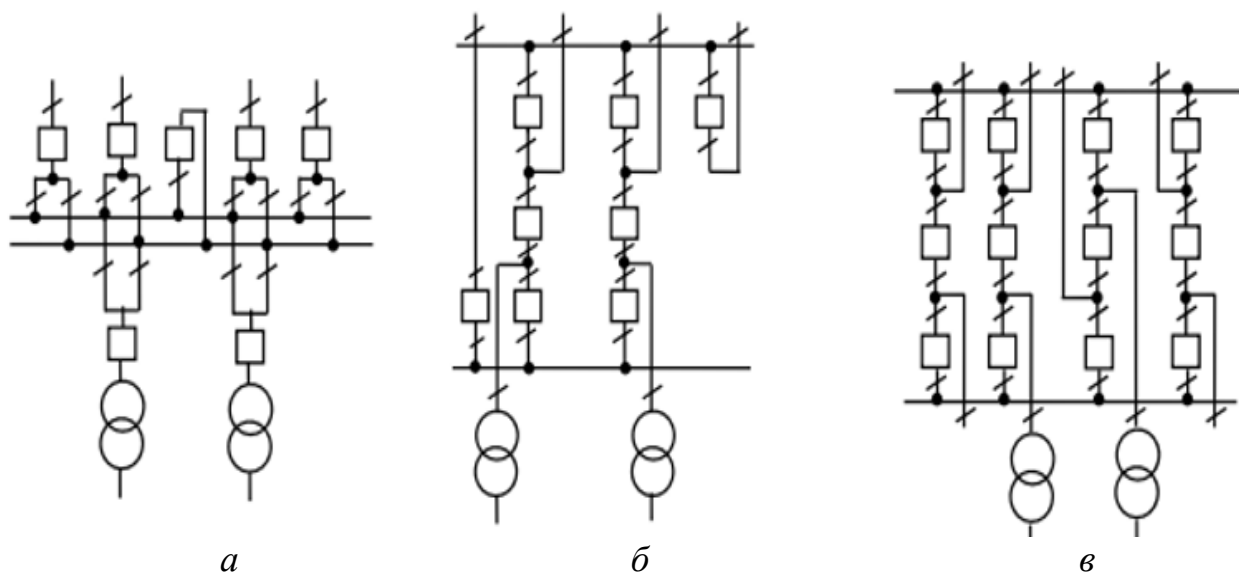


Рисунок 1 – Схемы типовых ПС:

$a$  – две рабочие системы шин;  $b$  – одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через «полуторную» цепочку;  $v$  – схема 4/3

Применение вышеуказанных схем (рис. 1):

а) схема с двумя рабочими системами шин: РУ 110-220 кВ при числе присоединений 5-15;

б) схема с одной рабочей секционированной системой шин с подключением ответственных присоединений через «полуторную цепочку»: РУ 110-220 при числе присоединений 3 и более. Условие – количество радиальных ВЛ не более 1 на секцию;

в) схема 4/3: РУ 220-750 кВ при числе присоединений 6 и более.

В результате расчета программой TOPAS были получены следующие значения табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

Название схемы	Частота отказа $\lambda_{\text{сум}}$ , 1/год	Время послеаварийного восстановления	Коэффициент неготовности
Две рабочие системы шин	$0,105 \cdot 10^{-1}$	0,7	$8,461 \cdot 10^{-7}$
Одна рабочая секционированная система	$0,42 \cdot 10^{-5}$	0,5	$2,454 \cdot 10^{-10}$
Схема 4/3	$0,828 \cdot 10^{-6}$	0,5	$4,728 \cdot 10^{-11}$

### Вывод

По полученным данным можно сделать следующий вывод: самой надежной схемой из приведенных, является схема 4/3, так как обладает наименьшим коэффициентом неготовности, но ее стоимость в разы выше, так как в этой схеме участвует большое число выключателей, по сравнению с другими схемами.

### Литература

1. Определение показателей надежности главных электрических схем соединений [Электронный ресурс] / Определение показателей надежности главных электрических схем соединений. – Режим доступа: <https://бэсп.бел/images/Docs/2018/seminar-im-rudenko/62opredelenie-pokazatelei-nadezhnosti-glavnykh-elektricheskikh-skhem-soedinenii-podstantcii.pdf>.-Дата доступа: 26.04.2022.
2. Васильева, Т. Н. «Надежность электрооборудования и систем электро-снабжения» – М., Горячая линия – Телеком, 2017 г.
3. Иванов, С. Н., Скрипилев, А. А. Надежность электроснабжения –М., Инфра – Инженерия, 2022 г.

УДК 621.3

## РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПОДСТАНЦИИ КОЛЯДИЧИ 330 КВ CALCULATION OF RELIABILITY OF THE SUBSTATION KOLYADICHI 330 KV

А. В. Борщевский, М. Н. Булин

Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
astarginsky@bntu.by

A. Borshchevsky, M. Bulin

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

***Аннотация:** совокупная общность электроустановок образует систему электроснабжения, входящую в состав более крупных электроэнергетических систем (ЭС). Обеспечение достаточного уровня надежности функционирования систем электроснабжения представляется одной из наиболее важных задач в вопросе обеспечения потребителя электроэнергией. Анализ надежности позволяет определить наиболее слабые места в системах электроснабжения и принять меры для предотвращения аварийных ситуаций.*

***Abstract:** the aggregate community of electrical installations forms a power supply system that is part of larger electric power systems (ES). Ensuring a sufficient level of reliability of the functioning of power supply systems is one of the most important tasks in the issue of providing consumers with electricity. Reliability analysis allows you to identify the weakest points in power supply systems and take measures to prevent emergencies.*

***Ключевые слова:** надежность, подстанция, коммутационный аппарат.*

***Keywords:** reliability, substation, switching device.*

### **Введение**

Современные системы электроснабжения достигают внушительных размеров и зачастую имеют сложный характер связей между элементами, объектами производства и потребителями электрической энергии.

Каждое из устройств, входящих в состав систем электроснабжения должно удовлетворять заданным требованиям надежности. Таким образом, надежность – одно из наиболее важных свойств систем электроснабжения, которое определяет их техническую исправность и экономическую эффективность работы. В случае, если система электроснабжения не располагает достаточным уровнем надежности, то все прочие показатели качества электроэнергии утрачивают свое практическое значение, поскольку не могут быть в полной мере использованы при эксплуатации системы электроснабжения.

Кроме того, надежная система электроснабжения должна поддерживать некоторую степень работоспособности в случае отказов ряда структурных элементов системы, обусловленных аварийными отключениями, наличия дефектов при производстве или техническим износом.



В дальнейшем для расчета исходной схемы прибегнем к использованию программного комплекса TOPAS.

**Основная часть**

Для исследования надежности системы электроснабжения была выбрана высокая сторона подстанции (ПС) «Колядичи – 330» (рис. 1). Изначально необходимо составить основную и расчетную схемы распределительного устройства (рис. 2).

В дальнейшем расчетную схему будем представлять схему в виде узлов и ветвей, где выключателями являются ветви, а узлами – прочие элементы. Последовательно пронумеруем все ветви и узлы, начиная с единицы.

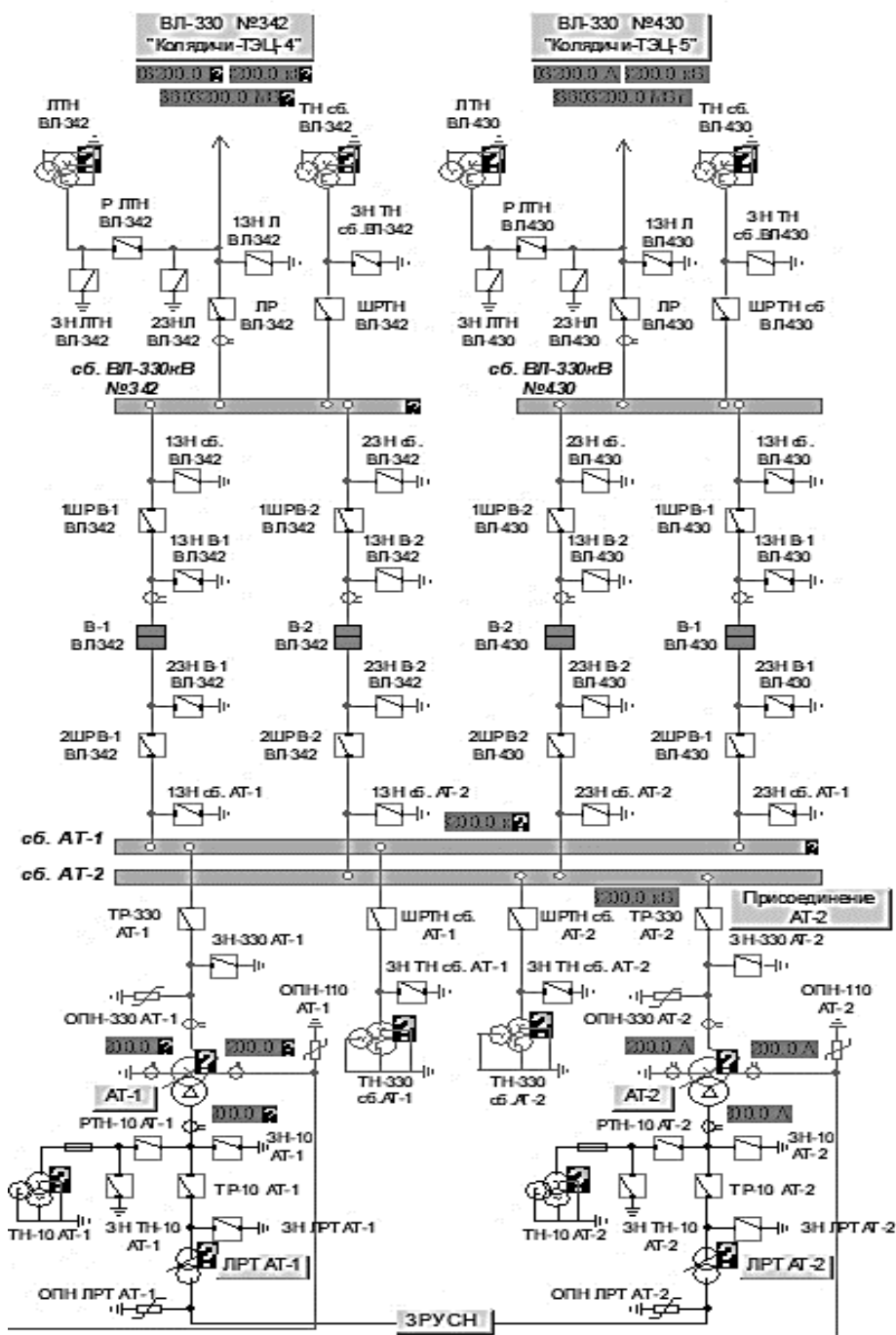


Рисунок 1 – Схема высокой стороны ПС «Колядичи – 330»

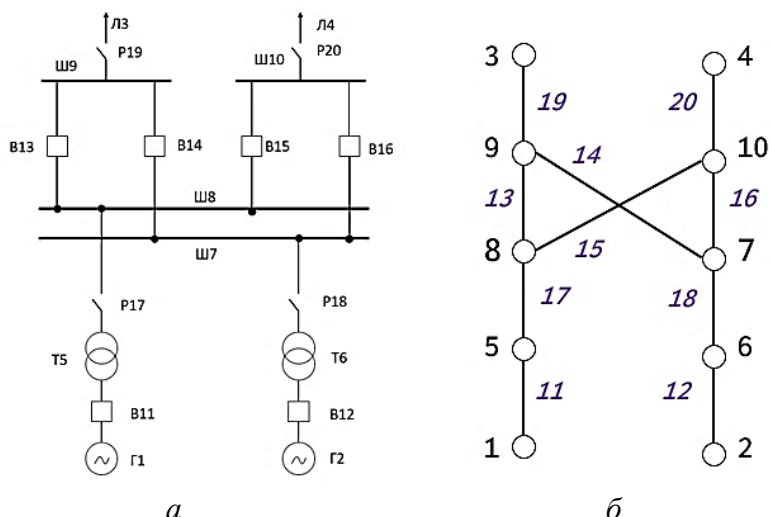


Рисунок 2 – Схема ПС «Колядичи – 330»

*a* – основная схема верхней стороны ПС «Колядичи – 330»; *б* – расчетная схема;  
 1, 2 – генераторы; 3, 4 – линии; 5, 6 – блочные трансформаторы; 7, 8, 9, 10 – сборные шины 330 кВ

На следующем этапе 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 коммутационного аппарата	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1-й узел	1	2	8	7	8	7	5	6	3	4
2-й узел	5	6	9	9	10	10	8	7	9	10

Далее необходимо присвоить каждой группе элементов расчетной схемы исходные данные в формате, позволяющем произвести последующий расчет в программном комплексе TOPAS (табл. 2).

Таблица 2 – Показатели надежности оборудования

Элементы схемы	Частота отказа 1/год	Время п-авар. восс., ч	Частота план-го рем-та, 1/год	Длитель. план-го рем-та, ч	Вероятн. отказа при откл КЗ., о. е.	Вероятн. отказа в сраб-нии РЗ, о. е.
1-2	0,001	0	0	0	–	0,001
3-4	0,002	9	0,5	20	–	0,001
5-6	0,008	60	0,25	6	–	0,001
7-10	0,039	15	0,498	9	–	0,001
11-12	0,009	10	0,5	10	0,003	–
13-16	0,02	48	0,2	90	0,002	–

Используя исходным данным произведем расчет надежности схемы по отключаемым элементам и по количеству отключаемых элементов (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты анализа надежности

Код аварии	Суммарная частота, 1/год	Среднее время восст., ч
2Т 2Л	0,000322	0,5
1Т 1Л	0,162	7,93

Коэффициент неготовности потребителей вычисляется по формуле (1) [2]:

$$K_H = \frac{T(k)\lambda}{8760} \quad (1)$$

Отключены 2Т 2Л:

$$K_H = \frac{T(k)\lambda}{8760} = \frac{0,5 \cdot 0,000322}{8760} = 1,837 \cdot 10^{-8}.$$

Отключены 1Т 1Л:

$$K_H = \frac{T(k)\lambda}{8760} = \frac{7,93 \cdot 0,162}{8760} = 1,467 \cdot 10^{-4}.$$

### Заключение

Согласно результатам расчета, вероятность отключения сразу двух линий и двух трансформаторов гораздо более маловероятна, чем отключение одного трансформатора и одной линии.

Для улучшения показателей надежности системы электроснабжения применяется ряд специальных мероприятий, среди которых: резервирование, улучшение защиты электрооборудования, применение актуальных методов по контролю за состоянием изоляции, снижение времени восстановления электрооборудования после аварийных ситуаций, облегчение электрических, механических и тепловых режимов функционирования элементов системы электроснабжения, замена электрооборудования на более надежное.

### Литература

1. 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.

УДК 620.92

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ  
БЕЛАРУСЬ**  
**ALTERNATIVE ENERGY SOURCES REPUBLIC OF BELARUS**

Е. В. Радюк, В. Д. Слесарев

Научный руководитель – В. А. Ханевская, инженер  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

hanevskaya@bntu.by

E. Radziuk, V. Slesarev

Supervisor – V. Khanevskaya, Engineer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Supervisor – Khanevskaya V., Engineer Belarusian national technical university,  
Minsk, Belarus

***Аннотация:** каждый день мы сталкиваемся с вопросом о загрязнении окружающей среды вредными выбросами. По моему мнению, в современном мире этот вопрос стоит как никогда остро, поэтому нам необходимо искать пути решения экологических, экономических, социальных и других проблем. Достигнуть экологического баланса можно путем внедрения наилучших доступных технологий, в качестве примера были рассмотрены альтернативные источники энергии.*

***Abstract:** every day we are faced with the issue of environmental pollution with harmful emissions. In my opinion, in the modern world this issue is more acute than ever, so we need to look for ways to solve environmental, economic, social and other problems. It is possible to achieve an ecological balance by introducing the best available technologies, alternative energy sources were considered as an example.*

***Ключевые слова:** альтернативные источники энергии, экология, энергетика, возобновляемые ресурсы.*

***Keywords:** alternative energy sources, ecology, energy, renewable resources.*

### **Введение**

В энергетическом секторе Беларуси доминируют государственные компании, работающие под контролем Министерства энергетики в электроэнергетике, газе и частично в теплоэнергетике, а также под управлением Белнефтехима (Белорусского государственного концерна нефти и химии) в нефтяной, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях.

В 2018 году на возобновляемые источники энергии приходилось всего 6 % энергетического баланса Беларуси, в основном из биотоплива и отходов. Доля возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии была еще ниже – 2 % в 2018 году (0,8 ТВтч).

Но с каждым годом процент использования возобновляемых источников энергии возрастает, так как вопросы загрязнения окружающей среды и истощаемости ресурсов становятся все более значимым.

### Основная часть

Возобновляемые источники энергии находятся в зачаточном состоянии в энергетическом секторе Беларуси. Доля первичного энергоснабжения от возобновляемых источников энергии неуклонно растет в течение последнего десятилетия и в 2019 г. составил 7,1 %. Эта доля в основном состоит из биотоплива и, в меньшей степени, фотоэлектрических и солнечных батарей, ветряных мельниц. Тем не менее, страна хорошо обеспечена потенциалом возобновляемых источников энергии, который представляет собой жизнеспособный и устойчивый путь для развития энергетического сектора.

Биомасса является самым распространенным возобновляемым источником энергии в стране. Огромный потенциал биомассы заключается в древесных ресурсах, в том числе порубочных, учитывая обширность лесных массивов, занимающих около 40 % территории страны. Отходы древесных ресурсов, которые могут быть использованы для производства биоэнергии, оцениваются в 1,5 миллиарда кубических метров (млрд куб. с ежегодным приростом 0,03 млрд куб. м. Согласно Национальной программе по развитию местной и возобновляемой энергетики на 2011-2015 годы, потенциал твердой биомассы оценивается в 2,2 млн тонн нефтяного эквивалента (М.т.н.э)/год, а еще 1,7 млн.т.н.э/год оценивается по сельскохозяйственным отходам (пожнивным остаткам и соломе).

В настоящее время твердая биомасса используется для производства тепла на тепловых и когенерационных электростанциях и котельных.

Учитывая относительно равнинную топографию Беларуси, потенциал страны для развития крупной гидроэнергетики незначительный, хотя потенциал малой гидроэнергетики (< 10 МВт) возможно развить в северных и центральных районах страны. Потенциальная гидроэнергетическая мощность всех водоемов Беларуси оценивается в 850 МВт. Из них технический потенциал оценивается в 520 МВт, а экономический потенциал оценивается в 250 МВт. Исторически в Беларуси было большое количество очень малых гидроэлектростанций для производства электроэнергии в сельской местности и для производственных целей, таких как лесопильные заводы и мельницы. С расширением централизованной сети большинство этих заводов стало устарели и были выведены из эксплуатации. В настоящее время установленная мощность ГЭС составляет 95,7 МВт, из которых 88,1 МВт принадлежит Белэнерго.

Что касается ветровой энергетики можно сказать, что среднегодовые скорости ветра превышают 6 м/с (на высоте узла 100 м) почти во всех районах страны. На севере, северо-западе и в окрестностях Минска среднегодовая скорость ветра может достигать 8 м/с, что свидетельствует о качественном ресурсном потенциале развития ветровой энергетики в стране. В 2019 году установленная мощность ветроэнергетики составила 106,1 МВт, из которых 9 МВт находились в собственности Белэнерго.

Годовое глобальное горизонтальное облучение (GHI) в Беларуси составляет от 1000 кВтч/м<sup>2</sup> до 170 кВтч/м<sup>2</sup>, с наибольшей радиацией на юге и юго-востоке страны, что указывает на значительный потенциал для развития сол-

нечной фотоэлектрической энергии. В районах с высоким потенциалом производительность солнечной фотоэлектрической генерации может достигать более 1100 кВтч/кВт/ч в год, в остальной части страны она может значительно превышать 1020 кВтч/кВтп. Для гелиотермальных применений наиболее перспективными регионами являются Брестская и Гомельская области. На юге и юго-востоке страны, которые получают в среднем 60 ясных дней в год и прямая нормальная освещенность (DNI) более 1050 кВтч/м<sup>2</sup>.

В целом, у страны есть потенциал для использования солнечной энергии, например, для космической энергетики, нагрева воды и низкоэнтальпийного технологического тепла в промышленности и сфере услуг.

Потенциал геотермальной энергетики на сегодняшний день недостаточно оценен, и исследования проводятся только в нескольких регионах. В 2018 году издан первый геотермический атлас Беларуси, состоящий из около 50 подробных карт Припятского прогиба с указанием наиболее перспективных геотермальных скважины на глубине от 100 м до 4 км. Атлас включает геотермальные градиенты, плотность теплового потока и геотермальные ресурсы. Хотя некоторые оценки показывают, что температуры от 150 °С до 180 °С доступны в кристаллическом фундаменте до глубины 6 км их разработка экономически нецелесообразна. Таким образом, в Республике Беларусь геотермальные ресурсы не считаются достаточными для производства электроэнергии.

В целом геотермальный потенциал считается наиболее подходящим для получения низкоэнтальпийного тепла. Наиболее перспективные участки находятся в Припятском прогибе в юге страны и в Брестской области. Учитывая потенциал для интеграции низкоэнтальпийных геотермальных ресурсов в районные энергосистемы Беларуси, в феврале 2021 года IRENA совместно с Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь и при техническом содействии Ольборгского университета в Дании, организовала семинар «Интеграция низкотемпературных возобновляемых источников энергии в системы отопления и охлаждения». Целью семинара было оснащение централизованного теплоснабжения в Республике Беларусь с различными опциями и инструментами для интеграция низкотемпературных возобновляемых источников энергии в сети централизованного теплоснабжения.

### **Заключение**

Энергетический сектор Беларуси стремится уменьшить свою чрезмерную зависимость от импортируемых нефти и газа и продвигать возобновляемые источники энергии.

Использование возобновляемых источников энергии играет центральную роль в развитии энергетического сектора. Согласно недавно принятой Государственной программе энергосбережения на 2021–2025 годы, цель возобновляемых источников энергии к 2025 году – 8 % доля возобновляемых источников энергии в TPES, что отличается от 7 % доли возобновляемой энергии в ОППЭ к 2025 году, как указано в Концепции энергетической безопасности.



### Литература

1. Возобновляемые источники энергии РБ [Электронный ресурс]/ IRENA. – Режим доступа: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA\\_RRA\\_Belarus\\_2021.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_RRA_Belarus_2021.pdf) – Дата доступа: 22.04.2022.
2. Нефтехимия [Электронный ресурс]/ Возобновляемая энергетика в РБ. – Режим доступа: <https://belchemoil.by/news/analitika/vozobnovlyaemaya-energetika-stanovitsya-samym-bystro-razvivayushhimsya-vidom-generacii/>. – Дата доступа: 22.04.2022.

УДК 621.311

**АВТОМАТИКА ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ  
AUTOMATIC ELIMINATION OF ASYNCHRONOUS MODES**

А. Ю. Гулич

Научный руководитель – В. В. Макаревич, ст. преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
prosto.andrew2001@mail.ru

A. Y. Gulich

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

***Аннотация:** в данной статье рассматривается автоматика ликвидации асинхронных режимов. Так же в статье описаны методы обнаружения асинхронных режимов, типы автоматики.*

***Abstract:** this article discusses the automation of the elimination of asynchronous modes. The article also describes methods for detecting asynchronous modes, types of automation.*

***Ключевые слова:** автоматика, асинхронный, выявление, энергосистемы.*

***Keywords:** automation, asynchronous, detection, power systems.*

**Введение**

Опасность асинхронного режима работы при параллельной работе нескольких генераторов нельзя преуменьшить. Аварии, вызванные асинхронным режимом, могут вызывать крупные аварии в энергосистемах, оставляя без электроэнергии целые города и регионы. Во избежание подобных проблем была придумана автоматика ликвидации асинхронных режимов (АЛАР). В этой работе объясняется принцип работы этой автоматики и различные ее виды, которые встречаются на просторах СНГ.

**Основная часть**

Номинальным режимом параллельно работающих генераторов является синхронный. Режим синхронной работы означает, что ЭДС генераторов, работающих параллельно, имеют равную частоту, и, исходя из этого, вектора вращаются с одной и той же угловой скоростью. Самым опасным режимом работы электроэнергетических систем можно назвать асинхронный режим. Он может возникнуть при нарушениях синхронной работы узлов энергосистемы или генераторов на разных электрических станциях. При действии асинхронного режима между несинхронно работающими узлами энергосистемы появляются уравнительные токи, сопоставимые с токами при коротком замыкании. Колыхание напряжений и токов может привести к перемежающимся изменениям перетоков активной и реактивной мощностей. А уже в свою очередь, амплитуда изменения этих мощностей легко может существенно отличаться в большую сторону от перетоков нормального режима электропередачи и генераторов. Говоря простым языком, асинхронный режим в работе энергосистемы возникает,



если генераторы, работавшие параллельно, по какой-то причине начали вращаться с различной угловой скоростью. Между ними возникают перетоки и напряжение в сети начинает плавно подниматься и опускаться до недопустимых величин, с изменением направления перетока мощности.

Именно поэтому, АЛАР можно назвать одним из наиболее непростых разновидностей противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. Помимо этого, асинхронный режим может появиться, если несинхронно включить линии, соединяющие электростанцию с энергосистемой. Асинхронный режим влечет за собой следующие характерные черты:

- эпизодическое колебание угла несинхронных ЭДС;
- эпизодическое колебание напряжения.

Выявления и исправление этих самых моментов как правило осуществляются в автоматическом режиме при взаимодействии приборов противоаварийной автоматики ликвидации асинхронных режимов, а иногда, в тех случаях, когда автоматика дала сбой или каким-то образом не среагировала, персоналом оперативного назначения вручную.

АЛАР занимает одно из ключевых мест в структуре противоаварийной автоматики электроэнергетических систем, являясь основным средством противоаварийного управления, предотвращающим развитие тяжелых системных аварий, связанных с нарушением устойчивости параллельной работы генерирующих источников.

Действие АЛАР основано на принципах выявления асинхронного режима с помощью измерения величины и скорости изменения полного сопротивления линий электропередач при возникновении и развитии асинхронных режимов; выявления и подсчета полуциклов и полных циклов асинхронных режимов.

Как только автоматика замечает появляющиеся качения сети, она сразу же обрубаает необходимое для корректировки линии в самой энергосистеме, что позволяет восстановить синхронный режим, или по-другому – произвести ресинхронизацию. Исходя из этих действий данную противоаварийную автоматику можно назвать видом так называемой делительной защиты. Как только автоматика все устранил, отключенные линии вновь включаются, тем самым обеспечивая прежнюю целостность системы.

Прежде всего автоматика ликвидации асинхронных режимов предназначена для выявления и устранения несколько машинного асинхронного режима формируя управляющие воздействия на ресинхронизацию и деление системы. Алгоритм позволяет выявлять угрозу, момента начала и факта возникновения асинхронного режима. Для выполнения указанных функций алгоритм выполнен многоступенчатым и включает в себя три основные ступени и одну резервную (четвертая ступень).

Первая ступень служит для обнаружения угрозы и факта развития АР уже на начальном цикле. При этом осуществляется расчет моделируемого угла электропередачи и скольжения. Вторая ступень алгоритма должна выявлять АР через несколько циклов. В основу этой ступени положен дистанционно-угловой принцип с контролем периода асинхронного режима. Третья ступень задей-

ствуется только в случае неуспешной ресинхронизации, инициируемой второй ступенью. В алгоритме присутствует также токовая ступень, предназначенная для резервирования трех вышеуказанных ступеней по принципу действия. В связи с тем, что развитие асинхронного режима, и в том числе появления качаний, способны протекать лавинообразно, то автоматика ликвидации асинхронных режимов должна уметь крайне эффективно опознавать критический асинхронный режим и безопасные синхронные качания.

Если посмотреть на ситуацию сегодня, то есть некоторое количество моделей автоматики ликвидации асинхронных режимов, созданных различными компаниями, различающихся по алгоритму работы и критериями, нужных для его функционирования. Устройства АЛАР производятся уже готовыми к работе блоками, самые распространенные в СНГ: «АЛАР-Ц», «АЛАР-М», 7UM62, ШЭЭ 22х, МКПА.

Сложные и крайне дорогие блоки АЛАР иногда можно заменить более простой делительной защитой. Принцип действия у нее схож, она все также будет устранять асинхронный режим, однако сделаны подобные защиты намного проще. Чаще всего их делают в виде трех токовых реле, совмещенных вместе с фазными токами. Но главное условие при таком подключении, это чтобы контакты реле были подключены именно последовательно, и не как иначе. В подобных системах можно регулировать выдержку времени срабатывания и ток, а также степень чувствительности срабатывания.

### **Заключение**

В ходе улучшения электрических сетей и уходом к максимальным по критериям устойчивости режимами функционирования электропередач возрос риск появления асинхронного режима и его влияния на энергосистему, что, по итогу, вынудило разработать и создать более совершенные устройства АЛАР.

Без подобной противоаварийной автоматики сегодня нельзя представить бесперебойную и безаварийное функционирование какой бы то не было электрической станции.

### **Литература**

1. Автоматика ликвидации асинхронного режима [Электронный ресурс] / противоаварийная автоматика. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/alar-gonik/>. – Дата доступа: 16.04.2022.
2. Автоматика ликвидации асинхронного режима [Электронный ресурс] / противоаварийная автоматика. – Режим доступа: <http://elektro-rezhim.ru/avtomatika-likvidacii-asinxronnogo-rezhima/>. – Дата доступа: 15.04.2022.
3. Противоаварийная автоматика [Электронный ресурс] / противоаварийная автоматика. – Режим доступа: <http://elektro-rezhim.ru/avtomatika-likvidacii-asinxronnogo-rezhima/>. – Дата доступа: 15.04.2022.

УДК 621.352

## ПЕРЕРАБОТКА ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ RECYCLING LITHIUM-ION BATTERIES

В. В. Ефименко, М. В. Манзуля, А. А. Сотникова  
Научный руководитель – А. А. Бобич, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
bobich@bntu.by

V. Yefimenko, D. Manzulia, A. Sotnikova  
Supervisor – A. Bobich, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** литий-ионные аккумуляторы сделали портативную электронику повсеместной. Эта история успеха настраивает мир на создание многомиллионной кучи использованных литий-ионных батарей, которые могут оказаться в мусоре.*

***Abstract:** lithium-ion batteries have made portable electronics ubiquitous and they are about to do the same for electric vehicles. That success story is setting the world on track to generate a multimillion-metric-ton heap of used Li-ion batteries that could end up in the trash.*

***Ключевые слова:** аккумуляторы, переработка, изготовление, утилизация.*

***Keywords:** batteries, recycling, manufacturing, disposal.*

### **Введение**

Батареи ценны и пригодны для вторичной переработки, но из-за технических, экономических и других факторов сегодня перерабатывается менее 5 %. Чудовищность надвигающейся ситуации с отработанными батареями побуждает исследователей искать экономически эффективные, экологически устойчивые стратегии для борьбы с огромным запасом литий-ионных батарей, вырисовывающихся на горизонте.

### **Основная часть**

По мере того, как популярность электромобилей стремительно начинает стремительно расти, растет и много отработанных литий-ионных батарей, которые когда-то питали эти автомобили. Если текущие тенденции обращения с этими отработанными батареями сохранятся, большинство из них могут оказаться на свалках, хотя литий-ионные батареи могут быть переработаны. Эти популярные блоки питания содержат ценные металлы и другие материалы, которые могут быть восстановлены, обработаны и использованы повторно.

Есть ряд причин, из-за которых переработка литий-ионных батарей еще не является общепринятой практикой. Они включают в себя технические ограничения, экономические барьеры, логистические проблемы.

Поскольку в индустрии литий-ионных аккумуляторов отсутствует четкий путь к крупномасштабной экономичной переработке, исследователи и производители аккумуляторов традиционно не фокусируются на улучшении перераба-

тываемости. Вместо этого они работают над снижением затрат и увеличением долговечности батареи и емкости заряда. И так как исследователи добились лишь скромного прогресса в улучшении перерабатываемости, относительно немногие литий-ионные батареи в конечном итоге перерабатываются.

Большинство батарей, которые перерабатываются, подвергаются высокотемпературному процессу плавления и экстракции, или плавки, аналогичному процессу, используемому в горнодобывающей промышленности. Те операции, которые проводятся на крупных коммерческих объектах – например, в Азии, Европе, Канаде – являются энергоемкими. Заводы также дороги в строительстве и эксплуатации требуют сложного оборудования для обработки вредных выбросов, образующихся в процессе плавки. И, несмотря на высокую стоимость, эти заводы не восстанавливают все ценные материалы батарей.

До сих пор большая часть усилий по улучшению утилизации литий-ионных аккумуляторов была сосредоточена в относительно небольшом количестве академических исследовательских групп, как правило, работающих независимо. Но все начинает меняться. Благодаря огромному количеству отработанных литий-ионных аккумуляторов, ожидаемых в ближайшее время от стареющих электромобилей и вездесущей портативной электроники, начинающие компании коммерциализируют новую технологию переработки батарей. И все больше ученых начали изучать проблему, некоторые эксперты по батареям, производству и переработке начали формировать большие, многогранные коллаборации для решения надвигающейся проблемы.

Специалисты по батареям и экологи приводят длинный список причин утилизации литий-ионных аккумуляторов. Восстановленные материалы могут быть использованы для изготовления новых батарей, что снижает производственные затраты. В настоящее время на эти материалы приходится более половины стоимости батареи.

В дополнении к потенциальным экономическим выгодам, переработка может уменьшить количество материала, поступающего на свалки. Кобальт, никель, марганец и другие металлы, содержащиеся в батареях, могут легко вытекать из корпуса батарей и загрязнять почву и грунтовые воды, угрожая экосистемам и здоровью человека.

Аккумуляторы могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду не только в конце срока службы, но и задолго до их производства. Большая переработка отходов означает меньшую добычу первичного материала и меньший связанный с этим вред окружающей среде.

Меньшая зависимость от добычи полезных ископаемых для аккумуляторных материалов также может замедлить истощение этого сырья. Исследователи обнаружили, что мировые запасы лития и никеля достаточны для поддержания быстрого роста производства батарей. Но это также может снизить глобальные запасы кобальта более чем на 10 %.

Существуют также политические издержки и недостатки, которые могут помочь решить утилизация литий-ионных батарей. Производство кобальта связано с вооруженными конфликтами, незаконной добычей полезных ископае-

мых, нарушениями прав человека и вредной экологической практикой. Переработка батарей и разработка катодов с пониженной концентрацией кобальта могут помочь снизить зависимость от таких проблемных иностранных источников и повысить безопасность цепочки поставок.

Точно так же, как экономические факторы могут привести доводы в пользу утилизации батарей, они также могут привести доводы и против нее. Например, большие колебания цен на сырье и материалы создают неопределенность в экономике переработки отходов. В частности, недавнее значительное падение цены на кобальт поднимает вопросы о том, является ли переработка литий-ионных батарей или их перепрофилирование хорошим выбором для бизнеса по сравнению с производством новых батарей из свежих материалов. В принципе, если цена на кобальт упадет, переработанный кобальт будет изо всех сил конкурировать с добытым кобальтом с точки зрения цены, и производители будут выбирать добытый материал, а не переработанный, вытесняя переработчиков из бизнеса.

Конструкция батареи еще больше усложняет работу по утилизации отходов. Литий-ионные аккумуляторы представляют собой компактные, сложные устройства, бывают различных размеров и форм и не предназначены для демонтажа. Компоненты плотно намотаны или сложены и надежно упакованы в пластиковый или алюминиевый корпус. Все компоненты и материалы должны быть обработаны переработчиком, чтобы получить ценные металлы и другие материалы. В отличие от этого, свинцово-кислотные автомобильные аккумуляторы легко разбираются, а свинец, на который приходится около 60 % веса батареи, может быть быстро отделен от других компонентов.

Сегодня несколько крупных пирометаллургических или плавильных предприятий перерабатывают литий-ионные аккумуляторы. Эти устройства, которые часто работают при температуре около 1500 °С, восстанавливают кобальт, никель и медь, но не литий, алюминий или любые органические соединения, которые горят. Эти объекты являются капиталоемкими, отчасти из-за необходимости очистки выбросов токсичных соединений фтора, выделяющихся при плавке.

### **Заключение**

Большинство из стратегий остаются на ранней стадии разработки, однако потребность в них растет. В настоящее время количество аккумуляторов электромобилей с истекшим сроком службы невелико, но оно вот-вот взлетит до небес. Многочисленные препятствия стоят на пути крупномасштабной переработки, но возможности всегда сосуществуют с проблемами.

### **Литература**

1. Переработка литий-ионных аккумуляторов [Электронный ресурс]/ солнечная энергетика. – Режим доступа: <https://rocla.ru/o-kompanii/poleznaya-inforaciya/pererabotka-litij-ionnykh-akkumulyatorov/>.– Дата доступа: 22.04.2022.

2. Утилизация литиевых аккумуляторов [Электронный ресурс]/ солнечная энергетика. – Режим доступа: <https://eco2eco.ru/utilizaciya/utilizatsiya-litievyyh-akkumulyatorov/>.– Дата доступа: 22.04.2022.



УДК 620.92

**АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ  
СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.  
ANALYSIS OF DEVELOPMENT TRENDS AND METHODS OF OPTIMI-  
ZATION OF HEAT SUPPLY SYSTEMS.**

Е. А. Сырица

Научный руководитель – И. В. Шкляр, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
shklyar@bntu.by

Y. Syrytsa

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

***Аннотация:** постоянный анализ тенденций развития систем тепло-снабжения позволяет выявить наиболее актуальные направления по обеспечению энергетической безопасности всех отраслей народного хозяйства.*

***Abstract:** constant analysis of development trends of heat supply systems allows us to identify the most relevant areas for ensuring energy security of all sectors of the national economy.*

***Ключевые слова:** предварительно изолированные трубы, тепловая реабилитация, частотные преобразователи, тепловые насосы.*

***Keywords:** pre-insulated pipes, thermal rehabilitation, frequency converters, heat pumps.*

### **Введение**

Энергетика, это основа развития хозяйства. Резко меняющаяся мировая экономика заставляет все больше уделять внимание усилению энергобезопасности всех отраслей промышленности республики. Это позволит минимизировать неизбежные последствия даже самых глобальных экономических катаклизмов.

### **Основная часть**

Энергетика каждого государства функционирует в рамках созданной энергетической системы, включающей получение, преобразование, распределение и использование электрической и тепловой энергии от электростанций, котлов, турбин, генераторов, бойлеров, линий электропередачи, трансформаторов.

В настоящее время, основными правовыми основами развития системы теплоснабжения республики является: «Концепция развития теплоснабжения в Республике Беларусь до 2025 г.», «Государственная программа «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 гг.», «Программа увеличения электропотребления для нужд отопления и горячего водоснабжения и пищеприготовления на 2021–2025 гг.», «Программа энергосбережения на 2021–2025 гг.». Основными мероприятиями, в рамках реализации программ являются: развитие и модернизация систем теплоснабжения, развитие и модернизация энергоисточников, модернизация котельного хозяйства с ликвидацией неэффектив-

ных котлов и переводом котлов на МВТ, замена тепловых сетей 4 % в год, тепловая модернизация жилищного фонда, автоматизация режимов теплоснабжения, оснащение потребителей системами регулирования тепловой энергии. Были реализованы пилотные проекты по внедрению тепловых насосов для подогрева горячей воды с использованием энергии стоков с установкой солнечных панелей для компенсации расхода электроэнергии, а также отдельной установке солнечных коллекторов для подогрева горячей воды в многоквартирном жилом доме.

К сожалению, ряд направлений имеют недостаточный темп развития, недостаточную эффективность с учетом климатических условий, основаны исключительно на применении импортного дорогостоящего оборудования и в процессе эксплуатации создают проблему утилизации отработанных материалов.

Так, на сегодняшний день в энергосистеме республики эксплуатируется более 7,56 тыс. км. тепловых сетей. На долю ПИ-трубопроводов приходится 38 % или около 2,9 тыс. км. Снижение тепловых потерь при замене обычных трубопроводов на ПИ трубы достигает 12–14 %. Кроме того, это позволяет сократить годовые эксплуатационные расходы на содержание сети в 9–10 раз, увеличить срок службы трубопровода до 30 лет, уменьшить затраты на текущие ремонты теплотрассы в 3 раза. Еще в 2014 году, по оценкам специалистов, ежегодная экономия от ранее проложенных ПИ труб, Беларусь ежегодно сэкономила свыше 30 млн долларов США. Учитывая тот факт, что на протяжении нескольких десятков лет эксплуатации таких труб не возникает особых инцидентов, что подтверждено системами контроля, такое мероприятие должно являться приоритетным и темп ежегодной замены в 4 % крайне недостаточный. Тем более основными поставщиками таких труб в республику являются страны со-юзных государств, экономически надежных партнеров.

Несомненно, тепловые насосы являются энергоэффективным оборудованием, с КПД до 600 %. Они широко применяются как за рубежом, в таких странах как: Австрия, Финляндия, Франция, Германия, Италия, Норвегия, Швеция, Швейцария и Великобритания, так и в Республике Беларусь. Но, как и у всего оборудования, у таких насосов есть свои недостатки. Первый недостаток – это стоимость оборудования. Считается, что стоимость теплового насоса оценивается из расчета около одной тысячи долларов США на 1 кВт вырабатываемой тепловой мощности. При тепловой мощности системы горячего водоснабжения двух подъездного девятиэтажного жилого дома равной 290 кВт, стоимость оборудования составит 290 тыс. долларов США. Вторым недостатком это, конечно же то, что, вырабатывая тепловую энергию, насос потребляет электрическую. Для примера произведем расчет расход энергии для отопления дома с отапливаемой площадью 100 м<sup>2</sup> с расходом тепла 70 Вт/м<sup>2</sup>. За 1 час нужно тратить 7000 Вт·ч или 7 кВт·ч. Исходя из того, что дней отопления 214, а в сутках 24 часа, общий расход за сезон составит 35952 кВт·ч или 36 МВт·ч. Тепловой насос мощностью 5кВт·ч, при коэффициенте преобразования теплового насоса 3, будет потреблять 1,7 кВт·ч электроэнергии. Расход за сезон составит 8731 кВт·ч или 8,7 МВт·ч. При стоимости электроэнергии 0,23 руб.·кВт·ч,

получим, что 1кВт·ч преобразующего тепловым насосом тепла за сезон равняется 0,056 руб. В реальности может быть больше потому, что произведенный расчет является ориентировочным и не учитывает затраты на проектирование, монтаж, КПД оборудования, теплотехнических характеристик дома, погодных условий, затрат на эксплуатацию и многих других факторов. Если 35952 кВт·ч перевести на газ, то получится 3400 м<sup>3</sup> газа. При стоимости 0,1366 руб·м<sup>3</sup>, общий расход составит 464 руб. С учетом стоимости газа и электроэнергии на сегодняшний день, этот недостаток делает оснащение тепловыми насосами объектов в газифицированном районе экономически невыгодным мероприятием. Третий недостаток, это обслуживание оборудования. Основные страны – производители являются Швеция, Германия, Австрия, Италия, США, Япония, Польша. Разрыв экономических отношений, запрет на поставку оборудования и комплектующих, отказ от сервисного обслуживания ставит, под угрозу дальнейшую эксплуатацию готовых объектов.

В настоящее время тепловая реабилитация жилищного фонда проводится только с привлечением средств жильцов. Несмотря на то, что такое мероприятие является достаточно эффективным, не требующим дальнейших эксплуатационных расходов, учитывая различный социальный уровень населения, процент проведения тепловой реабилитации крайне низкий. Выравнивание ограждающих конструкций жилых домов с применением теплоизолирующих материалов, при капитальном ремонте жилищного фонда, без доведения термического сопротивления ограждающих конструкций до нормативных требований, приводит лишь к улучшению жилищных условий и не дает должного результата по снижению расхода тепловой энергии на обогрев.

При проектировании систем теплоснабжения района, строится пьезометрический график, по которому определяется давление и напор в любой точке сети и располагаемый напор в любой точке сети и у потребителя. Далее проводится выбор схем присоединения отопительных установок к водяной тепловой сети: зависимая или независимая, с водоструйным элеватором или системой автоматического регулирования. Возведение нового строительства с внедрением его в существующую систему теплоснабжения, точечное вмешательство потребителей в систему путем оснащения объектов оборудованием автоматического регулирования тепловой энергии, привело к дисбалансу всей системы. Как результат, часть потребителей сталкивается с проблемой недогрева или перегрева объектов теплоснабжения. Необходимо пересмотреть все существующие схемы систем теплоснабжения районов с внесением изменений.

Оснащение объектов теплоснабжения автоматическими системами регулирования параметров тепловой энергии дает экономический эффект в 12–14 %, который в основном проявляется при устойчивых положительных температурах наружного воздуха. И это без учета затрат на расход электроэнергии на работу циркуляционных насосов. Расчетный расход тепловой энергии для обогрева объекта с отапливаемой площадью 4000 м<sup>2</sup> и тепловой нагрузкой 0,24 Гкал/ч, за средний календарный месяц при температуре наружного воздуха +0,2 °С и внутренней температуре воздуха +18 °С, составит 82 Гкал. При стои-



мости 1 Гкал 21,9 руб., затраты составят 1795,8 руб. После установки системы регулирования, расход снизится до 72 Гкал и составит 1576,8 руб. При этом, для такой тепловой нагрузки потребуется циркуляционный насос производительностью 10 м<sup>3</sup>/ч, мощность которого составит 0,4 кВт·ч. За календарный месяц, расход электроэнергии будет равняться 293 кВт. При стоимости 1 кВт электроэнергии 0,23 руб., затраты составят 67,4 руб. Общие затраты составят 1644,2 руб. Итого получаем, что 12–14 % экономии в месяц в денежном выражении составят 151,6 руб. или 909,6 руб. за сезон. При стоимости оснащения оборудованием 15–20 тыс. руб., получим срок окупаемости 16–22 года. За этот период произойдет двойная замена оборудования на новое и срок окупаемости увеличится. Если учесть тот факт, что основным насосным оборудованием, применяемым в системах отопления, являются Wilo, Grundfoss, DAB, возможны трудности с их обслуживанием. Аналогов отечественного производства в настоящее время нет. Отечественный производитель регулируемых гидроэлеваторов РГ, отмечает значительное падение спроса на продукцию. Такое оборудование широко применяется в системе ЖКХ и показало свою практичность с учетом эксплуатационных затрат.

Установка солнечных коллекторов для компенсации расхода электроэнергии на технические нужды, имеет место быть. Однако, кроме значительных затрат на оборудование и его обслуживание, не идеальных климатических условий, существует огромная проблема – утилизация отработанных солнечных панелей, которая может привести к экологической катастрофе.

Актуально стоит вопрос по децентрализации теплоснабжения с ликвидацией длинных и незагруженных паро- и теплотрасс, особенно в районных коммунальных хозяйствах, где тепловая сеть от районной котельной до потребителей имеет значительную протяженность и разветвленность, а объекты теплоснабжения представляют собой 1–2х этажные здания площадью от 100 до 500 м<sup>2</sup>. Приведенная тепловая характеристика для здания площадью 100 м<sup>2</sup>, при температуре наружного воздуха +0,2 °С, составляет 0,043 Гкал/м<sup>2</sup>·месяц («Справочник проектировщика», ч. 1. ч. 2 под редакцией Староверова И. Г. и Шиллера Ю. И., М: Стройиздат, 1990 г.), что в среднем на 56 % выше такого показателя для здания площадью 500 м<sup>2</sup>. Тепловые потери на участке тепловой сети, протяженностью 100 м. п. и наружным диаметром 48 мм, к такому отдельно стоящему зданию, будут составлять 84 % от его теплопотребления. Это приводит к колоссальному перерасходу топливно-энергетических ресурсов. Кроме этого необходимо учесть затраты на транспортировку теплоносителя, неизбежные утечки воды, гидравлические испытания и промывку тепловой сети, а так же эксплуатационные расходы по ее содержанию. Необходима государственная поддержка такого направления с переводом неэффективных объектов теплоснабжения на индивидуальное газовое отопление или электрообогрев, при необходимости развивая газификацию населенных пунктов и проводя модернизацию сетей электроснабжения.

Спорный вопрос по внедрению индивидуальных тепловых пунктов вместо центральных тепловых пунктов. С одной стороны, это дает возможность инди-

видуально настраивать требуемые параметры тепловой энергии (качественное регулирование) и устанавливать свой режим работы систем теплоснабжения, а также позволяет увеличить надежность системы. Снижение температуры воздуха в отапливаемых помещениях на 1 °С дает снижение теплоснабжения в среднем на 6 %. Для объекта теплоснабжения с тепловой нагрузкой системы центрального отопления 0,3 Гкал/ч, такой показатель может достигать 6 Гкал/мес., при среднемесячной температуре наружного воздуха –3 °С. Кроме того, ликвидируется тепловая сеть горячего водоснабжения от центрального теплового пункта до объекта теплоснабжения, что приводит к снижению тепловых потерь на наружных тепловых сетях и эксплуатационных расходов на их содержание. С другой стороны, внедрение индивидуальных тепловых пунктов влечет за собой оснащение каждого объекта теплоснабжения дополнительным оборудованием, таким как водоподогреватели, автоматика регулирования, циркуляционные насосы. Затраты на содержание оборудования и технологические расходы ложатся на эксплуатирующую организацию, которые не соизмеримы с полученным экономическим эффектом. В случае с центральным тепловым пунктом, технологические расходы ложатся на энергоснабжающую или транспортирующую организацию.

Актуальным вопросом также является внедрение преобразователей частоты (ПЧ) на сетевых, повысительных, циркуляционных насосах. Предпосылками такому мероприятию могут служить: неконтролируемое потребление энергоносителей; частая работа в режиме «пуск-остановка», что приводит к высокому износу оборудования в результате высоких пусковых токов; применение дросселирования энергоносителя. Эффект от установки ПЧ достигается на квадратных нагрузках: изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров: расхода (пропорционален числу оборотов); давления (пропорционально квадрату числа оборотов); потребляемой мощности (пропорциональна кубу числа оборотов). Снижение расхода электроэнергии для сетевого насоса типа КМ мощностью 15 кВт/ч и производительностью 100 м<sup>3</sup>/ч, при необходимости снизить производительность до 80 м<sup>3</sup>/ч, при условии установки ПЧ, составит:  $15 - 15 / (100 / 80)^3 = 7,3$  кВт/ч. Это лишняя мощность, которую можно сэкономить. Зачастую, подбор насосов осуществляется с запасом мощности, избыток которой ограничивается дросселированием, или осуществляется эксплуатация такого оборудования с избыточными характеристиками. При внедрении частотного регулирования в связи с уменьшением рабочей частоты вращения вала привода снижается износ насоса. В связи с плавными пусками и остановками уменьшаются гидравлические и механические нагрузки на технологическое оборудование (трубопроводы, запорную и регуливающую арматуру). Это позволит увеличить срок службы и межремонтный ресурс. То же можно сказать и про нагрузки на питающую сеть в связи с исключением пусковых токов при пусках электродвигателей насосов напрямую от сети.

### **Заключение**

Таким образом, мы приходим к выводу, что приоритетными направлениями по усилению энергобезопасности в сложившихся экономических условиях являются такие мероприятия как замена тепловых сетей на ПИ трубы, оптимизация схем теплоснабжения с пересмотром типов установленного оборудования и тепловая реабилитация объектов теплоснабжения.

### **Литература**

1. Республиканский профессиональный конкурс «Лидеры в строительстве» [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://stroykonkurs.by>. Дата доступа: 10.04.2022.
2. Техничко-экономическое обоснование внедрения систем управления с частотно-регулируемым электроприводом обоснование [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://chemtech.ru/tehniko-jekonomicheskoe-obosnovanie-vnedrenija-sistem-upravlenija-s-chastotno-reguliruемым-jelektroprivodom/> Дата доступа: 10.04.2022.
3. Тепловые насосы: недостатки, преимущества, проблемы и выгоды [Электронный ресурс] Режим доступа: [dom-i-remont.info](http://dom-i-remont.info). Дата доступа: 10.04.2022.

УДК 662.6

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ RDF-ТОПЛИВА PROSPECTS FOR THE USE OF RDF FUEL

К. А. Михолап

Научный руководитель – М. И. Позднякова, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
pozdneykova@bntu.by

К. Mikhalap.

Supervisor – M. Pozdnyakova, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация:* сделан литературный обзор альтернативного источника энергии, на примере RDF-топлива. Проанализированы его преимущества и недостатки, а также перспективы развития в качестве дополнительного энергетического ресурса.

*Abstract:* a literary review of an alternative energy source which uses RDF-fuel has been made. The advantages and disadvantages of this as well as the prospects for development as an additional energy resource are analyzed.

*Ключевые слова:* RDF-топливо, ТБО, ТКО, источник энергии, переработка, загрязнение.

*Keywords:* RDF-fuel, solid waste, energy source, waste recycling, pollution.

### Введение

Перед тем как понять, что такое RDF-топливо и почему оно важно, нужно обратиться к сфере переработки отходов, если говорить о принципах получения такого источника энергии, то отходы, которые нельзя или сложно переработать, есть источник RDF-топлива, он поставляется в виде гранул или брикетов.

Конкретно у такого типа производства энергии есть два пути использования: отправка на металлургические и цементные заводы с последующим сжиганием при высоких температурах, а также применение на тепловых электростанциях (ТЭЦ) и в районных котельных, где также используют сжигание, но температуры там заметно меньше [1].

### Основная часть

В настоящее время вопрос о применении RDF-топлива стоит наиболее остро. С одной стороны, это доступный источник энергии, а с другой опасный загрязнитель окружающей среды (ОС), обусловленный сложностями для первичного сбора отходов и последующим сжиганием, как итог получаем два противоположных полюса, выступающих за или против применения данной технологии. Опишем как «плюсы», так и «минусы» данного источника энергии более подробно.

Плюсы использования RDF-топлива [1, 2]:

1) одна тонна RDF-топлива заменяет тонну угля и тысячу кубов природного газа, а также решает проблемы накопления твердых коммунальных отходов (ТКО);

2) огромные запасы сырья для производства данного вида топлива;

3) уже имеются эффективные способы переработки и организации получения энергии из RDF-топлива, особенно в странах Европы и Северной Америки, их опыт можно позаимствовать, однако стоит учесть и наши особенности структуры как твердых бытовых отходов (ТБО), так и ТКО.

Минусы использования RDF-топлива [1, 2]:

1) необходимость строгого разделения отходов на микроуровне всех отраслей;

2) из-за недостатка опыта и другой структуры отходов, нужно разработать собственные технологии и оборудование;

3) неэффективность в экономическом плане без финансирования со стороны государства;

4) сжечь весь «мусор» не получится, так как такой объем RDF-топлива просто не имеет смысла;

5) при несоблюдении строгих правил при получении энергии из RDF-топлива или нарушении хотя бы одного из них, есть огромный риск выброса в ОС крайне токсичных и вредных веществ.

Так, например, в Российской Федерации на основе изучения опыта стран ЕС в области технологий получения RDF-топлива с учетом особенности сбора и состава ТКО и ТБО, предлагается следующая технологическая схема производства топлива:

1) сбор, транспортировка, хранение;

2) предварительное измельчение;

3) первичная сепарация, отделение от общей массы недопустимых для сжигания веществ;

4) основное измельчение;

5) вторичная сепарация для ликвидации оставшихся недопустимых веществ;

6) сушка при высоких температурах;

7) добавление дополнительных компонентов, которые повышают как связность, так и общую калорийность топлива;

8) изготовление брикетов под воздействием механического пресса [5, 6, 7].

На рис. 1 представлена инфографика по соотношению объема отходов в процентах, перерабатываемых различными способами в ЕС.

Энергетическое сжигание активно используется в Европе. Помимо Швеции, отходы активно перерабатывают в энергию в Германии, Финляндии, Франции [3].

Однако экологи справедливо обращают внимание на тот факт, что современный европейский тренд – постепенный отказ от технологии RDF. Ответственное потребление, ограничение выпуска одноразовых предметов, развитие переработки вторсырья сокращают потребность в оборудовании и технологиях энергетической утилизации на территории ЕС и США [2].

Таким образом, за период с 2014 по 2020 годы произошло увеличение объемов образования отходов с 52,5 тыс. тонн в 2014 до 61,2 тыс. тонн в 2020. Согласно данным [4], процентное содержание отходов растительного и животного происхождения составляет порядка 8 %, минерального происхождения – 21 %,

отходы химических производств и связанных с ними – 66 %, жизнедеятельности населения – 1,5 %, (осадки) водоподготовки котельно-теплового хозяйства и питьевой воды, очистки сточных, дождевых вод и использования воды на электростанциях – 3,5 %.

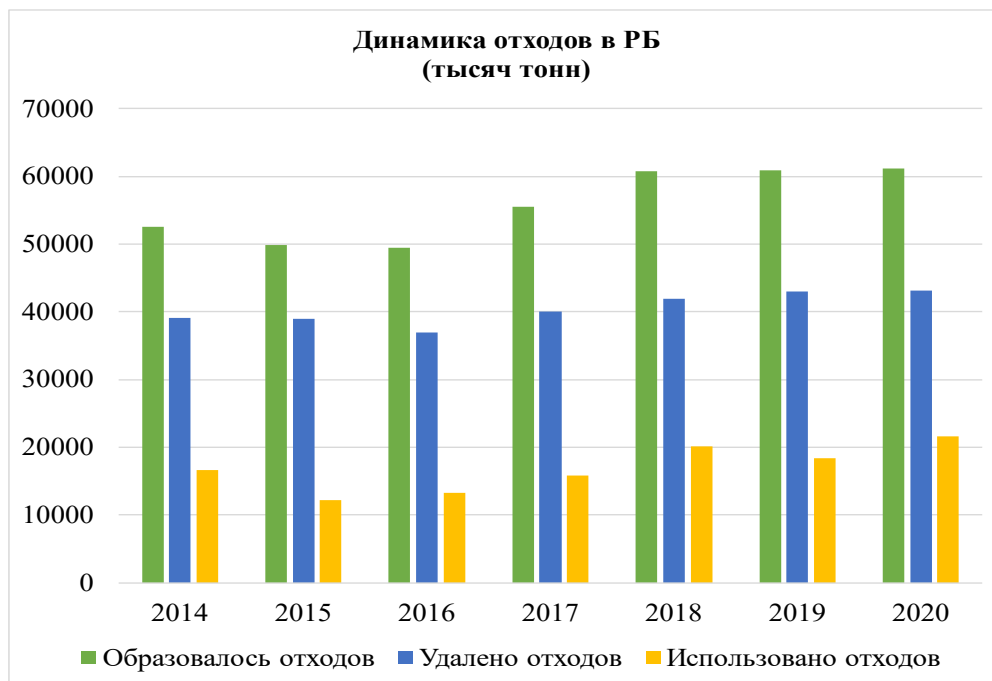


Рисунок 1 – Процентное соотношение перерабатываемых отходов в ЕС [3]

На рис. 2 показана тенденция образования отходов в Республике Беларусь за период с 2014 по 2020 гг.

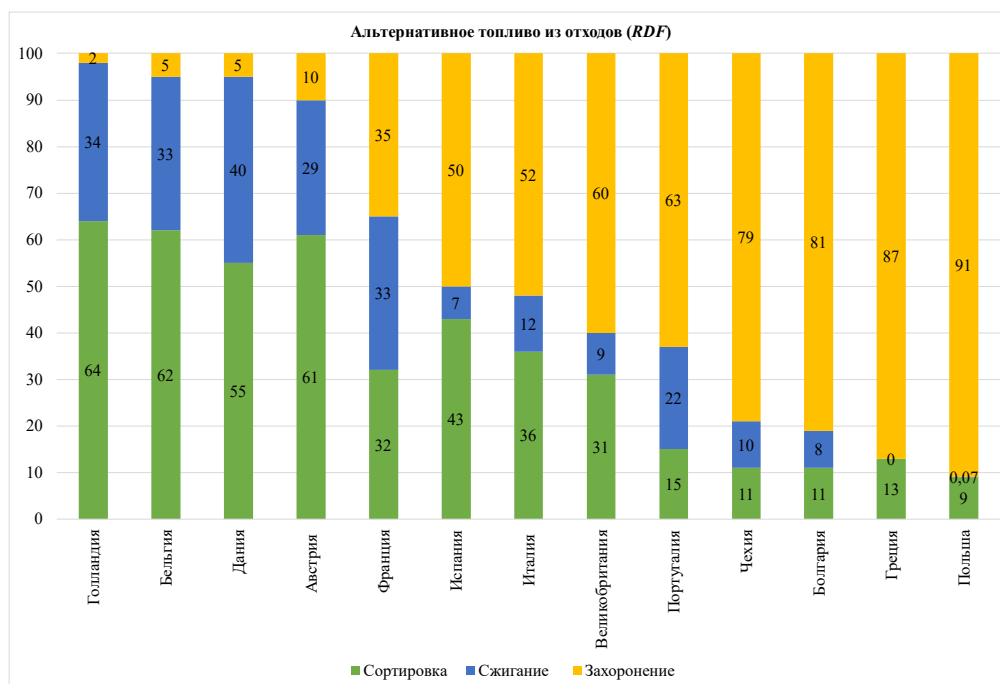


Рисунок 2 – Динамика образования, использования и удаления отходов производства [4]



Растущие полигоны для выброса мусора – это загрязнение воздуха, грунтовых вод и вывод из хозяйственного оборота значительных территорий. А еще – риск пожаров и усиление парникового эффекта из-за выбросов метана.

Увеличение объемов образования мусора требует незамедлительного принятия мер хотя бы по частичной утилизации отходов путем сжигания.

Экологи же предостерегают, что использование RDF тормозит развитие альтернативных экологичных способов обращения с мусором. Приоритетным для борьбы с отходами должно быть «предотвращение их образования». Но если в стране будет значительное число энергоисточников, ориентированных на сжигание RDF, лишать их топливной базы окажется нерационально [2].

### **Заключение**

Касательно Республики Беларусь стоит отметить, что пока у нас не будет налажена культура сортировки отходов, не разумно переходить к его сжиганию. В бак с коммунальными отходами помимо безобидных и традиционно сжигаемых фракций нередко попадают ртутные лампы и термометры, батарейки и аккумуляторы, электронные приборы, лакокрасочные материалы, отходы медикаментов. Их сжигание приводит к выделению токсичных веществ, способных накапливаться в почве и растениях, проникать в атмосферный воздух, ухудшая экологическую обстановку.

Для того, чтобы эффективно использовать RDF-топливо, необходимо в первую очередь создать сложную систему сбора отходов (желательно автоматическую), структурирующую всю однородную массу и делящую ее на компоненты, благодаря таким действиям можно существенно снизить уровень загрязнения ОС при сжигании данного вида топлива, начинать стоит с отдельного сбора мусора, привлекая к этому как граждан государства, так и предприятия.

Из вышесказанного необходимо создать некий механизм контроля за сбором и сжиганием топлива (введение нормативных документов и постановлений, модернизация очистных сооружений), который не применяется в настоящее время, либо имеет не такие строгие требования.

Также основным шагом будет расчет экономической выгоды при создании такого предприятия, для которого жизненно необходима финансовая поддержка, особенно в странах постсоветского пространства. Как следствие, создание специальных мер для предотвращения противоречий принципам экономики замкнутого цикла.

Уменьшение объема производимой энергии таким способом, чтобы как следует ограничить влияние RDF-топлива на ОС.

Несомненно, RDF-топливо может стать неплохой альтернативой ископаемому топливу при правильной организации процесса его получения. Но также важно учитывать экономический фактор и то, насколько процесс его производства дорогостоящий и осложняется в случае поступления смешанных отходов, не прошедших сортировку.

### Литература

1. Что такое RDF-топливо [Электронный ресурс] / Что такое RDF-топливо. – Режим доступа: <https://greenpeace.ru/expert-opinions/2021/09/16/chto-takoe-rdf-toplivo/>. – Дата доступа: 03.03.2022.
2. RDF – ресурс или угроза? Позволит ли переработка отходов в энергию решить мусорный кризис в России [Электронный ресурс] / RDF – ресурс или угроза? Позволит ли переработка отходов в энергию решить мусорный кризис в России. – Режим доступа: <https://1-engineer.ru/rdf-resource-ili-ugroza/>. – Дата доступа: 04.03.2022
3. Производство, сушка и грануляция альтернативных топлив из отходов (RDF/SRF) [Электронный ресурс] / Производство, сушка и грануляция альтернативных топлив из отходов (RDF/SRF). – Режим доступа: <https://a-r-c.ru/rdf-2/>. – Дата доступа: 03.03.2022.
4. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь: стат. ежегодник 2021 / Нац. стат. комитет Республики Беларусь; под ред. И. В. Медведевой [и др.] – Минск, 2021. – 203 с.
5. Кайгородов, О. Н. Переработка ТБО – сочетание многих технологий / О. Н. Кайгородов // Химический журнал. – 2015. – С.66-72.
6. Аракелова, Г. А. Анализ положительных и отрицательных факторов использования РДФ-топлива / Г. А. Аракелова // «Вестник университета» №11. – 2016. – С.39-44
7. Линия производства альтернативного топлива RDF [Электронный ресурс] / Линия производства альтернативного топлива RDF. – Режим доступа: <https://b-k-s.by/catalog/pererabotka/rdf/linii-proizvodstva/liniya/>. – Дата доступа: 03.03.2022.



УДК 662.811

**ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ТОРФОБРИКЕТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
**PERSPECTIVE FOR THE DEVELOPMENT OF THE PEAT BRIQUET INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS**

Д. А. Янов

Научный руководитель – В. В. Янчук, преподаватель-стажер  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
yanchuk@bntu.by

D. Yanov

Supervisor – V. Yanchuk, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** торф как сырье для экспорта, инновации в области производства торфяных брикетов, перспективы развития торфяной отрасли, газификация сельской местности, технологии сушки торфа, промышленная экология.*

***Abstract:** peat as a raw material for export, innovations in the production of peat briquettes, prospects for the development of the peat industry, gasification of rural areas, peat-drying technologies, industrial ecology.*

***Ключевые слова:** торф, торфобрикет, торфяные пеллеты, экспорт, импортозамещение, инновации, производство.*

***Keywords:** peat, peat briquette, peat pellets, export, import substitution, innovation, production.*

### **Введение**

Строительство и ввод в эксплуатацию брикетных заводов в 60-х годах позволило довести объемы производства брикетов в 1974 г. до 2,412 млн тонн, что является рекордным показателем за всю историю торфяной промышленности республики. Максимальная добыча торфа достигнута в 1974 году – 16,8 млн тонн, из них 9,1 млн тонн топливного торфа и 7,7 млн тонн торфа для нужд сельского хозяйства.

С конца 70-х годов происходит постепенная переориентация объектов энергетики, населения республики, с заменой использования торфа на другие виды топлива – газ и мазут. Торфяное топливо планомерно исключается из теплоэнергетики и к 1986 г. сжигание его на электростанциях и ТЭЦ прекращается. Вследствие этого происходит сокращение объемов добычи торфа и производства брикетов. Так, в 2001 году эти показатели составляли, соответственно, 2,0 и 1,1 млн тонн.

На современном этапе, торф является одним из немногочисленных местных топливно-энергетических ресурсов. Его доля в общем объеме местных топливно-энергетических ресурсов составляет около 15 процентов. В энергетическом балансе республики доля торфа составляет 2–3 процента. Кроме этого, производимые из торфа топливные брикеты являются социально значимым

продуктом, так как используются в качестве коммунально-бытового топлива на объектах социальной сферы и более чем в 200 тыс. домовладениях небольших городов и сельских населенных пунктов республики [1].

В тоже время, по состоянию на 2019 общий уровень газификации природным и сжиженным газом в Республике Беларусь составил порядка 97 %, общая протяженность газотранспортной системы – около 62 тыс. км. Все районные центры и города обеспечены централизованным снабжением природным газом. Потребителями являются 3,7 млн бытовых абонентов и примерно 15 тыс. организаций реального сектора экономики [2].

В то же время газификация сельской местности, по информации 2018 года, составляет около 40 %. Большинство из которых снабжаются сжиженным газом. Из которых 98,4 % газифицировано от газобаллонных установок, остальные – от групповых емкостных установок [3].

В решении данного вопроса может помочь уже имеющаяся сфера промышленности, а конкретно – торфяная.

### **Основная часть**

Говоря о перспективе использования торфа стоит начать с того, что использование его как топлива позволяет ежегодно замещать в экономике республики до 590 млн м<sup>3</sup> импортируемого природного газа стоимостью 107,7 млн долл. США. Следует отметить, что, по сравнению с импортируемым природным газом, местное торфяное топливо имеет значительно меньшую стоимость. Так, в пересчете на 1 т у. т., торфяные брикеты дешевле природного газа в 2,6 раза, а топливный фрезерный торф – в 4 раза [1].

Так же, говоря о экономической стороне, стоит заметить, что экспорт торфа является важной статьей формирования бюджета нашей страны. В 2010–2019 гг. годовые поставки в стоимостном выражении составляли от 9,8 млн до 30,9 млн долл. Экспорт осуществлялся в основном в страны дальнего зарубежья, в частности в ЕС. Наиболее значительными были поставки в Литву, Польшу, Швецию, Германию. На внешние рынки отгружается продукция как топливного (торфяные брикеты, сушенка), так и нетопливного (торф верховой кипованный, торфяные питательные группы) назначения. Например, по итогам 11 месяцев 2019 г. из 189,7 тыс. т торфяного экспорта организаций ГПО «Белтопгаз» (на их долю пришлось более 80 % экспорта в целом по стране) 113,6 тыс. т составила топливная группа, 76,1 тыс. т – нетопливная. На шведский рынок осуществлялись крупнооптовые навалынные поставки топливных брикетов, на литовский – также в основном топливная продукция, но уже упакованная для коммунально-бытовых потребителей. В Чехию, Германию, Италию и Турцию отгружали нетопливную группу, в основном торф верховой кипованный, а также готовые питательные грунты [4].

Посмотрев на современные тенденции деглобализации, а главное цены на природный газ в Европе, данные показатели будут только увеличиваться.

Говоря о внутреннем потреблении торфа, мы говорим, в основном, о потреблении торфа в виде торфяного брикета для дальнейшего использования как топлива. Так по данным ГПО «Белтопгаз», его доля в общем объеме местных

топливно-энергетических ресурсов составляет около 15 %, а в энергетическом балансе республики доля торфа составляет 2–3 процента.

Таблица 1 – Экспорт торфа по данным Белстат

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Вес, тыс. т.	425,6	419,8	474,9	252,9	174,9	170,1	193,1	230,5	230,3	250,0
Стоимость, млн долл.	21,6	28,6	30,9	16,9	10,8	12,2	9,8	13,7	16,1	14,6

Учитывая незначительную газификация сельской местности, около 40 %, торф может стать решение данного вопроса, а так же упростить и создать престиж проживания в ней. В настоящее время есть передовые технологии автоматизации сжигания и хранения данного вида топлива. Так же замечается серьезный скачек в технологии его сжигания.

Таким образом, мы можем дать и толчок развитию отечественным разработкам в области добычи, сушки и котлостроения.

В качестве примера можно рассмотреть вопрос сушки торфа. Наши заводы используют две основные технологии. Первая – сушка в трубе-сушилке. Вторая – сушка в трубчатых-барабанных сушилках типа «Цемаг». Говоря о втором типе установок стоит заметить, что используются они с 60-х годов, в следствии этого имеют колоссальный износ, но не имеют современных аналогов. Так сушки, чей износ является критическим, заменяют на менее изношенные, с выведенных из работы заводов.

Сейчас, так же уже существует и функционирует мобильный блочный мини-завод по производящий торфяные пеллеты.



Рисунок 1 – Мобильный мини-завод по производству торфяных пеллет [5]

Так же в заключении, мы можем получить скачек в развитии технологий в области промышленной экологии, а конкретнее говоря в области пылеочистки. Современной тенденцией является применение рукавных фильтров и скрубберов Вентури для обеспыливания производства торфяных брикетов.

### **Заключение**

В конце данного исследования, можно говорить о экономически выгодной перспективе. Данная сфера приносит и будет приносить существенный вклад в экономику нашей страны. Так же дальнейшее ее развитие может привести к улучшению жизни людей в сельской местности, поднять престиж и общий уровень жизни в ней. И что не мало важно дать толчок развитию отечественной промышленности и конструированию, что является особо важным для импортозамещения, и развития научной деятельности в Республике Беларусь.

### **Литература**

1. О развитии торфяной промышленности ГПО «БЕЛТОПГАЗ» [Электронный ресурс] Режим доступа: //www.topgas.by[2015]. URL: [http://www.topgas.by/content/news/156\\_\\_o\\_razviti-i\\_torfyanoy\\_promyshlennosti\\_gpo\\_beltorgaz](http://www.topgas.by/content/news/156__o_razviti-i_torfyanoy_promyshlennosti_gpo_beltorgaz).
2. Уровень газификации в Беларуси достиг 97 % [Электронный ресурс] Режим доступа: //www.belta.by/ [2019]. URL: <https://www.belta.by/economics/view/uroven-gazifikatsii-v-belarusi-dostig-97-360020-2019/>.
3. Уровень газификации населения сельской местности Беларуси достиг почти 40 % [Электронный ресурс] Режим доступа: //www.belta.by/ [2018]. URL: <https://www.belta.by/economics/view/uroven-gazifikatsii-naselenija-selskoj-mestnosti-belarusi-dostig-pochti-40-288463-2018/>
4. Первичный анализ торфяной промышленности Беларуси [Электронный ресурс] Режим доступа: //https://bahna.land/ru[2020]. URL: <https://bahna.land/ru/bolota/pervichnyj-analiz-torfyanoj-promyshlennosti-belarusi>
5. В Лидском районе заработал мобильный комплекс по производству торфяных брикетов [Электронный ресурс] Режим доступа://http://lidanews.by [2014]. URL: <http://lidanews.by/news/economy/2516news.html>

УДК 697.328

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ  
В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОКОТЛАМИ  
ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF BODY BATTERIES IN HEAT  
SUPPLY SYSTEMS WITH ELECTRIC BOILERS**

Н. В. Лях, Д. Н. Машаро, А. И. Побережнюк

Научный руководитель – И. Н. Прокопеня, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
prokopenya@bntu.by

N. Liakh, D. Masharo, A. Poberejnyk  
Supervisor – I. Prokopenya, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье будет дана оценка простого срока окупаемости использования аккумуляторов теплоты, применяемых в системах энергоснабжения жилых помещений.*

***Abstract:** this article will assess the simple payback period for the use of heat accumulators used in residential energy supply systems.*

***Ключевые слова:** аккумулятор теплоты, бак аккумулятор, окупаемость.*

***Keywords:** heat accumulator, battery tank, payback.*

### **Введение**

Аккумулятор теплоты предназначен для накопления тепловой энергии в моменты переизбытка выработки теплоты и отдачи тепловой энергии, когда наблюдается ее дефицит. Данный принцип позволяет сгладить график выработки тепловой энергии и сократить затраты топлива на ее производство.

### **Основная часть**

Применение аккумуляторов теплоты для экономии на отоплении целесообразно при использовании электрических котлов (накопление тепла в ночное время, по ночному тарифу на электроэнергию).

Средний норматив потребления тепловой энергии на отопление 1 м<sup>2</sup> общей площади жилых помещений по жилым домам, не оборудованным приборами группового учета расхода тепловой энергии, на отопительный период 2021/2022 года составляет 0,0179 Гкал/1 м<sup>2</sup> при полном месяце отопления [1].

Средняя продолжительность отопительного периода в РБ составляет 200 дней, 6,67 месяца [2].

Объем аккумулятора теплоты, м<sup>3</sup>:

$$V = 1,1 \frac{(Q \cdot 3600) / 30}{\rho \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (1)$$

где  $Q$  – среднемесячный расход энергии на отопление, кВт·ч;



$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);

$t_1, t_2$  – конечная и начальная температура воды в баке, соответственно, °С;

1,1 – коэффициент, учитывающий теплопотери бака аккумулятора.

Плотность воды примем 1000 кг/м<sup>3</sup>, удельную массовую изобарную теплоемкость воды примем 4,18 кДж/(кг·°С), начальная температура воды в баке 70 °С, конечная температура воды в баке 95 °С,

Таблица 1 – Расход энергии на отопления в зависимости от площади помещения

Площадь помещения, м <sup>2</sup>	Среднемесячный расход энергии на отопление,		Расход энергии на отопление за 1 отопительный период, кВт·ч
	Гкал	кВт·ч	
80	1,432	1665,4	11108,3
100	1,790	2081,8	13885,4
120	2,148	2498,1	16662,5
140	2,506	2914,5	19439,6
160	2,864	3330,8	22216,6
180	3,222	3747,2	24993,7
200	3,580	4163,5	27770,8

Расчетный объем следует округлить до ближайшего большего объема производимых баков аккумуляторов.

Таблица 2 – Необходимый объем бака аккумулятора в зависимости от площади помещения

Площадь помещения, м <sup>2</sup>	Объем бака аккумулятора		Цена бака [3], Вт
	расчетный, м <sup>3</sup>	действительный, л	
80	2,104	3000	6333
100	2,630	3000	6333
120	3,156	4000	7772
140	3,681	4000	7772
160	4,207	5000	8636
180	4,733	5000	8636
200	5,259	5000+300	9955

Стоимость электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения с присоединенной мощностью оборудования более 5 кВт в период минимальных нагрузок (с 23:00 до 6:00) составит 0,1354 Вт за 1 кВт·ч, в остальное время суток – 0,2514 Вт [4].

Аккумуляирование тепла, используя электродотел в ночное время суток, позволит сэкономить  $0,2514 \text{ Вт} - 0,1354 \text{ Вт} = 0,116 \text{ Вт}$  за 1 кВт·ч

Экономия за один отопительный период составляет:

Таблица 3 – Экономия за один отопительный период в зависимости от площади помещения

Площадь помещения, м <sup>2</sup>	Расход энергии на отопление за 1 отопительный период, кВт·ч	Экономия, Вт
80	11108,3	1288,57
100	13885,4	1610,71
120	16662,5	1932,85
140	19439,6	2254,99
160	22216,6	2577,13
180	24993,7	2899,27
200	27770,8	3221,41

Срок окупаемости аккумулятора теплоты составляет:

Таблица 4 – Срок окупаемости бака аккумулятора в зависимости от площади помещения

Площадь помещения, м <sup>2</sup>	Цена бака [3], Вт	Экономия, Вт	Срок окупаемости, отопительный период
80	6333	1288,57	4,9
100	6333	1610,71	3,9
120	7772	1932,85	4,0
140	7772	2254,99	3,4
160	8636	2577,13	3,4
180	8636	2899,27	3,0
200	9955	3221,41	3,1

Полученные данные можно свести к графику.

Линия тренда показывает, что чем выше площадь отапливаемого помещения, тем меньше срок окупаемости. Однако присутствуют скачки вверх при переходе к следующему стандартному объему аккумулятора теплоты, после снова снижение.

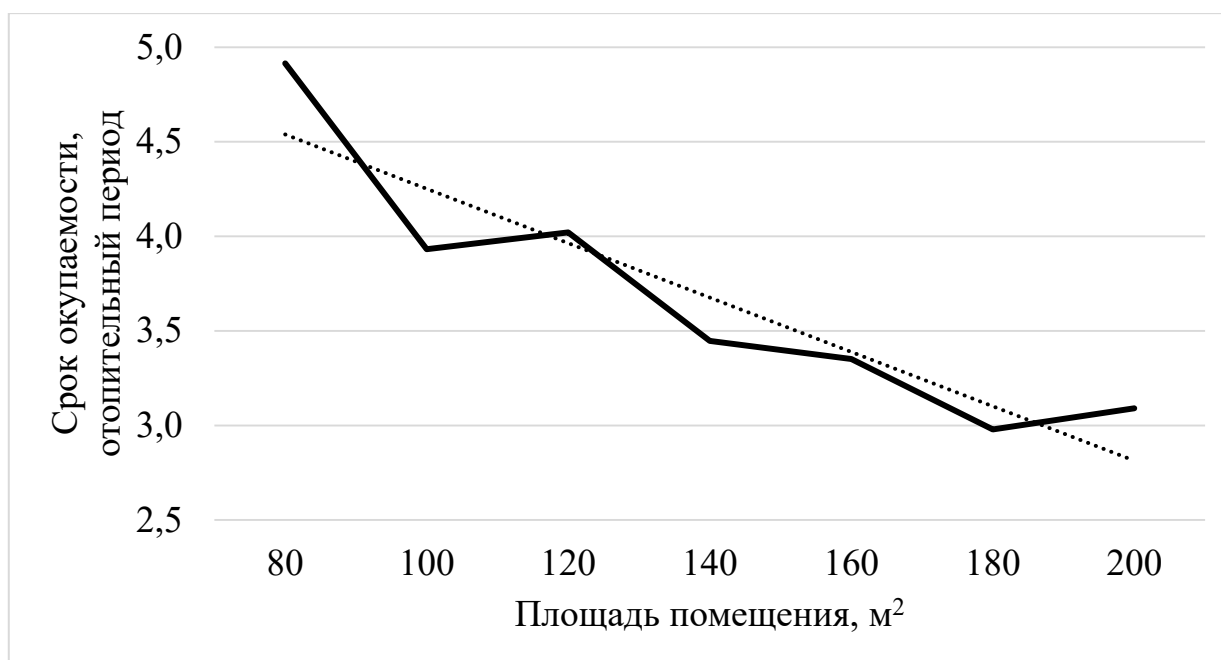


Рисунок 1 – Зависимость срока окупаемости от площади помещения

### Заключение

Применение аккумуляторов теплоты позволяет существенно сократить затраты на отопление и благоприятно влияет на энергосистему, в случае использования электродкотла. Окупаемость данного мероприятия достаточно быстрая: от 3,0 до 4,9 отопительных сезонов, при среднем сроке службы бака аккумулятора теплоты в 15–20 лет.

### Литература

1. Об установлении средних нормативов потребления тепловой энергии на отопление и подогрев воды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=R921o0111041&p1=1&p5=0>. – Дата доступа: 18.04.2022.
2. Отопительный период и его показатели: градусо-сутки отопительного периода, наружная температура [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://teplo-info.com/snip/otopitelniy\\_period](https://teplo-info.com/snip/otopitelniy_period). – Дата доступа: 18.04.2022.
3. Теплоаккумуляторы (буферные емкости) [Электронный ресурс]. Каталог. – Режим доступа: <https://kotloff.by/category/teploakkumulyatory/?sort=price&order=asc>. – Дата доступа: 18.04.2022.
4. Тарифы на электрическую энергию [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/novye-tseny-na-gaz-i-tarify-na-elektrichestvo-dejstvujut-s-1-janvarja-477668-2022/>. – Дата доступа: 18.04.2022.



УДК 621.165

**УХУДШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЧНД ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ  
ТУРБИН НА МАЛОРАСХОДНЫХ РЕЖИМАХ  
DEGRADATION OF THE RELIABILITY OF OPERATION OF LPP HEAT-  
ING TURBINES IN LOW-FLOW MODES**

М. П. Кузьмич, А. Ю. Апанасевич, В. А. Вирко  
Научный руководитель – З. Б. Айдарова, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
pte@bntu.by

M. Kuzmich, A. Apanasevich, V. Virko  
Supervisor – Z. Aidarova, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** ухудшение надежности работы чнд теплофикационных турбин на малорасходных режимах.*

***Abstract:** deterioration of the reliability of the operation of CND heating turbines in low-flow modes.*

***Ключевые слова:** выхлопная часть, корневой вихрь, турбина, часть низкого давления.*

***Keywords:** exhaust part, root vortex, turbine, low pressure part.*

### **Введение**

Часть низкого давления теплофикационных турбин в течение отопительного периода обычно работает с минимальными вентиляционными пропусками пара в конденсатор –  $D_k^{\min}$ . В ряде случаев малорасходные режимы (МР) встречаются и в переходный осенне-весенний и даже летний период. На МР ЧНД существенно изменяется характер течения пара в ней, в частности, рабочий поток пара отрывается от корневых сечений ступеней, а его место у корня занимает обратный со стороны выхлопного патрубка поток, получивший название в литературе корневого вихря. Корневой вихрь захватывая последнюю ступень или несколько ступеней разворачиваясь смешивается с основным рабочим потоком пара в ЧНД. Смешение обоих потоков приводит к понижению общей температуры среды в ЧНД, что может классифицироваться как эффект самоохлаждения. В ряде случаев, при относительно коротких лопатках последних ступеней (турбина Т-110/120-130), самоохлаждение ЧНД обеспечивает допустимый температурный уровень выхлопа в широком диапазоне МР. Однако для большинства современных турбин самоохлаждения ЧНД недостаточно и приходится выполнять специальное охлаждение выхлопной части турбины. К таким турбинам относится уже турбина ПТ-60-130/13 с длиной последней рабочей лопатки 650 мм при среднем диаметре 2000 мм. На примере этой турбины проследим возможные границы изменения  $D_k^{\min}$  и остальных режимных характеристик, влияющих на охлаждение ЧНД (табл. 1).

Таблица 1 – Изменение основных режимных характеристик ЧНД турбины ПТ-60-130/13 при паспортной плотности поворотной диафрагмы (ПД) и расчетном вакууме в конденсаторе

Основные характеристики ЧНД и их размерность	Давление перед ПД, бар				
	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5
Пропуск пара, кг/с	2,1	3,5	5,2	7,0	8,7
КПД ЧНД, %	-180,0	-35,0	+10,0	+24,0	+35,0
Мощность ЧНД, кВт	-283	-157	+72	+366	+717

**Основная часть**

Анализ табл. 1, показывает, что в паспортном диапазоне изменения параметров в наибольшей степени изменяются КПД ЧНД и пропуск пара в него. В условиях эксплуатации эти отклонения могут быть еще более существенными, например, проводимые во время капитальных ремонтов уплотнения поворотной диафрагмы ЧНД уменьшают  $D_k^{min}$  в 5–6 раз, по сравнению с паспортными их значениями. В еще больших пределах изменяется КПД и мощность ЧНД, что приводит к разогреву выхлопной части турбины. Этот разогрев бывает столь значительным, что обгорает краска на выхлопном патрубке. Ощутимо ухудшаются и условия работы последних ступеней, а разогрев выхлопа может стать причиной горячей расцентровки турбины из-за деформации стула последнего подшипника. Надежность работы ЧНД, в таких случаях, требует решения комплекса вопросов: заданной плотности поворотной диафрагмы, охлаждения ЧНД и выхлопной части турбины, обеспечение надежности пускоостановочных режимов, а также режимов с глубокой ночной разгрузкой турбогенераторов. Важным здесь представляется анализ характера развития корневого отрыва в функции величины относительного объемного пропуска пара по состоянию его за последней ступенью –  $GV_k$  (рис. 1).

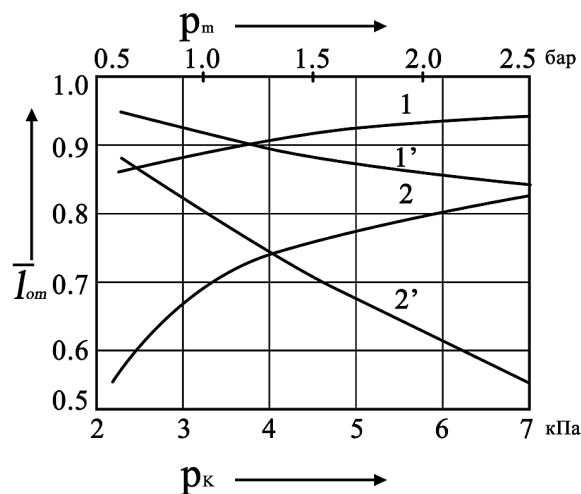


Рисунок 1 – Зависимость величины зоны корневого отрыва в последней ступени турбины ПТ-60-130/13 (ст. № 5) МТЭЦ-3 от давления в конденсаторе ( $P_k$ ) и отопительном отборе ( $P_T$ ): 1,2 –  $P_T = 1,2$  бара,  $P_k = var$ ; 1,2' –  $P_k = 5$  кПа,  $P_T = var$ ; 1,1 – поворотная диафрагма уплотнена в 4 раза; 2,2' – поворотная диафрагма заводской плотности

Эти результаты получены автором на натурной турбине ПТ-60-130/13 МТЭЦ-3 путем аэродинамического зондирования потока в ее ЧНД. Анализ рис. 1 показывает, что при паспортной плотности ПД и расчетных параметрах пара перед ней не менее 60 % лопатки последней ступени занято корневым вихрем и, естественно, уплотнение ПД увеличивает зону отрыва. Тепловой перепад на колесе последней ступени становится отрицательным, то есть колесо начинает потреблять мощность разогревая поток рабочего пара. Во время исследований на натуральных машинах была выявлена значительная неустойчивость течения в зоне корневого вихря. Наблюдались случаи изменения зоны активного течения и характеристик потока на ее границе, особенно, температуры (рис. 2, 3).

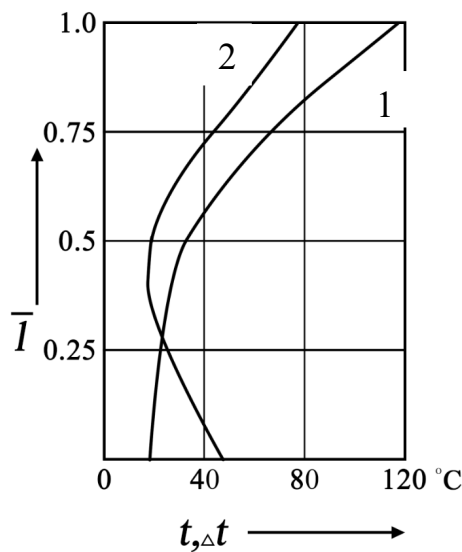


Рисунок 2 – Изменение температуры потока пара на входе в последнюю ступень турбины Т-100-130 (ст. № 7) МТЭЦ-3 вдоль радиуса (1) и ее разницы по замерам слева и справа (2) в плоскости горизонтального разъема на малорасходном режиме ЧНД

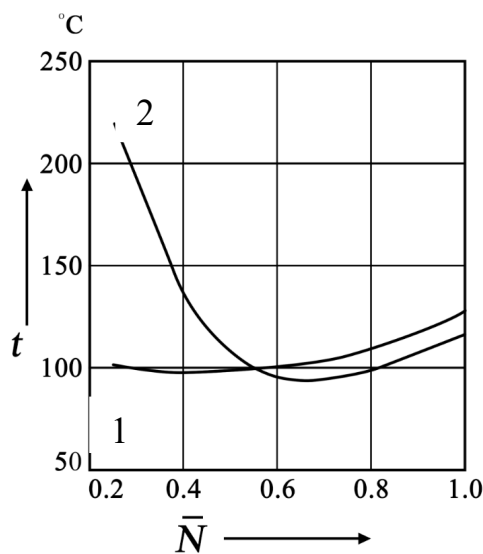


Рисунок 3 – Зависимость температуры пара в верхнем (1) и нижнем (2) отопительных отборах турбины Т-100-130 от глубины ее разгрузки с сохранением номинального расхода сетевой воды через сетевую установку

Это подтверждается и данными других авторов [2, 5]. Температурные режимы ЧНД сильно ухудшаются при привлечении теплофикационных турбин к регулированию графика электрических нагрузок в провальной его части. Это ухудшение начинается еще до ЧНД перед ПД. Разогрев рабочего пара в ЧНД в ряде случаев может превышать 200 °С [1, 2]. На последних лопатках таких турбин замечены даже цвета побежалости свидетельствующие об изменении структуры металла лопаток последней ступени. Все это подтверждает настоятельную необходимость разработки новых более совершенных схем и режимов охлаждения ЧНД.

### **Заключение**

Тензометрические испытания работы облопачивания ЧНД на МР проведенные рядом турбостроительных фирм и научных организаций выявили существенное ухудшение его виброхарактеристик [2]. Показано, что колебания лопаток могут носить даже резонансный характер [3, 6]. Усачевым И. П. выявлен новый возбудитель колебаний рабочих лопаток на МР [6]. Им является обнаруженный еще ранее Лагуном В. П., так называемый, торовый вихрь в периферийных сечениях межвенцевого зазора последней ступени [3]. Особенностью торового вихря в последних ступенях турбин на МР является то, что он вращается всегда с постоянной частотой равной примерно половине от рабочей, для быстроходных турбин его частота составляет – 28,5 Гц [6]. Это означает, что вероятность попадания лопаток последней ступени турбины в резонанс по четвертой кратности очень велика.

### **Литература**

1. Фаддеев, И. П., Боровков, В. М. Эрозия рабочих лопаток ЧВД паровых турбин на частичных нагрузках / Боровков, В. М., Фаддеев, И. П., Иванов, В. А. и др. // Изв. Вузов СССР. Энергетика. – 1973. – № 4. – С. 128–129.
2. Оценка разгона эрозионно опасной капельной влаги в осевом зазоре на частичных нагрузках / Боровков В. М., Фаддеев И. П., Иванов В. А. и др. // Изв. Вузов СССР. Энергетика. – 1985. – № 7. – С. 37–42.
3. Фаддеев, И. П. Эрозия влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение. – 1974. – 280 с.
4. Явельский, М. Б., Шилин, Ю. П. Эрозия выходных кромок рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин и мероприятия по ее устранению // Энергомашиностроение. – 1961. – № 10. – С. 11–15.
5. Осипов, А. М., Сидоров, В. В., Хорзеев, Ю. И. Создание и исследование сепараторов предварительного разделения пароводяной смеси для вертикального парогенератора ПГВ–250 // Сб. научн. тр. – 1982. – п. 199. – С. 47–53.
6. Демидова, Л. В., Сорокин, Ю. Л., Допустимые скорости пара и газа для вертикальных и наклонных жалюзийных сепараторов // Энергомашиностроение. – 1972. – № 3. – С. 44.

УДК 004.94

**СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ANSYS TWIN BUILDER**  
**CREATING DIGITAL DOUBLES BASED ON THE ANSYS TWIN BUILDER SOFTWARE MODULE**

А. С. Семененко

Научный руководитель – В. И. Лазакович, преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

pte@bntu.by

A. Semenenko

Supervisor – V. Lazakovich, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** краткое описание программного продукта ANSYS Twin Builder, анализ возможностей программы, создание и применение цифровых двойников.*

***Abstract:** a brief description of the ANSYS Twin Builder software product, analysis of the program's capabilities, creation and application of digital doubles.*

***Ключевые слова:** программный продукт, цифровые двойники, моделирование, проектирование, технологии.*

***Keywords:** software product, digital doubles, modeling, design, technology.*

### **Введение**

Универсальным и наиболее эффективным методом познания окружающего мира является моделирование, которое применяется практически во всех сферах жизни. Для упрощения решения любой задачи используется формирование того или иного типа модели.

Программный продукт «Ansys Twin Builder» создан для системного моделирования создания, проверки и развертывания цифровых двойников.

Программа помогает инженерам установить работоспособность объекта в реальном мире, что существенно снижает затраты на производство, повышает качество и ускоряет время выхода товара на рынок потребителей.

### **Основная часть**

В инженерном деле все больше набирает обороты практика создания цифровых двойников. Цифровой двойник – это цифровая модель любых объектов и систем [1]. Он наиболее верно воссоздает форму и действие оригинального сооружения. Цифровой двойник необходим для имитации того, что произойдет с оригиналом при определенных условиях.

Компания «Ansys» предоставляет собственную разработку цифрового двойника, которая основана на полном использовании технологий численного моделирования. Крупнейшие компании давно применяют моделирование для создания виртуальных моделей сложных конструкций. Однако в настоящее время Интернет вещей позволяет отправлять сведения с датчиков, подключенных к устройству, в цифровой двойник почти в настоящем времени.

Цифровой двойник используется на всех стадиях «жизненного цикла» изделия. К ним относится проектирование, производство и эксплуатация.

Уже в процессе предварительного проектирования есть возможность создания заводской модели разрабатываемой конструкции для выбора наиболее верного технического решения (рис. 1). Затем в процессе инженерного проектирования данная модель, может усовершенствоваться с использованием наиболее достоверных системных моделей элементов, которые получены по результатам многомерных численных вычислений, преобразованных в модель пониженного порядка – ROM-модели.



Рисунок 1 – Поэтапное проектирование

Находясь на этапе изготовления системная модель уже может быть названа цифровым двойником, она служит для определения требуемых допусков и верного изготовления с сохранением всех технических характеристик, а также выявляет и предотвращает неполадку в процессе тестирования.

На этапе эксплуатации модель дорабатывается и проводится ряд диагностик на исправность изделия и повышение эффективности работы.

### **Заключение**

Цифровой двойник с каждым годом набирает все большую популярность во всех странах мира. Он позволяет снизить расходы на техническое обслуживание, за счет проверки изделия на работоспособность и его взаимодействие с окружающими условиями, способствует устранению аварий, увеличивает производительность.

В настоящее время применение цифрового двойника затрагивает многие отрасли промышленности, например, энергетика; строительство; медицина; транспортные системы; авиация.

Со временем он будет введен в проектирование всех конструкций.

### **Литература**

1. Цифровой двойник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cadfem-cis.ru/products/digital-twin/>. – Дата доступа: 02.05.2022.

2. История компании «Ansys» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>. – Дата доступа: 02.05.2022.



УДК 621.316.1

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ПОДСТАНЦИЕЙ С СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ  $Y/Y_{к.0}$**   
**ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF TWO-TRANSFORMER CONSUMER SUBSTATION WITH THE SCHEME OF CONNECTION OF WINDINGS OF TRANSFORMERS  $Y/Y_{к.0}$**

О. Д. Готенко, Т. А. Санец

Научный руководитель – В. П. Счастный, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет

Г. Минск, Республика Беларусь

O. D. Gotenko, T. A. Sanets

Supervisor – Schastny V, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье рассмотрены вопросы управления оборудованием двухтрансформаторной подстанцией, возможность использовать трансформатор с компенсирующей обмоткой для поддержания баланса реактивной мощности в электрических сетях и требуемых уровней напряжения.*

***Annotation:** the article deals with the issues of equipment control by a two-transformer substation, the possibility of using a transformer with a compensating winding to maintain the balance of reactive power in electrical networks and the required voltage levels.*

***Ключевые слова:** трансформаторная подстанция, адаптивная система, трансформатор с компенсирующей обмоткой, фильтрокомпенсирующие устройство.*

***Keywords:** transformer substation, adaptive system, transformer with compensating winding, filter-compensating device.*

### **Введение**

Современные промышленные предприятия используют высокотехнологичное оборудование на базе цифровых технологий, регулируемого электропривода с управляемыми тиристорными устройствами, источников бесперебойного питания электроприемников, современных аппаратов электросварки и дуговых электрических печей, установок индукционного нагрева, газоразрядных источников излучения, приводящих к изменению характера и баланса нагрузок в электрических сетях. Увеличивается доля нагрузки с нелинейными характеристиками, уменьшается пропускная способность электрических сетей, все это ведет к ухудшению качества электроэнергии, надежности электроснабжения и дополнительным потерям.

Для обеспечения нормальных условий работы электроприемников, повышения надежности и экономичности системы электроснабжения предприятия необходимо обеспечить потребительские трансформаторные подстанции адаптивной системой управления оборудованием. Эта система должна иметь воз-



возможность регулирования напряжения, уровня реактивной мощности и высших гармоник тока и напряжения, автоматическое повторное включение, оперативное переключение ввода-вывода трансформаторов на параллельную работу, включение и отключение коммутационных аппаратов отходящих линий низкого напряжения, блокировки от обратной трансформации, обеспечивать взаимосвязь регулирования различных параметров и релейной защиты. Адаптивная система управления оборудованием трансформаторной подстанции должна иметь управляющую связь с более высоким уровнем энергосистемы.

### **Основная часть**

Набор оборудования, коммутационных аппаратов и функциональных возможностей адаптивной системы должен быть экономически обоснован.

При выборе архитектуры построения адаптивной структуры управления оборудованием конкретной потребительской трансформаторной подстанцией необходимо учитывать наличие на предприятии дежурного персонала (диспетчерской), существующую степень автоматизации, аналоговых или цифровых каналов связи, возможность размещения оборудования в распределительном пункте подстанции с необходимыми температурными условиями, финансовые возможности предприятия др.

Наиболее дорогостоящая архитектура, представляющая реализацию функции измерения, управления, защита, передачи данных и т. д. для трансформаторной подстанции с использованием многочисленных мультиметров с программным обеспечением и мощные серверные платформы, расположенные в сервисном помещении и способные обрабатывать большое количество данных и решать множество алгоритмических задач в режиме реального времени. Для потребительских подстанций это недоступно. Можно расширить возможности имеющихся систем управления и защиты. В этом случае использовать устройства, отвечающие за отдельную функцию. Например, на каждый фидер установить цифровой терминал с контроллером присоединения, заменить блок аналогового ввода и дискретного ввода-вывода на цифровой интерфейс, добавить аналоговые и дискретные сопряжители, сетевые коммутаторы и т. д. Разработанных устройств для достижения этой архитектуры с использованием поддержки протоколов HART, Modbus и другие. Однако, такой подход тоже весьма затратный для потребительской подстанции. Наиболее приемлемый, на наш взгляд, использование основного регулятора (сервера) на базе сервисных платформ небольшой производительности, позволяющих выполнять наиболее необходимые поставленные задачи для потребительской трансформаторной подстанции.

На рис. 1 представлена схема адаптивной системы управления потребительской двухтрансформаторной подстанцией, с использованием трансформаторов с схемой соединения обмоток звезда – звезда ноль с общестержневой компенсационной обмоткой ( $Y/Y_{к.о}$ ).

Подстанция содержит набор силового оборудования, коммутационных аппаратов, датчиков тока и напряжения, расположенных в распределительных устройствах высокого и низкого напряжения.

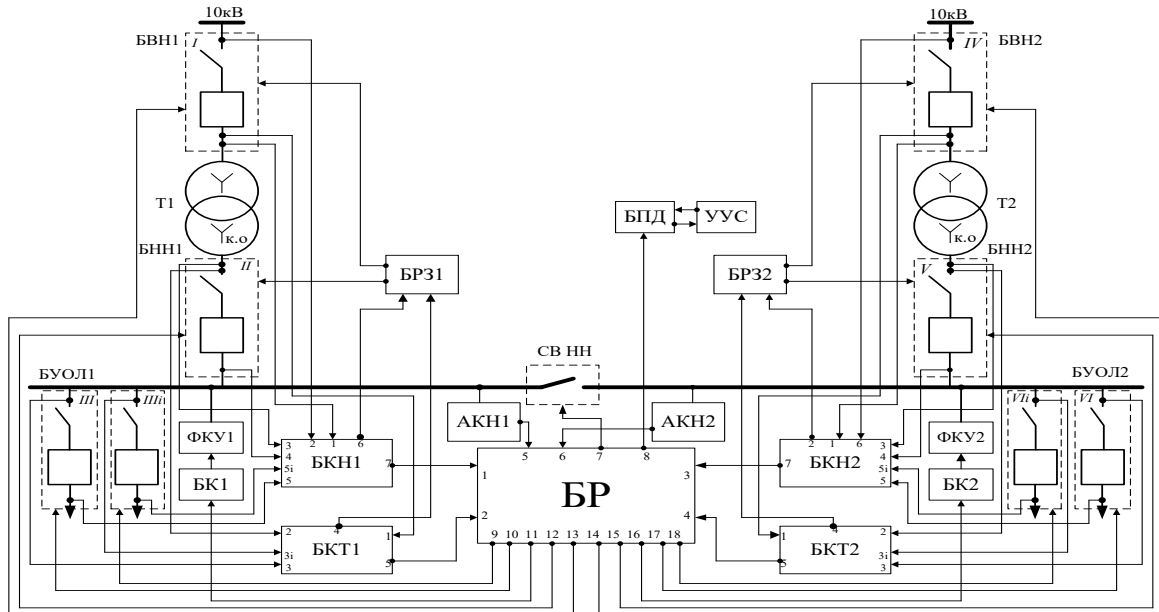


Рисунок 1 – Схема адаптивной системы управления потребителем двухтрансформаторной подстанции:

БВН1, БВН2, БНН1, БНН2 – управляемый блок силового оборудования высокого и низкого напряжения; БКН1, БКН2 – блок контроля напряжений; БКТ1, БКТ2 – блок контроля токов; ФКУ1, ФКУ2 – фильтро-компенсирующее устройство; БК1, БК2 – блок коммутации; АКН1, АКН2 – анализатор качества напряжения; БР – блок регулятор; СВНН – секционный выключатель низкой стороны; Т1, Т2 – силовой трансформатор; БРЗ1, БРЗ2 – блок релейной защиты; БУОЛ1, БУОЛ2 – управляемый блок силового оборудования отходящих линий; БПД – блок передачи данных; УУС – удаленная управляющая связь с диспетчерской и более высоким уровнем энергосистемы

Блоки силового оборудования отходящих линий снабжены коммутационными аппаратами, датчиками тока и напряжения, обеспечивающими возможность контроля состояния аппаратов и формирования управляющих сигналов для дистанционного управления с блока регулятора. Принцип работы регулятора основан на анализе поступающих сигналов с блоков контроля токов и напряжений, анализаторов качества напряжений, формирования управляющих сигналов с помощью программного обеспечения и заданных режимов [1]. Это позволяет управлять коммутационными аппаратами, осуществлять контроль их включения и отключения, выбирать оптимальный уровень компенсации реактивной мощности, высших гармоник тока и напряжения, не выходя за допустимые пределы уровня напряжения. Количество ступеней регулирования установки компенсации реактивной мощности (КРМ) выбирается после предварительного обследования объекта и установки надбавки с помощью переключателя без возбуждения на трансформаторах с учетом требований к трансформаторам при параллельной работе [2]. В представленной схеме не используются КРМ с блоками статических конденсаторов, так как они очень чувствительны к перегрузкам по току, которые зависят от несинусоидальности напряжения. Для подавления высших гармоник требуются силовые фильтры, представляющие собой последовательно включенные емкости и индуктивности с частотой настройки (резонанса) на конкретную гармонику се-

ти. Поэтому, целесообразно использовать для данной схемы управляемую компенсацию реактивной мощности (УКРМ) с пассивными расстроенными фильтрами высших гармоник. Работа УКРМ основана на анализе токов, напряжений, реактивной мощности, токов высших гармоник при заданной последовательности подключения отдельных ступеней. В программе формирования управляющих сигналов взят порядок возрастания номера гармоник. Токораспределение высших гармоник производится в соответствии с алгоритмом переключения ступеней от низшего уровня к высшему и наоборот, с контролем тока блока статических конденсаторов, включенных для компенсации реактивной мощности. Использование трансформаторов с схемой соединения обмоток  $Y/Y_{K.O}$  (рис. 2) позволяет исключить ступени индуктивностей с частотой резонанса на 3 и кратные трем высших гармоник, так как каждый трансформатор имеет компенсирующую обмотку, находящуюся на трех стержнях магнитопровода поверх всех обмоток, намотанную встречно вторичной обмотке и имеющей число витков, равное  $1/3$  числа витков одной фазы этой обмотки. Третья и кратные трем высшие гармоники имеют угол сдвига фаз равным нулю, они суммируются в общих нулевых точках, к которым одним концом присоединена компенсирующая обмотка, а другой присоединяется к нагрузке. Проходя через трехфазную нагрузку в общей точке эти гармоники образуют утроенный ток, который через общую нулевую точку проходит по компенсирующей обмотке и создает магнитный поток, который направлен встречно потоку, созданному этими же гармониками во вторичной обмотке и компенсирует его [3]. Трансформатор с схемой соединения обмоток  $Y/Y_{K.O}$  имеет нулевую группу соединения обмоток и может работать на параллельную работу с трансформаторами  $Y/Y_H$ . Габариты последнего позволяют переоборудовать его в  $Y/Y_{K.O}$  путем намотки общестержневой компенсирующей обмотки. Трансформатор способен поддерживать симметрию напряжения. Это важно при наличии многочисленных однофазных нагрузок на промышленном предприятии. Способность адаптивной схемы управления трансформаторной подстанции поддерживать в автоматическом режиме, а также управляться удаленно в заданных допустимых пределах уровней напряжения, реактивной мощности, высших гармоник благоприятно сказывается на работе релейной защиты, отсутствии отказов и ложных срабатываний.

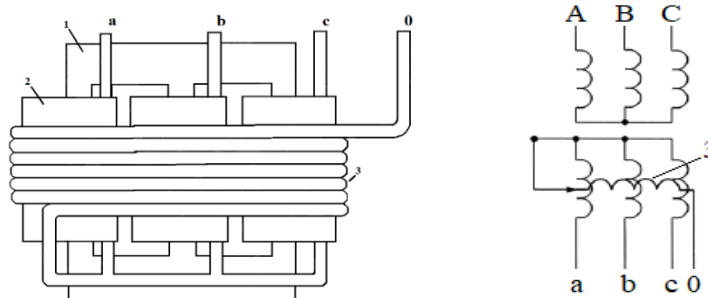


Рисунок 2 – Общий вид и схема соединения обмоток трансформатора  $Y/Y_{K.O}$ :  
 1 – магнитопровод; 2 – обмотки фазы высшего и низшего напряжения; 3 – общестержневая компенсационная обмотка

### **Заключение**

Использование трансформаторов с компенсирующей обмоткой в предложенном устройстве адаптивного управления потребительской двухтрансформаторной подстанции позволяет исключить в устройстве УКРМ ступени индуктивностей с частотой резонанса на третью и кратные трем высших гармоник, обеспечить надежную работу системы управления, повысить качество электроэнергии, пропускную способность сетей, уменьшить потери.

### **Литература**

1. Счастный, В. П. Устройство управления оборудованием двухтрансформаторной подстанции при параллельной работе трансформаторов / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 55-58.
2. Счастный, В. П. Особенности выбора установок компенсации реактивной мощности/ В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич// Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., в 2 ч. – Минск: БГАТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 393-394.
3. Патент полезной модели № 4534 Устройство управления техническими средствами трансформаторной подстанции / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич, А. И. Жуковский; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» – заявл. 2007.12.29; опубл. 15.04.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008.

УДК 621.311

## ОСОБЕННОСТИ СВОТОВОТХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ РЕКЛАМНЫХ БИЛБОРДОВ С ПОМОЩЬЮ DIALUX

## FEATURES OF LIGHTING CALCULATIONS OF ADVERTISING BILLBOARDS WITH USING THE DIALUX

А. Д. Рубаносова, В. В. Скакалова

Научный руководитель – В. Н. Калечиц, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

Viachaslaukn@gmail.com

A. Rubanosova, V. Skakalova

Supervisor – V. N. Kalechyts, Senior lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация:* данная статья посвящена анализу применения газоразрядных и светодиодных светильников для наружной рекламы.

*Abstract:* in this article the attention is drawn to analysis of the use of gas-discharge lamps and LED luminaires for outdoor lightning.

*Ключевые слова:* наружное освещение, газоразрядные лампы, светодиодные светильники, кривая силы света (КСС), Dialux, освещенность.

*Keywords:* outdoor lightning, gas-discharge lamps, LED luminaires, light intensity curve, Dialux, illumination.

### Введение

Каждый объект народного хозяйства не обходится без систем освещения, которые используются для безопасной эксплуатации объектов, работы персонала, декоративной подсветки объектов (памятников, фонтанов, зданий). Билборды – популярный вид наружной рекламы. Конструкции всем доступны для просмотра, привлекают внимание и сообщают всю необходимую информацию о рекламируемом продукте. А при использовании подсветки в темное время суток он будет выполнять свою функцию круглосуточно.

Для освещения рекламных щитов подойдет не каждый светильник, ведь билборды – это элементы наружной установки, которые должны работать в любую погоду.

В Беларуси на сегодняшний день, для освещения рекламных билбордов и щитов наиболее распространенными источниками света являются прожекторы с лампами ДРИ, вынесенные вперед на кронштейнах. Светодиодные светильники или светодиодные ленты, которые располагаются по периметру щита, а так же могут использовать люминесцентные светильники, оснащенные лампами Т5 или неоновыми трубками [1].

В данной научной работе с помощью программы DIALux, произведен сравнения источников света для выбора наиболее эффективного освещения рекламного билборда размером 6×4 м.

### Основная часть

Освещение объектов, расположенных на открытом воздухе (на улице), требует ламп большой мощности, так как в ночное и вечернее время имеется большой эффект рассеивания. Это связано с тем, что отсутствует светоотражающий эффект, в отличие от закрытых помещений. Соответственно, происходит увеличение затрат на единицу освещаемой площади сооружения (повышение энергоемкости) по сравнению с объектами, располагаемыми внутри зданий. Чаще всего в освещении предметов, находящихся на открытом воздухе, преобладают газоразрядные светильники, в которых установлены лампы типа ДРИ, ДНАТ и светодиодные светильники (LED). На сегодняшний день в Беларуси для освещения различных объектов, расположенных на улице, в использовании преобладают светильники ДНАТ (85 %), но именно в рекламном освещении в настоящее время идет внедрение светодиодных светильников (LED). Светодиодные светильники обладают рядом преимуществ: возможность динамического регулирования уровня освещенности, установки автоматизации и проблескового режима. Сравнительная характеристика газоразрядных и светодиодных светильников приведена в табл. 1.

По результатам из табл. 1 сделан вывод, что газоразрядные светильники с лампами ДНАТ обладают плохой цветопередачей, но при этом они требуют меньших денежных затрат для потребления мощности в 1 Вт. Если сравнивать газоразрядные светильники с лампами типа ДРИ и ДНАТ и светодиодные светильники (LED), то в плане долговечности и экономичности (наименьшего потребления мощности) лучшим выбором по этим критериям будет светодиодный светильник (LED).

Рассмотрено сравнение светотехнических данных и расчетных значений освещенности светодиодных, газоразрядных (натриевые высокого давления) и светильников с лампами ДРИ, устанавливаемых для освещения билборда 6×4 м (рис. 1), используемого для уличной рекламы (табл. 2).

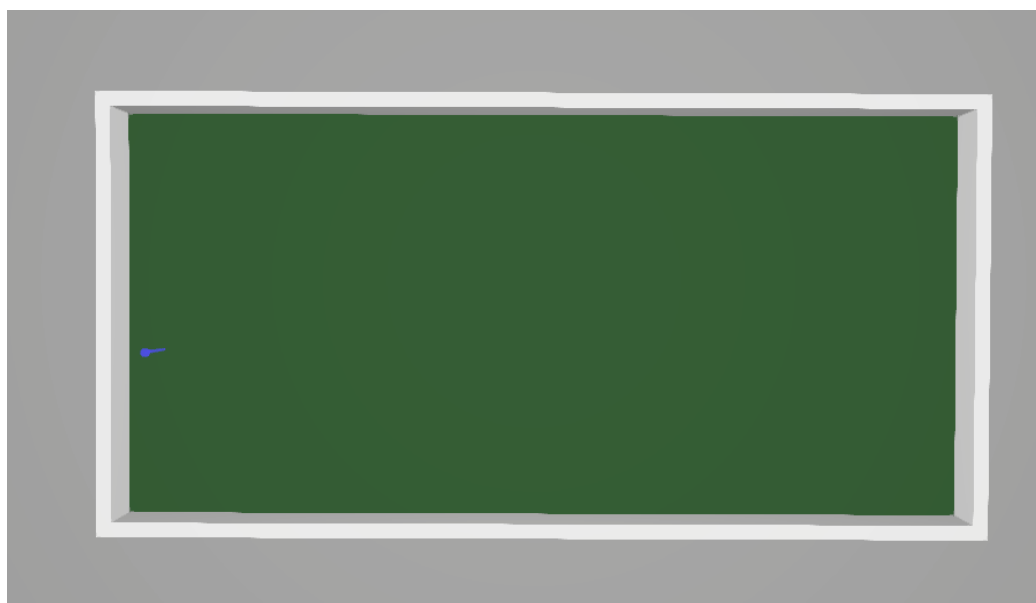


Рисунок 1 – Проект билборда 6×4



Таблица 1 – Сравнение характеристик газоразрядных и светодиодных светильников

Типы светильников	Газоразрядные светильники		Светодиодные светильники (LED)
	ДРИ	ДНАТ (высокого давления)	
Область применения	Осветительные системы рекламных билбордов и витрин, в прожекторных системах стадионов и освещении торговых-развлекательных сооружений	Для освещения парков, торговых центров, дорог, а также, в некоторых случаях, для декоративного архитектурного освещения	Применяются повсеместно
Световая отдача, лм / Вт	80 до 110	до 120	120
Срок службы, часов	До 9000	До 15000	До 87600
КПД, %	0,85	0,85	0,95
Температура эксплуатации	-40...+40	-20...+40	-60...+60
Недостатки	Содержит ртуть, значение светового потока чувствительно к сетевому напряжению, неудовлетворительная энергоэффективность, долгий запуск и перезапуск	Световой поток зависит от температуры окружающей среды, плохая цветопередача, наличие ртути в том или ином количестве, а также долгий запуск и перезапуск.	Высокая стоимость

Если сравнивать все три светильника, которые будут освещать билборд по их светотехническим характеристикам, то можно сделать вывод, что светодиодный светильник, имеющий наименьшую потребляемую мощность, выдает наибольший световой поток и КПД. Наибольшую световую отдачу, среди сравниваемых, будет иметь светильник с лампами ДРИ [2].

В Беларуси на сегодняшний день нет какого-либо нормирования для освещения рекламных билбордов, щитов и т.д., поэтому выбрана средняя освещенность, которая будет приятна глазу и не будет слепить (не более 1500 лк). Светильники, которыми будет освещаться билборд, выбирались по одинаковому типу КСС (Г-1). Типы КСС светильников приведены на рис. 2.



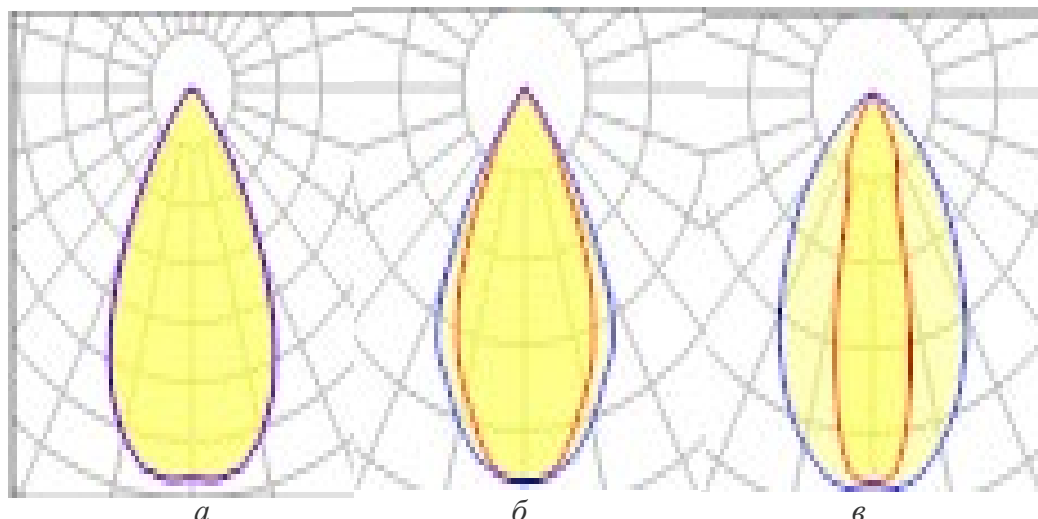


Рисунок 2 – Типы КСС светильников:  
*a* –светодиодный светильник (ENDO LIGHTING); *б* – светильник с лампами ДРИ (WE-EF);  
*в* – натриевый светильник высокого давления (WE-EF)

Таблица 2 – Сравнительная таблица источников света задействованных в рекламном освещении

Название	Светодиодный светильник ERD7475W_RX397N (ENDO LIGHTING)	Светильник с лампами ДРИFLB141 [EE] (WE-EF)	Натриевый светильник высокого давления FLB441 [M] (WE-EF)
Светотехнические данные			
Световой поток от светильников	6450	6181	3500
КПД, %	94,3	65,1	51,5
Потребляемая мощность, Вт	60,6	115	80
Световая отдача, лм/Вт	106,4	153,7	43,8
Расчетные значения освещенности			
Среднее	714 лк	1206 лк	725 лк
Минимальное	213 лк	19,8 лк	101 лк
Максимальное	1938 лк	19053 лк	1914 лк
Мин/среднее	0,3	0,016	0,14
Мин/макс	0,11	0,01	0,053

При освещении баннера и восемью светодиодными светильниками средняя освещенность по баннеру составляет 714 лк, минимальная освещенность

получается равной 213 лк, а максимальная при этом достигает 1938 лк. Распределение освещенности на билборде 8 светодиодными лампами представлено на рис. 3.

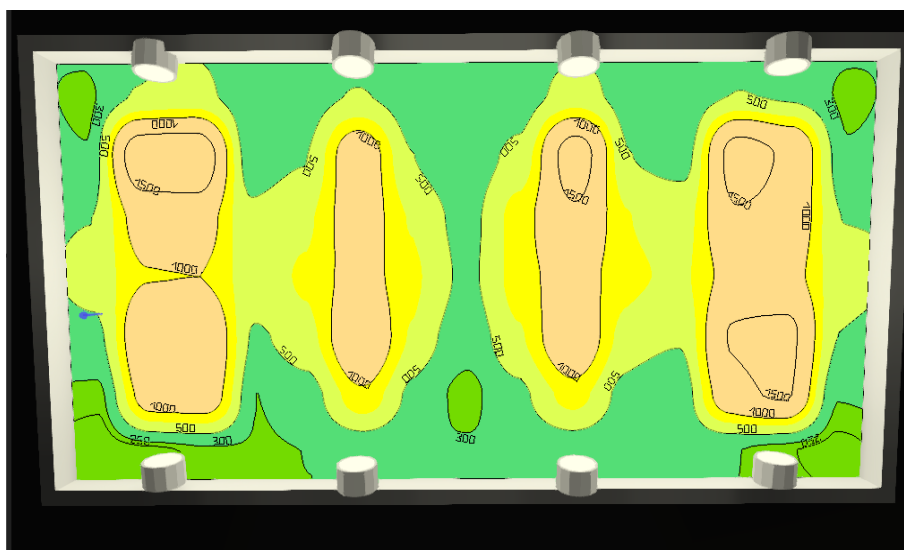


Рисунок 3 – Распределение освещенности на билборде восьмью светодиодными лампами

Для качественного освещения, способного обеспечить комфортное восприятие, будем использовать четыре светильника с лампами ДРИ, средняя освещенность которых по расчету 1206 лк, минимальная освещенность приходится на края верхних углов билборда, и она равна 19,8 лк, максимальная же освещенность достигает в этом случае 19053 лк, распределение освещенности на билборде с четырьмя светильниками с лампами ДРИ представлено на рис. 4.

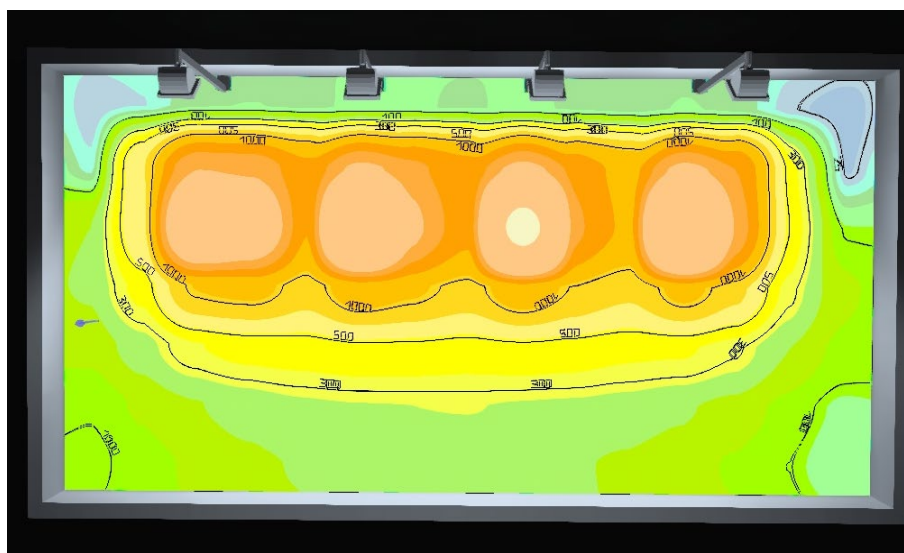


Рисунок 4 – Распределение освещенности на билборде с четырьмя светильниками с лампами ДРИ

При освещении билборда пятью натриевыми лампами высокого давления средняя освещенность получилась 725 лк, минимальная освещенность равна 101 лк, максимальная освещенность равна 1914 лк, уровень освещенности пятью натриевыми лампами высокого давления представлен на рис. 5.

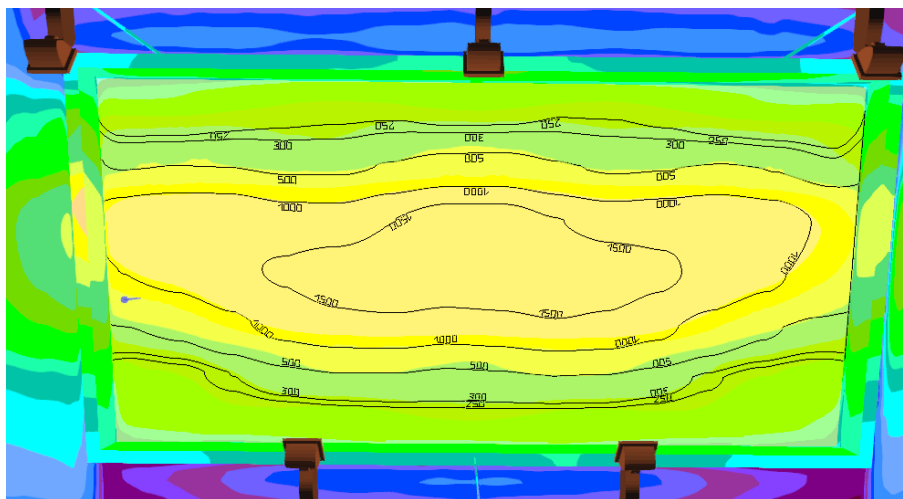


Рисунок 5 – Распределение освещенности на билборде 5 натриевыми лампами высокого давления

### Заключение

Исходя из расчетов DIALux при сравнении освещенности тремя видами светильников с одинаковыми типами КСС, можно сделать вывод, что для освещения, данного билборда 6×4 м и равномерного распределения освещенности, необходимо взять либо 8 светодиодных, либо 4 светильника с лампами ДРИ, либо 5 натриевых светильников высокого давления. При этом большую, среднюю и максимальную освещенность будут выдавать четыре светильника с лампами ДРИ, и наилучшее распределение освещенности будут показывать 5 натриевых светильников высокого давления.

### Литература

1. Подсветка баннеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://1posvetu.ru/svetodizajn/podsvetka-bannerov.html>. – Дата доступа: 09.03.2022.
2. Каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lumsearch.com/ru#0>. – Дата доступа: 9.03.2022

УДК 621.311

**КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ. ВЛИЯНИЕ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛА-  
ВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**  
**VOLTAGE FLUCTUATIONS. INFLUENCE OF ELECTRIC ARC FURNACES  
ON VOLTAGE FLUCTUATIONS**

В. В. Ласица

Научный руководитель – И. В. Колосова, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

kolosova@bntu.by

V. Lasitsa

Supervisor – I. Kolosova, Senior Lecturer

Belarussian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье дано понятие о колебаниях напряжения, причин их возникновения, а также их характеристик. Также рассмотрено влияние дуговых сталеплавильных печей на колебания напряжения и способы снижения колебаний от них.*

***Abstract:** this article provides the concept of voltage fluctuations, the reasons for their occurrence, as well as their characteristics. Also considered the effect of arc steel-smelting furnaces on voltage fluctuations and ways to reduce oscillations from them.*

***Ключевые слова:** качество электроэнергии, колебания напряжения, фликер, дуговая сталеплавильная печь, мощность короткого замыкания.*

***Keywords:** electricity quality, voltage fluctuations, flicker, arc steel-smelting furnace, short circuit power.*

### **Введение**

Проблема качества электроэнергии становится все более актуальной в связи с ростом мощностей отдельных электроприемников (ЭП), в частности имеющих резкопеременный характер нагрузки, появлением большого количества ЭП с нелинейной вольтамперной характеристикой, а также появлением ЭП, чувствительных к ухудшению качества электроэнергии. Из-за некачественной электроэнергии, а также из-за возможных проблем с качеством электроэнергии может наблюдаться ущерб следующего характера: увеличение потерь электроэнергии, преждевременное старение изоляции электрооборудования, увеличение затрат на эксплуатацию, ложное срабатывание релейной защиты и автоматики и т. д.

Одним из контролируемых параметров качества электроэнергии являются быстрые изменения напряжения, т. е. колебания напряжения. Наиболее частыми виновниками ухудшения напряжения являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП).

### **Основная часть**

Колебания напряжения относятся к быстрым изменениям напряжения продолжительностью менее одной минуты, численно характеризующееся кратковременной  $P_{st}$  и длительной  $P_{lt}$  дозами фликера. Под фликером понимаются колебания светового потока, а под дозой фликера – мера восприятия человеком

колебаний светового потока. Согласно ГОСТ32144-2013 предельно допустимые нормы кратковременной дозы фликера составляет  $P_{st} = 1,38$ , а для длительной дозы фликера –  $P_{lt} = 1$ . Кратковременная доза фликера  $P_{st}$  рассчитывается за 10 минут, длительная доза фликера  $P_{lt}$  – за 2 часа. Колебания напряжения приводят к изменениям светового потока, что негативно сказывается на здоровье и утомляемости человека.

Причиной возникновения колебаний напряжения является резкопеременный характер нагрузки. В меньшей степени на колебания напряжения оказывают влияние бытовые ЭП. Также колебания напряжения сказываются на работе электрооборудования и на технологическом процессе в целом. Колебания могут привести к выходу из строя конденсаторов, а также аппаратов, где они содержатся; выходу из строя пускорегулирующей аппаратуры газоразрядных ламп и их погасанию; вибрациям или отпаданию якоря у магнитных пускателей и т. д. Как было сказано выше, ДСП очень сильно влияют на колебания напряжения. Колебания от них условно делятся на постоянные и переменные. Постоянные колебания обусловлены дрожанием электродов и изменением проводимости среды, возникающих при плавке металлов. Переменные колебания возникают из-за обвала шихты, растягиваний и погасаний электрической дуги, из-за притягивания электрической дуги к стенам ДСП. Особенность ДСП состоит еще в том, что процесс расплавки под каждым электродом может отличаться, соответственно, колебания по фазам также могут отличаться.

Принято считать, что при работе  $n$  одинаковых ДСП в режиме расплава, колебания напряжения будут в допустимых пределах, если выполняется следующее условие:

$$\frac{\sqrt[4]{n} \cdot S_{\text{НОМ.П}}}{S_{\text{КЗ}}} \leq 0,01, \quad (1)$$

где  $S_{\text{НОМ.П}}$  – мощность питающего трансформатора печи, МВ·А;

$S_{\text{КЗ}}$  – мощность короткого замыкания, МВ·А.

Если печи разной мощности, то должно выполняться следующее условие:

$$S_{\text{НОМ.П}}^{\text{max}} \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ.П}i}}{S_{\text{НОМ.П}}^{\text{max}}}} \leq 0,01, \quad (2)$$

где  $S_{\text{НОМ.П}}^{\text{max}}$  – максимальная мощность печного трансформатора ДСП, МВ·А.

Мощность короткого замыкания находится по формуле:

$$S_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z}, \quad (3)$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение сети в точке, в которой проверяются колебания напряжения;

$Z$  – полное сопротивление элементов от источника питания до рассматриваемой точки.

Если условие (1) и (2) не выполняются, то колебания напряжения от ДСП можно снизить:

- 1) увеличением мощности трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП);
- 2) подключением ДСП к точке с большей мощностью короткого замыкания;
- 3) питанием потребителей и ДСП от разных секций шин ГПП или распределительного пункта (РП);
- 4) применение статических источников реактивной мощности.

Выполнение первого условия обусловлено тем фактом, что чем выше мощность трансформатора, тем ниже его сопротивление. Более низкое сопротивление приводит к увеличению мощности короткого замыкания. Данный способ не является рациональным, так как увеличение мощности трансформатора приводит к снижению коэффициента его загрузки, что приводит к негативным последствиям.

Второй способ может быть реализован так, как изображено на рис. 1.

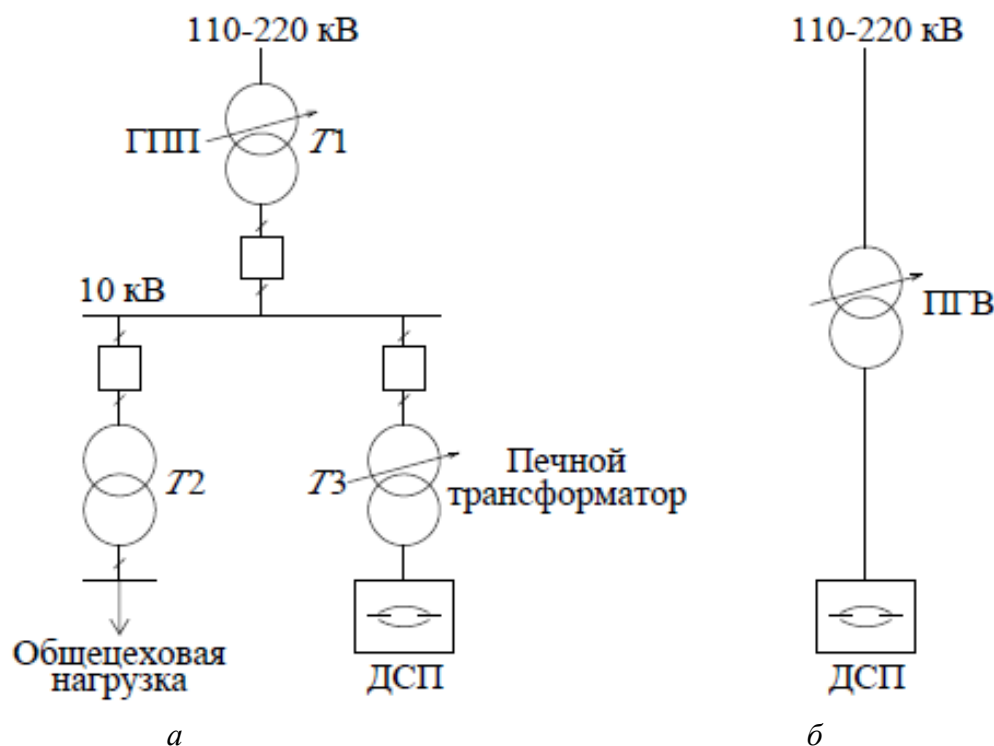


Рисунок 1 – схема питания ДСП от общих шин

На рис. 1, а ДСП питается от шин ГПП 10 кВ, а на рис. 1, б – подстанцию глубокого ввода с напряжением на высокой стороне 110–220 кВ. Из этого следует, что при питании ДСП от ПГВ с высшим напряжением 110–220 кВ имеет место большее значение мощности короткого замыкания вследствие более высокого напряжения в отличие при питании ДСП от шин ПГВ напряжением 10 кВ.



Третий способ может быть реализован так, как изображено на рис. 2. Так как ДСП и спокойная нагрузка питаются от шин разных трансформаторов, то колебания от ДСП не передаются в ветвь, питающую потребителей, имеющих спокойный характер нагрузки.

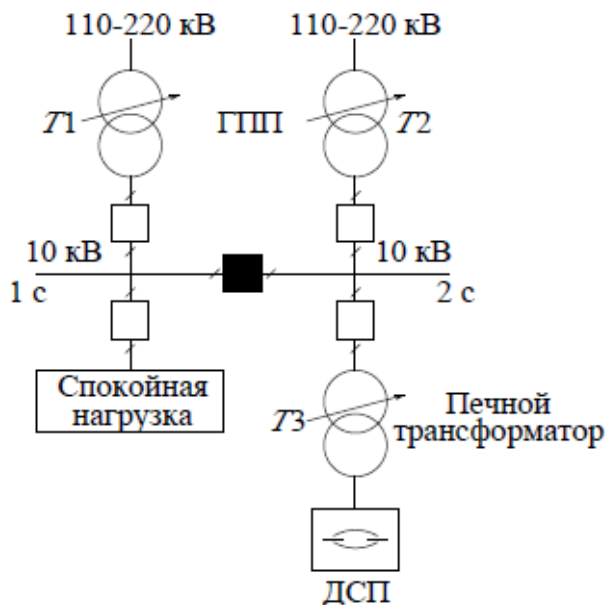


Рисунок 2 – схема питания потребителей с выделением электрических нагрузок

Четвертый способ основан по выполнению мероприятий по компенсации реактивной мощности. При этом необходимо учитывать, что при работе ДСП скорость изменения реактивной нагрузки может доходить до 200–500 Мвар/с. Реализация данного способа представлена на рис. 3.

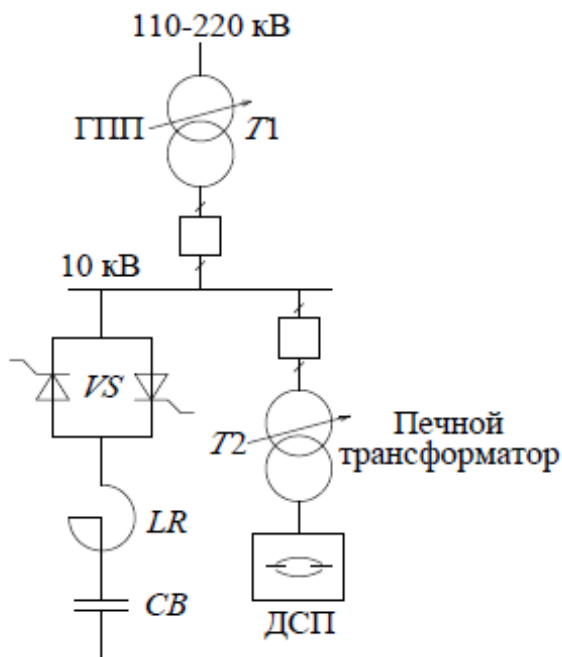


Рисунок 3 – схема питания ДСП с подключением к шинам ГПП статических источников реактивной мощности

Статические источники реактивной мощности представляют собой конденсаторные батареи с тиристорным управлением, а при необходимости плавного регулирования выдаваемой реактивной мощности в их состав входит реактор. Статические источники реактивной мощности могут регулировать выдаваемую реактивную мощность по каждой фазе в отдельности, они быстродействующие, занимают мало места и менее требовательны к обслуживанию. В состав статических источников реактивной мощности входит блок управления. Блок управления должен не только анализировать текущее потребление реактивной мощности, но также прогнозировать ее будущее значение.

### **Заключение**

Проанализировав способы снижения колебаний напряжения, можно сделать вывод о том, что наиболее рациональным способом снижения колебаний напряжения от ДСП является способ отдельного питания ДСП и других нагрузок от разных секций шин ГПП. Также рациональным может быть применение статических источников реактивной мощности, так как они помимо снижения колебаний напряжения способствуют уменьшению реактивной мощностью, потребляемой ДСП и другими ЭП.

### **Литература**

1. Влияние дуговых сталеплавильных печей на работу электрооборудования [электронный ресурс] / влияние дуговых сталеплавильных печей на работу электрооборудования. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dugovyh-staleplavilnyh-pechey-na-raboty-elektrooborudovaniya/>. – Дата доступа 13.04.2022.
2. Показатели качества электроэнергии в сталеплавильном производстве [электронный ресурс]-/ показатели качества электроэнергии в сталеплавильном производстве. – Режим доступа: [http://www.researchgate.net/publication/341216358\\_Pokazateli\\_kacestva\\_elektroenergii\\_v\\_staleplavilnom\\_proizvodstve/](http://www.researchgate.net/publication/341216358_Pokazateli_kacestva_elektroenergii_v_staleplavilnom_proizvodstve/) – Дата доступа 13.04.2022.

УДК 621.3

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НОВЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВ**  
**INNOVATIVE TECHNOLOGY OF NEW SYNCHRONOUS MOTORS OF MODERN ELECTRIC CARS**

А. А. Антипов

Научный руководитель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
svkon2000@gmail.com

А. Antsipau

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье отражены основные преимущества синхронного реактивного двигателя с инкорпорированными магнитами перед асинхронным и другими типами синхронных двигателей для современных электрокаров.*

***Abstract:** this article reflects the main advantages of a synchronous jet engine with incorporated magnets over asynchronous and other types of synchronous motors for modern electric cars.*

***Ключевые слова:** двигатель, ротор, магниты, сопротивление, потери.*

***Keywords:** motor, rotor, magnets, resistance, losses*

### **Введение**

В Tesla Model Y, как и в Model 3 используется синхронный двигатель для задних колес, которые являются основными ведущими колесами, а для передних – асинхронный двигатель. Одним из основных достоинств асинхронного перед синхронным двигателем, является относительная простота конструкции ротора, не требующая постоянных магнитов. Вместо них используется короткозамкнутая обмотка в виде беличьей клетки.

### **Основная часть**

В асинхронном двигателе вращающееся магнитное поле создает ток в беличьей клетке ротора. Под действием тока ротора и вращающегося магнитного поля создается сила, которая вращает ротор [2]. Однако в следствии протекания тока по беличьей клетке теряется 3–4 % энергии на нагрев стержней ротора.

Если же заменить ротор с беличьей клеткой на ротор с постоянными магнитами (рис. 1), то такая проблема исчезает. За счет уменьшения потерь на нагрев ротора удастся уменьшить размеры и вес двигателя. Так же благодаря постоянным магнитом ротор вращается синхронно с полем статора. Такая конструкция синхронной машины позволяет избежать использования коллекторных щеток, которые являются слабым метом большинства классических синхронных машин.

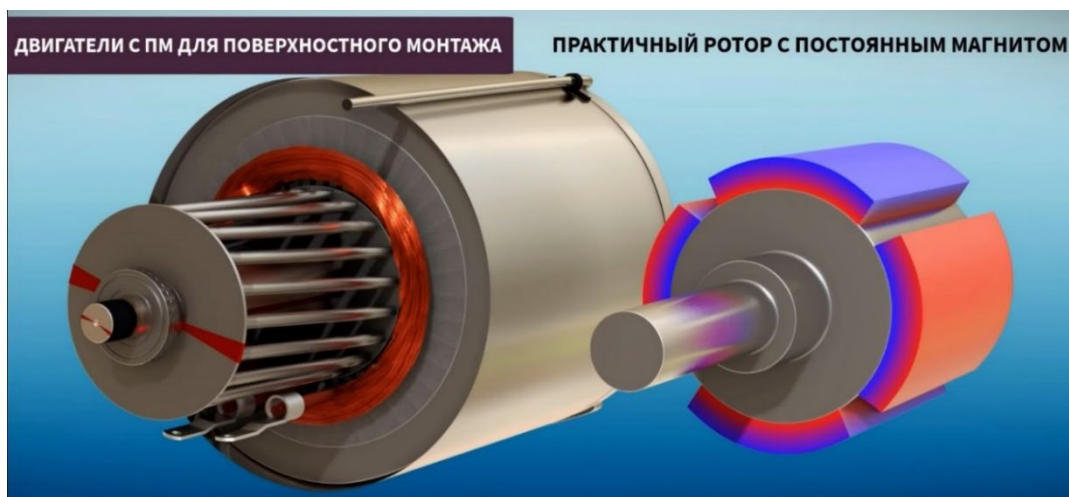


Рисунок 1 – Короткозамкнутый ротор и ротор с постоянными магнитами

Такие двигатели имеют большой крутящий момент, однако на больших скоростях магнитное поле постоянных магнитов ротора индуцирует обратное электромагнитное поле в статоре (рис. 2), что в свою очередь приводит к протеканию тока в статоре, как следствие уменьшается эффективность, увеличиваются потери на вихревые токи и нагрев двигателя [4].

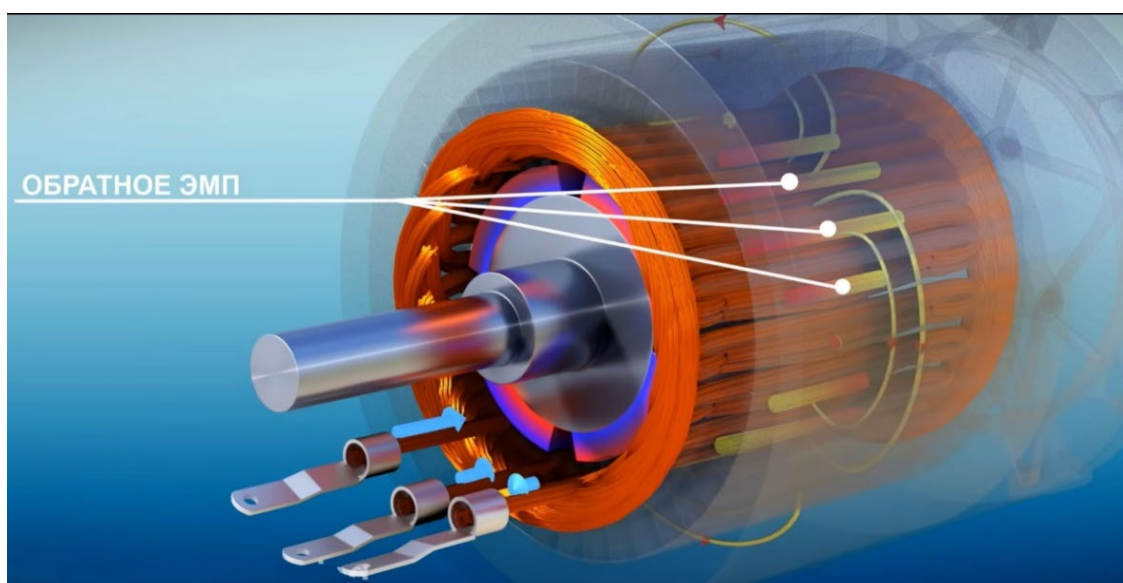


Рисунок 2 – Воздействие обратного ЭМП на статор

Потери, связанные с обратным электромагнитным полем, можно убрать, заменив ротор с постоянными магнитами, на ротор с железным сердечником. В нем используется свойство магнитного сопротивления железа, для этого в роторе делают прорезы, благодаря которым ротор может занимать два положения в пространстве, относительно ВМП, положение с «низким сопротивлением» и положение с «высоким сопротивлением» (рис. 3). Очевидно, что ротор пытается занять положение с «низким сопротивлением», поэтому он устремляется за вращающимся магнитным полем, как следствие начинает вращаться синхронно с ВМП [3]. Такие двигатели не требуют постоянных магнитов, что

определенно делает их дешевле, но имеют малый крутящий момент. Синхронные реактивные двигатели эффективны на больших скоростях, за счет уменьшения потерь относительно двигателя с постоянными магнитами и асинхронного двигателя.

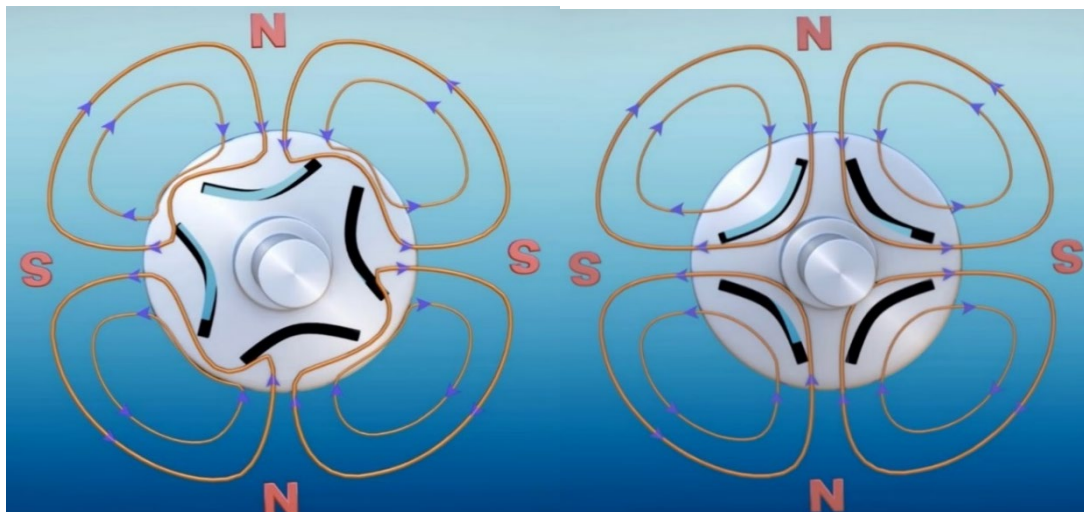


Рисунок 3 – Силовые линии в железном сердечнике

Если же совместить преимущества синхронного реактивного двигателя и двигателя с постоянными магнитами, то мы получим новый тип двигателя – синхронный реактивный с постоянными магнитами (IPMSynRM). В этом двигателе постоянные магниты устанавливаются не на поверхности ротора, а в прорезях и выполняют функцию материала с высоким магнитным сопротивлением для синхронного реактивного двигателя. Проанализировав взаимодействие ВМП с железную часть ротора и с постоянными магнитами, то мы получим график зависимости реактивного момента и момента постоянного магнита.

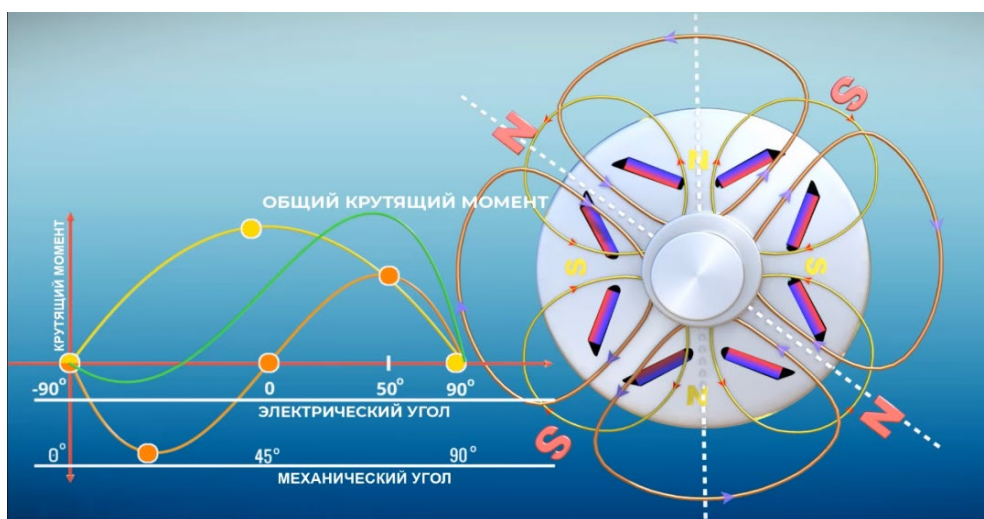


Рисунок 4 – Общий крутящий момент

Максимум крутящего момента от постоянных магнитов наблюдается при электрическом угле равном  $90^\circ$ , а максимальный момент от железной части ротора наблюдается при угле  $45^\circ$ .



Если совместить два графика зависимости электрического угла от крутящего момента на валу ротора, то максимум крутящего момента будет наблюдаться при электрическом угле равном  $50^\circ$  (рис. 4). Поэтому инженеры Тесла позаботились о том, чтобы в момент пуска двигателя угол вращающегося магнитного поля был около  $50^\circ$ .

Чтобы уменьшить или полностью убрать негативный эффект от постоянных магнитов на обмотку статора, инженеры Тесла синхронизировали вращающееся магнитное поле с полем постоянных магнитов, что позволило уменьшить или полностью убрать обратное магнитное поле, индуцируемое в обмотках статора. В таком режиме двигатель работает как реактивный синхронный, без увеличения потерь и нагрева на высоких скоростях.

Математическая модель синхронного реактивного двигателя инкорпорированными магнитами [1] отражает взаимодействие реактивной составляющей и постоянных магнитов, приведены формулы для осей ABC и dq (табл. 1).

Таблица 1 – Математическая модель синхронного реактивного двигателя с постоянными магнитами

Уравнения	Системы координат	
	ABC	dq
Электрической цепи	$u_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt}$	$\begin{cases} u_d = R i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \end{cases}$
Потокосцеплений	$\psi_{abc} = L_s i_{abc} + \psi_{Mabc}$	$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_M \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases}$
Моменты	$M = p_{\Pi} \left( \frac{1}{2} i_{abc}^T \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i_{abc} + i_{abc}^T \frac{\partial \psi_{Mabc}}{\partial \theta} \right)$	$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \left( \psi_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right)$

**Заключение**

Двигатель IPMSynRM имеет лучший пусковой момент, высокий КПД (до 96 %, против 94 % у асинхронного двигателя), меньший нагрев и упрощенная система охлаждения ротора и лучше масса габаритные показатели.

**Литература**

1. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поле и программа FEMM / О. Б. Буль. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 336 с.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
3. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.



УДК 621.438

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ  
ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ PG6111 GE  
EFFECT OF OPERATING CONDITIONS ON THE PERFORMANCE  
OF THE PG6111 GE GAS TURBINE UNIT**

А. О. Касяник, Е. А. Савенко

Научный руководитель – С. А. Качан, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
kachan@bntu.by

A. Kasyanik, E. Savenko

Supervisor – S. Kachan, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассматривается влияние эксплуатационных факторов на показатели газотурбинных установок на примере установки типа PG6111 General Electric. Приведены зависимости показателей установки от параметров атмосферного воздуха: температуры, давления, влажности, а также от потерь давления на входе и выхлопе. Дается оценка степени ухудшения эксплуатационных характеристик установки и способов его восполнения.*

***Abstract:** the influence of operating factors on the performance of gas turbines is considered using as the example a PG6111 General Electric units. Dependences of the performance of the units on the parameters of atmospheric air are given: temperature, pressure, humidity, as well as pressure losses at the inlet and exhaust. An assessment of the degree of deterioration in performance and ways to compensate for it is given.*

***Ключевые слова:** газотурбинные установки, показатели, параметры атмосферного воздуха, эксплуатационные характеристики.*

***Key words:** gas turbines, indicators, atmospheric air parameters, operation, performance characteristics.*

### **Введение**

Параметры и показатели газотурбинных установок (ГТУ) обычно даются в стандартных условиях ISO 2314 (ГОСТ 20440-75). Это параметры воздуха на входе в компрессор: давление 0,1013 МПа, температура +15 °С, относительная влажность 60 %; сопротивление входного и выхлопного трактов ГТУ не учитывается. Параметры ГТУ в условиях ISO используются для определения технического уровня установки и сравнения ее с ближайшими аналогами. Тем не менее большую часть времени ГТУ эксплуатируются в нерасчетных условиях [1].

### **Основная часть**

Рассмотрим влияние эксплуатационных факторов на показатели ГТУ на примере установки типа PG6111 американской компании General Electric (GE), которая является одним из мировых лидеров в производстве ГТУ для энергетики, промышленности и авиации [2].

В табл. 1 приведены основные характеристики PG6111 GE в условиях ISO при работе на природном газе с низшей теплотворной способностью (LHV) 47,891 МДж/кг.

Таблица 1 – Основные характеристики ГТУ типа PG6111 GE в условиях ISO

Показатель, размерность	Значение
Номинальная мощность, МВт	77,6
Электрический КПД, %	35,78
Степень повышения давления компрессора	16,4
Число камер сгорания	6
Число ступеней компрессора	18
Число ступеней турбины	3
Температура выпускных газов, °С	606
Энергия выхлопных газов, кДж/ч	503
Минимальная нагрузка, %	52
Скорость изменения нагрузки, МВт/мин	7
Время пуска, мин	29
Эмиссия оксидов азота NO <sub>x</sub> при номинальной нагрузке (15 % O <sub>2</sub> )	15 ppm
Эмиссия угарного газа CO при минимальной нагрузке	9 ppm

Поскольку атмосферный воздух является рабочим телом ГТУ, то показатели этих установок существенно зависят от параметров наружного воздуха: температуры, давления, влагосодержания.

При этом температура наружного воздуха влияет в наибольшей степени.

Каждая модель ГТУ имеет свои особенности влияния температуры на входе в компрессор на показатели работы установки. На рис. 1 приведены зависимости показателей ГТУ PG6111FA GE.

Как видно из рис. 1 понижение температуры наружного воздуха увеличивает его плотность, массовый расход воздуха через компрессор, расход выпускных газов, электрическую мощность и электрический КПД установки, а их температура и удельный расход теплоты уменьшается.

Из рис. 1 следует, что при изменении температуры наружного воздуха больше всего изменяется электрическая мощность ГТУ. С учетом этого номинальную мощность электрогенератора выбирают выше, чем мощность ГТУ на расчетном режиме.

Поправка на высоту над уровнем моря или барометрическое давление более проста. По мере увеличения высоты площадки, на которой установлена ГТУ, плотность воздуха уменьшается, в соответствии с этим уменьшаются массовый расход воздуха через компрессор, расход топлива в камеру сгорания и мощность ГТУ (рис. 2). При этом КПД и другие показатели не изменяются.

Повышенная влажность воздуха делает его менее плотным, чем сухой воздух, и также влияет на мощность ГТУ и КПД, снижая их.

Дополнительные потери давления на входе компрессора и в системе отвода отработавших газов влияют на показатели ГТУ. Так, установка фильтров воздуха, глушителей, испарительных охладителей на входе или устройств утилизации тепла в потоке отходящих газов вызывает потери давления в системе.

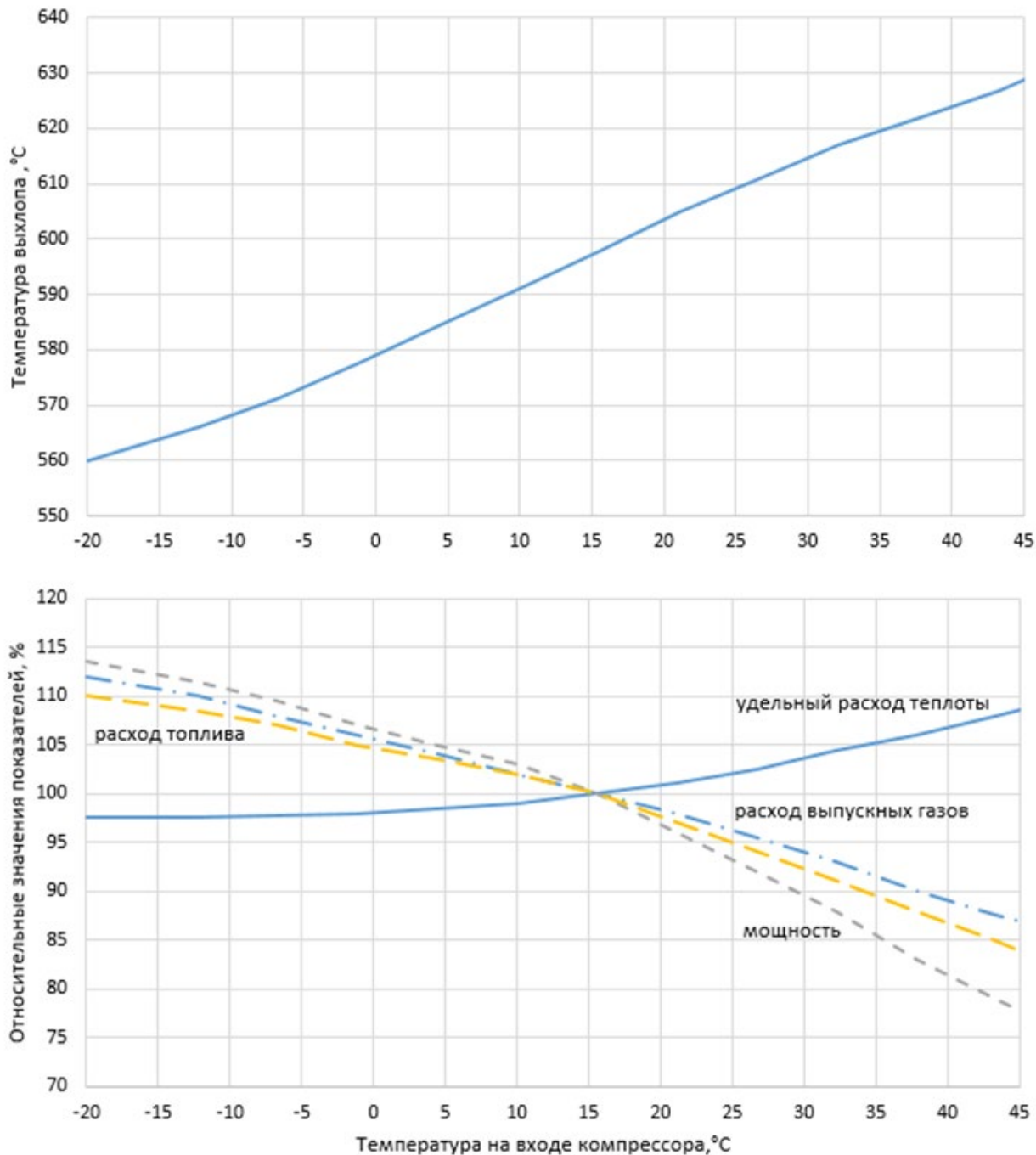


Рисунок 1 – Зависимость относительных показателей работы ГТУ PG6111FA GE от температуры воздуха на входе в компрессор

Влияние таких потерь давления уникально для каждой конструкции ГТУ. Например, для ГТУ типа PG6111FA GE падение давления на 0,001 бар на впуске приводит к потере выходной мощности на 1,42 %, повышению тепловой мощности на 0,45 %, повышению температуры отходящих газов на 1,1 °C.

Падение на 0,001 бар на выпуске приводит к потере выходной мощности на 0,42 %, повышению тепловой мощности на 0,42 %, повышению температуры отходящих газов на 1,1 °С.

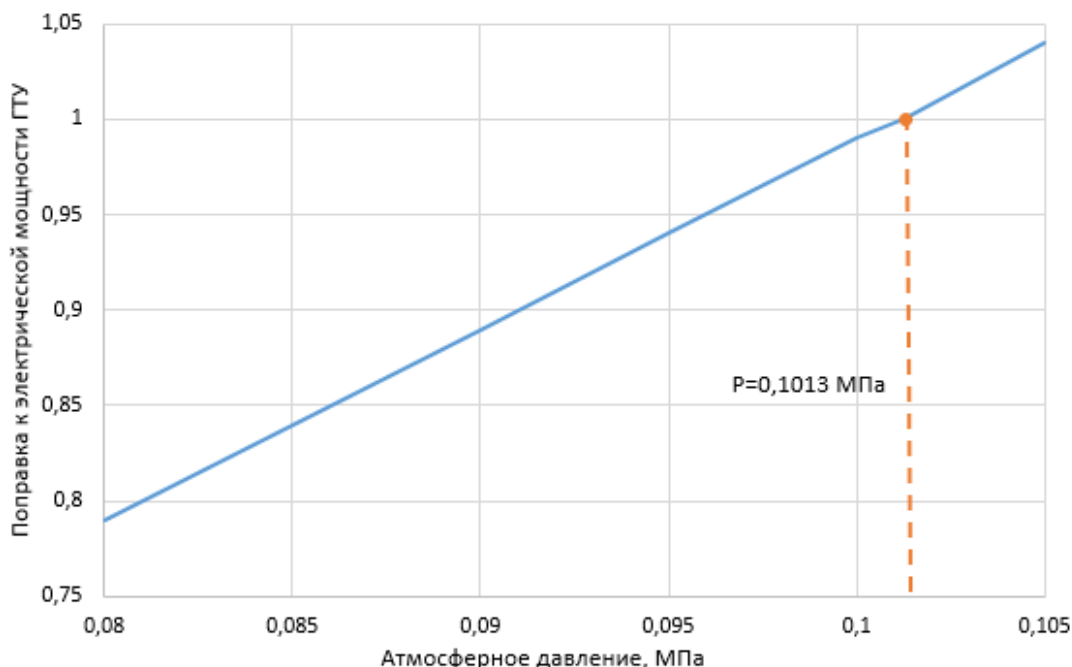


Рисунок 2 – Коэффициент поправки к электрической мощности ГТУ в зависимости от атмосферного давления

Эксплуатационные характеристики всех ГТУ ухудшаются со временем. При этом можно различать восполнимые и невосполнимые потери.

Восполнимые потери обычно связываются с загрязнением компрессора и могут быть частично восполнены промывкой водой или более тщательной механической очисткой лопаток компрессора после останова и вскрытия установки.

Невосполнимые потери, в основном, возникают из-за увеличения зазоров в уплотнениях турбины и компрессора, и изменения чистоты поверхности и профиля лопаток. В связи с тем, что данные потери вызваны понижением эффективности работы компонентов, они не могут быть восполнены техническим обслуживанием или очисткой компрессора, а требуют замены соответствующих деталей с рекомендованной периодичностью.

Оценка степени ухудшения эксплуатационных характеристик затруднена, так как достаточно сложно получить надежные эксплуатационные данные. На сопоставление данных с разных площадок влияют такие переменные величины как режим эксплуатации, содержание в воздухе загрязняющих веществ, влажность, качество топлива и уровни впрыска пара или воды для поддержания уровня выбросов оксидов азота. Еще одной проблемой является широкое разнообразие испытательных приборов и методик, часто с большими допусками и погрешностями.

Обычно, ухудшение эксплуатационных характеристик для первых 24 000 часов эксплуатации (нормальный рекомендованный интервал проверки

тракта горячих газов) составляет от 2 % до 6 % по сравнению с результатами эксплуатационных испытаний с поправкой на гарантированные условия эксплуатации (рис. 3). Это предполагает отсутствие замены изношенных деталей. В случае замены ожидаемое ухудшение эксплуатационных характеристик составляет от 1 % до 1,5 %.

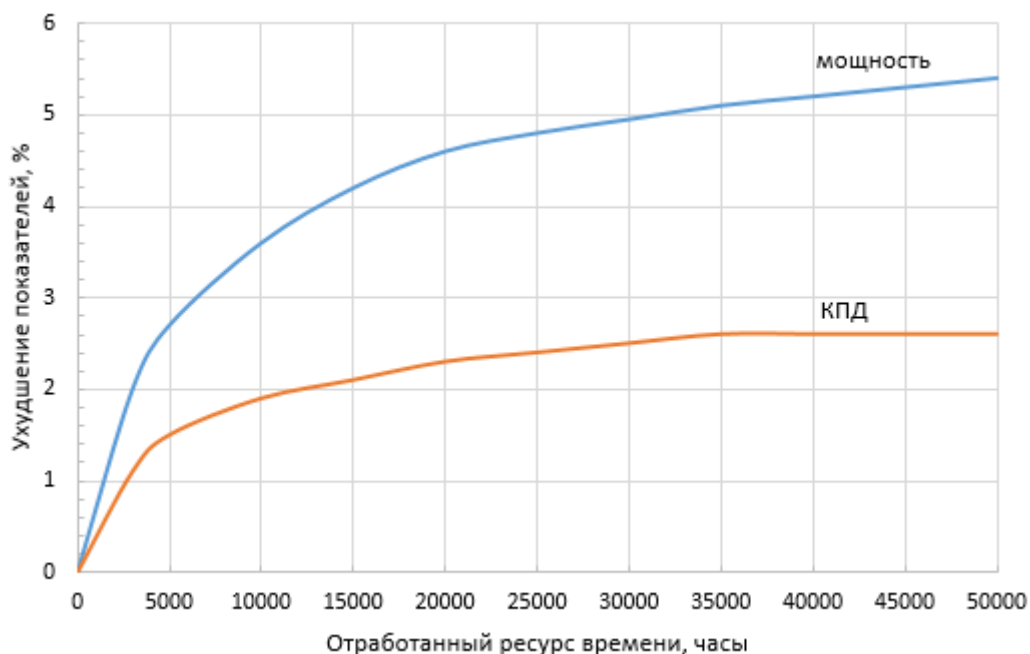


Рисунок 3 – Ожидаемое ухудшение показателей работы ГТУ

### Заключение

ГТУ PG 6111FA GE создана на базе передовой технологии F-класса. ГТУ отличается высокой эффективностью и надежностью, низким уровнем выбросов вредных веществ. При этом показатели работы существенно зависят от условий эксплуатации и технического обслуживания установок.

### Литература

1. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Учебное пособие для вузов / С. В. Цанев [и др.]; под ред. С. В. Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.
2. GE Gas Turbine Performance Characteristics / Frank J. Brooks // GE Power Systems Schenectady, NY. – 2003.

УДК 620.9

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ –  
ЗЕЛЕНый ВОДОРОД  
INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE ENERGY SECTOR –  
GREEN HYDROGEN**

С. В. Черневич

Научный руководитель – В. В. Кравченко, к.э.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
vladmir70@rambler.ru

S. Chernevich

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

*Аннотация:* в статье представлен один из способов снижения выбросов углерода – использование «зеленого» водорода, описан способ его получения, рассказано о перспективах его использования в Республике Беларусь, а также приведена статистика и различные классификации водорода.

*Abstract:* the article presents one of the ways to reduce carbon emissions – the use of "green" hydrogen, describes the method of its production, describes the prospects for its use in the Republic of Belarus, and also provides statistics and various classifications of hydrogen.

**Ключевые слова:** зеленый водород, углекислый газ, выбросы, энергия.

**Keywords:** green hydrogen, carbon dioxide, emissions, energy.

**Введение**

Глобальное потепление – одна из самых серьезных экологических проблем 21 века, имеющая серьезные последствия во всем мире.

В 2021 г. в атмосферной обсерватории в Гавайях было зафиксировано максимальное за все время количество выбросов CO<sub>2</sub>. Рекордный показатель составил свыше 421 см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Для сравнения 70 лет назад концентрация углекислого газа была примерно 315 см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> [1]. На рис. 1 показано количество выбросов углекислого газа за один и тот же период времени в 2021 и в 2022 году [2].

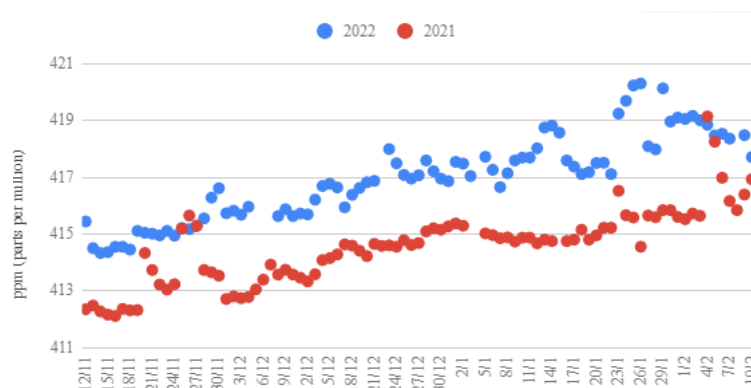


Рисунок 1 – Концентрация углекислого газа в атмосфере за 3 месяца в 2021 и в 2022 году



Снижение количества выбросов парниковых газов, в частности CO<sub>2</sub>, может замедлить процесс глобального потепления и изменения климата, а также другие экологические проблемы, связанные с ними. Существует множество способов сокращения выбросов. Один из самых молодых и перспективных – переход на использование «зеленого» водорода.

**Основная часть**

Водород – газ без цвета и запаха, самый распространенный химический элемент, составляющая большинства органических соединений. Так как в свободной форме он недоступен, то его необходимо сначала произвести, а уже потом использовать как источник энергии.

Существует классификация водорода по цвету в зависимости от способа его добычи:

- «коричневый» водород – с помощью газификации угля;
- «серый» водород – путем парового риформинга метана;
- «синий» водород аналогичен «серому», но предусматривает улавливание и хранение углерода;
- «зеленый» водород – с помощью использования электроэнергии из ВЭИ для питания электролизера;
- «бирюзовый» водород – использование пиролиза метана с расщеплением на водород и твердый углерод.

Цветовая классификация также представлена на рис. 2 [3].



Рисунок 2 – Цветовая классификация водорода

Также существует еще одна классификация водорода с ориентацией на научные термины:

- электролизный водород, полученный при помощи электролиза без привязки к источнику электроэнергии;

- возобновляемый (чистый) водород равнозначен термину «зеленый» водород;
- ископаемый водород, полученный из ископаемого сырья;
- ископаемый водород с улавливанием углерода – это ископаемый водород, полученный по классической технологии, но с последующим улавливанием углерода;
- низкоуглеродный водород, полученный со сниженными выбросами парниковых газов (ископаемый водород с улавливанием углерода и электролизный водород) [4].

Таким образом, «зеленый» водород – это водород без выбросов, вырабатываемый полностью за счет ВЭИ.

Стоит отметить, что терминологии, классификации и градации весьма разнообразны и могут постепенно меняться. Неизменным будет только одно – конечная цель – зеленый и возобновляемый водород, производство которого будет наносить минимальный вред окружающей среде и не оставлять после себя «углеродный» след.

Существует несколько способов получения водорода. Первый – переработка природного газа или угля с получением «серого» водорода, при котором выделяется значительное количество углекислого газа. Второй – электролиз воды при помощи большого электролизера и снабжения электричеством из ВЭИ (энергия ветра, солнечная энергия, гидроэнергия) с минимальными выбросами углерода от инфраструктуры, в результате чего мы получаем «зеленый» водород.

На сегодняшний день существует много направлений, где можно применять «зеленый» водород. Его использование возможно на ТЭС в качестве самостоятельного и добавочного топлива (ископаемое топливо смешивают с водородом для уменьшения углеродного следа). Им можно заменить уже используемый в промышленности водород. Это отличная сезонная система хранения энергии из ВЭИ с последующим сжиганием при необходимости для выработки электроэнергии. Он может выступать в качестве топлива для автомобилей, кораблей и самолетов. А также подходит для выработки электричества и тепла на месте.

Стоит отметить, что «зеленый» водород – это вовсе не источник энергии, а энергоноситель, то есть, вещество, способное накапливать энергию с возможностью последующего контроля в другом месте.

На сегодняшний день производится порядка 70 млн тонн водорода, но доля «зеленого» водорода составляет лишь 1 %. Виной тому является большая стоимость электролизеров, что влияет на нехватку больших электролизеров, а также сложность в хранении и транспортировке водорода из-за его маленькой плотности и негативного влияния на стальные трубы и сварные швы.

Себестоимость «зеленого» водорода примерно в 3 раза больше, чем «серого». При условии снижения себестоимости «зеленый» водород может стать главным топливом будущего. В своем докладе Bloomberg говорит, что уже к 2050 году его цена будет примерно равна стоимости природного газа, вследствие чего объем мирового рынка водорода достигнет \$ 2,5 трлн [5].

Что касается перспектив использования «зеленого» водорода в Республике Беларусь, то вполне возможно, что в дальнейшем мы сможем отказаться от газа

и нефти в пользу чистой водородной энергетики. Этому может поспособствовать наличие геологических пород с соляными отложениями в Припятском бассейне, в которых может храниться водород. На карте (рис. 3), составленной институтом исследований энергетики и климата, показано большое скопление таких геологических пород [6].

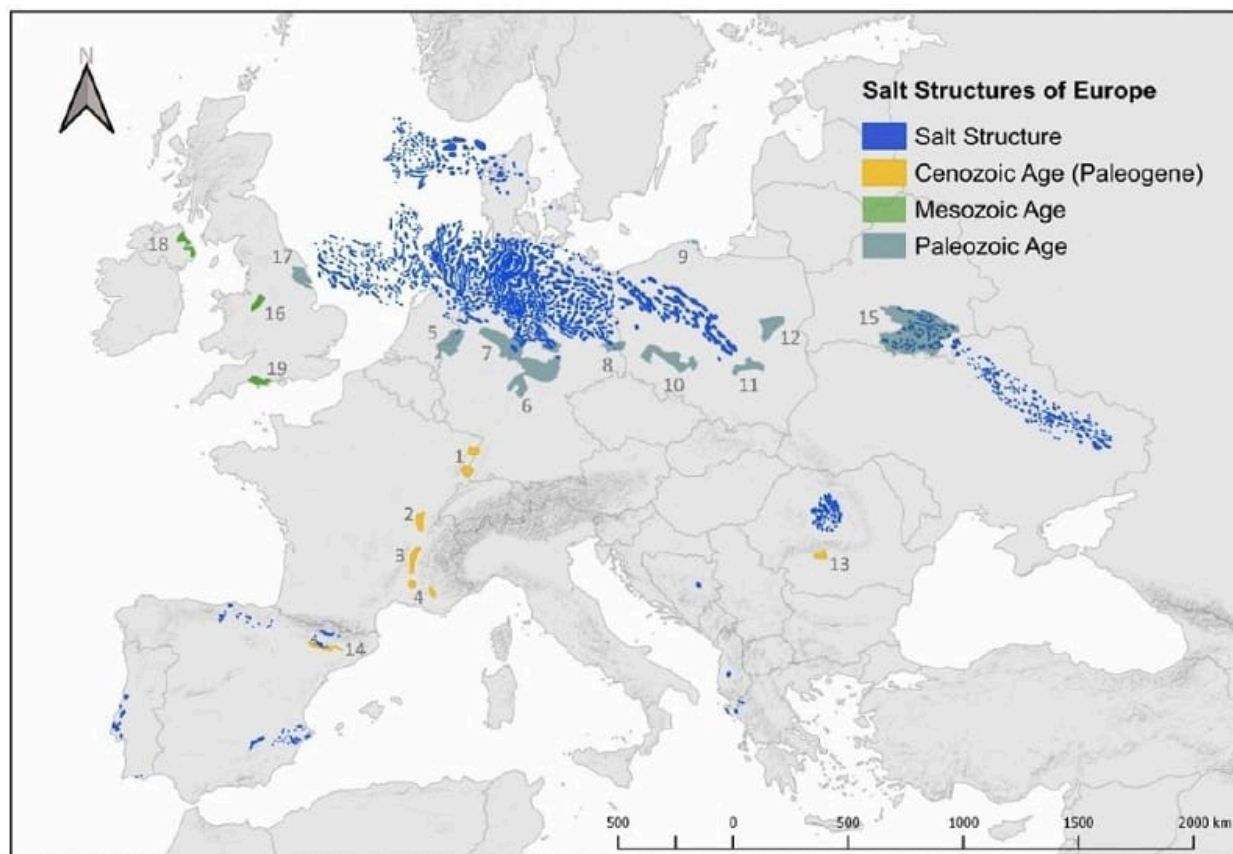


Рисунок 3 – Карта геологических пород с соляными отложениями Европы

### Заключение

Глобальное потепление имеет серьезные последствия во всем мире. Использование зеленого водорода поможет не только остановить развитие этой проблемы, но и создать устойчивую энергетическую систему. В долгосрочной перспективе он способен заменить современные углеводородные ископаемые.

### Литература

1. Ученые сообщили о рекордном уровне углекислого газа в атмосфере [Электронный ресурс] / ученые сообщили о рекордном уровне углекислого газа в атмосфере. – Режим доступа: <https://hightech.fm/2021/04/06/carbon-dioxide-concentration>. – Дата доступа: 16.04.2022.

2. Концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе, данные за последнюю неделю [Электронный ресурс] / концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе, данные за последнюю неделю. – Режим доступа: <https://theworldonly.org/co2-concentration-last-week/>. – Дата доступа: 17.04.2022.

3. Водородное озеленение: экологичные технологии для нового топлива [Электронный ресурс] / водородное озеленение: экологичные технологии для

нового топлива. – Режим доступа: <https://strana-rosatom.ru/2021/09/23/vodorodnoe-ozelenenie-ekologichnye-t/>. – Дата доступа: 16.04.2022.

4. Что такое зеленый водород и какой водород бывает вообще [Электронный ресурс] / что такое зеленый водород и какой водород бывает вообще. – Режим доступа: <https://www.el-info.ru/что-такое-zelyonyj-vodorod-i-kakoj-vodorod-byvaet-voobshhe/>. – Дата доступа: 18.04.2022.

5. Зеленый элемент. Как мир переходит на водород и чем это грозит России [Электронный ресурс] / зеленый элемент. Как мир переходит на водород и чем это грозит России. – Режим доступа: <https://secretmag.ru/technologies/zelyonyi-element-kak-mir-perekhodit-na-vodorod-i-chem-eto-grozit-ossii.htm>. – Дата доступа: 15.04.2022.

6. Беларусь обладает уникальным потенциалом для водородной энергетики [Электронный ресурс] / Беларусь обладает уникальным потенциалом для водородной энергетики. – Режим доступа: <https://thinktanks.by/publication/2021/12/13/belarus-obladaet-unikalnym-potentsialom-dlya-vodorodnoy-energetiki.html>. – Дата доступа: 15.04.2022.

УДК 621.181.19

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ ЗАНОСА ОТЛОЖЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРИ СЖИГАНИИ МАЗУТА В КОТЛЕ**  
**DETERMINATION OF FACTORS OF CARRIAGE BY DEPOSITS OF HEATING SURFACES DURING FUEL COMBUSTION IN A BOILER**

Г. В. Алимов, П. А. Болбас, А. Д. Яковенко

Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д.т.н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
tes@bntu.by

G. Alimov, P. Bolbas, A. Yakovenko

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

*Аннотация:* в статье рассматривается занос отложениями при сжигании мазута в котле.

*Abstract:* the article discusses the drift of deposits during the combustion of fuel oil in a boiler.

*Ключевые слова:* отложения, топливо, аутогезия, сжигание.

*Keywords:* deposits, fuel, autohesion, combustion.

### **Введение**

Известно, что процессы коррозии взаимосвязаны с заносом поверхностей нагрева. При сжигании энергетических топлив на поверхностях нагрева образуются отложения, которые вследствие снижения тепловосприятия этих поверхностей приводят к росту температуры уходящих газов, увеличению аэродинамического сопротивления элементов из-за уменьшения проходных сечений, что влечет за собой снижение производительности.

При соприкосновении летящей золовой частицы с поверхностью нагрева на нее одновременно действуют силы, стремящиеся как удержать, так и оторвать ее. К первым относятся силы адгезии, а также аэродинамические силы прямого набегания потока. К отрывающим частицу факторам относятся аэродинамические и гравитационные силы.

### **Основная часть**

Следует отметить, что из-за отсутствия изнашивающих фракций в летучей золе мазута вследствие малых размеров частиц и их высокой пластичности, относительная доля осаждающейся летучей золы при сжигании мазута значительно выше, нежели при сжигании иных топлив [1].

Основными факторами, определяющими образование связанных отложений, являются: минералогический состав топлива, уровень температур, скорость нагрева и длительность пребывания частиц в зоне высоких температур, протекание физико-химических процессов.

Существуют два фактора, обуславливающие структуру наружных отложений: коррозия на поверхности нагрева и попадание золовых и сажистых частиц на увлажненную серной кислотой поверхность. Наличие этих факторов обу-



славливает двухслойную структуру отложений, причем внутренний слой защищен продуктами коррозии, а внешний, рыхлый содержит в основном золу и сажу, а также свободную серную кислоту. Таким образом внутренний слой играет своего рода роль барьера для молекул серной кислоты.

Автор [2] отмечает, что в развитии процесса коррозии решающую роль играют рыхлые отложения, которые обладая высокой гигроскопичностью, обеспечивают повышенный массообмен и приток паров серной кислоты к поверхности нагрева. Кроме того, в самих отложениях имеются окислы таких металлов, как ванадий, никель являющихся хорошими катализаторами. Поэтому регулярная очистка поверхностей от отложений является действенным средством против коррозии, что не всегда выполняется в практике эксплуатации котла. В отдельных случаях котлы даже не оборудованы средствами периодической очистки и очищаются лишь в период остановов для проведения ремонтов.

Образование липких отложений зависит от ряда причин. Одной из них является конденсация паров легкоплавких соединений, десублимация некоторых элементов минеральной части мазута на конструктивных поверхностях нагрева. При горении мазута некоторая часть компонентов золы испаряется и конденсируется затем по ходу движения на относительно холодных поверхностях нагрева. Первичные отложения обычно липкие, создают условия для осаждения на них частицы золы, кокса и сажи, причем между компонентами отложений и между металлом и отложениями происходят сложные физико-химические превращения. Эти процессы, как правило, сопровождаются коррозией металла, разъеданием обмуровки, которые в свою очередь содействуют образованию плотных отложений, распространяющихся по газовому тракту котла вплоть до воздухоподогревателя.

Большая часть золы мазута состоит из легкоплавких соединений натрия, ванадия и серы, поэтому образование отложений определяется главным образом этими соединениями.

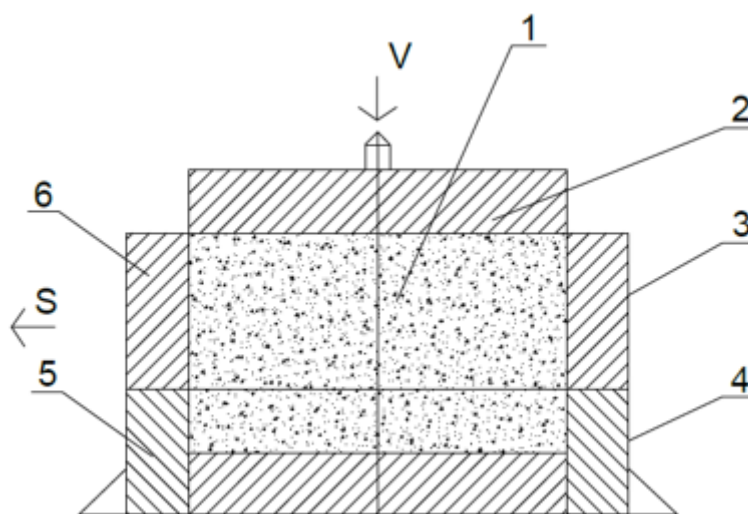


Рисунок 1 – Схема модернизированного прибора Дженике для испытания проб отложений на прямой сдвиг:

1 – исследуемая проба; 2 – уплотняющая крышка; 3, 4 – тензодатчики; 5 – неподвижная часть прибора; 6 – подвижная часть прибора



Сведения о фактическом значении аутогезии и прочности отложений в настоящее время можно получить лишь экспериментальным путем.

Испытания проб на прямой сдвиг проводилось с использованием модернизированного прибора Дженике с усовершенствованным измерительным устройством (рис. 1). Исследуемая проба (1) засыпается в элемент сдвига. Уплотнение создается с помощью грузов посредством крышки (2).

Усилие в горизонтальной плоскости  $S$  создается через систему электродвигатель – рамка с тензодатчиками: 3 – блок и 4 – верхняя часть элемента сдвига. Усилие прикладывается до тех пор, пока не произойдет сдвиг верхней части 6 относительно нижней 5. Удельная аутогезионная прочность пылей при прямом сдвиге определяется при предварительной удельной уплотняющей нагрузке  $G_y = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$  в интервале температур 293-673 К.

Расчетное значение коэффициента внутреннего трения  $\text{tg } \phi$  определяется путем построения круга Мора по максимальным значениям силовых и нормальных напряжений (нагрузки). В этом случае  $\text{tg } \phi$  определяется в точке касания этого круга с экспериментально полученной кривой предела текучести.

Расчетное значение начального сопротивления сдвигу  $\tau_0^{\text{расч}}$  определяется также путем построения, причем в этом случае проводится касательная в точке касания наибольшего из кругов Мора с линией предела текучести и отрезок, отсекаемый ею на оси ординат, определяет величину  $\tau_0^{\text{расч}}$

Экспериментальное значение начального сопротивления сдвигу  $\tau_0^{\text{расч}}$  определяется при отсутствии уплотнения из зависимости  $\varepsilon = f(G)$ .

Испытание на разрыв осуществлялось прибором НИИОГАЗ (рис. 2).

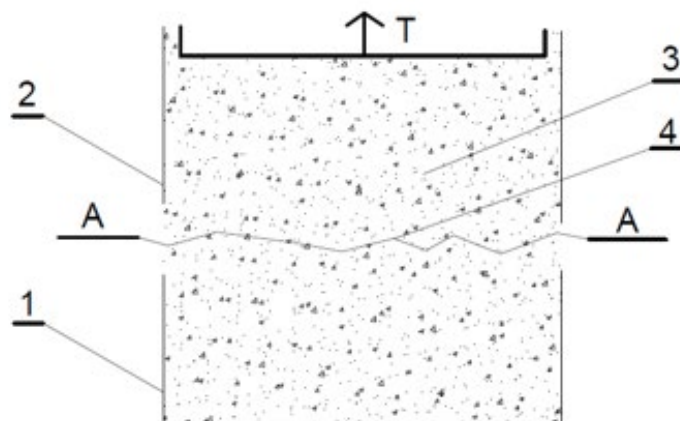


Рисунок 2 – Схема прибора конструкции НИИОГАЗ для испытания проб отложений на разрыв:

- 1 – неподвижная часть цилиндра; 2 – подвижная часть цилиндра; 3 – проба отложений;
- 4 – плоскость разрыва

В работе учитывались оба показателя, т. е. удельное сопротивление сдвигу и удельное сопротивление на разрыв.

Учитывая наличие в отложениях горючих составляющих, получение прочностных характеристик от температуры не представляется возможным, поэтому

все характеристики получены при температуре проб 293 К. Достоверность полученных таким образом результатов подтверждается в работе [3], несмотря на то, что в теории полностью повторить реальные условия, в которых находятся отложения, не удастся. Полученные экспериментальные данные позволяют все же провести сравнительный анализ наружных отложений по их прочностным качествам.

С понижением температуры аутогезионные характеристики пылей уменьшаются. Это подтвердили исследования отложений на трубных выносных кубах воздухоподогревателя котла БКЗ-160-100. Анализ на разрыв указывает, что отложения отнесены к 2-ой группе слипаемости. Сдвиговые характеристики следующие:  $\operatorname{tg} \phi = 0,68$ ;  $\tau_0^{\text{эксп}} = 1020 \text{ Па}$ ;  $\tau_0^{\text{расч}} = 2340 \text{ Па}$ . Последние две величины обычно для слипающихся пылей. Химсостав отложений на этой поверхности нагрева показал следующую картину: содержание NiO составило 11 %, SO<sub>4</sub> 13 %, а количество полоторных окислов достигло 30,8 %.

Из анализа результатов эксперимента на прочность и химического состава отложений на поверхностях нагрева котла БКЗ-160-100 следует, что количество сульфатов увеличилось по ходу движения в конвективной шахте от пароперегревателя до выносных кубов воздухоподогревателя с 27 до 49, т. е. в 1,8 раза.

Прочность отложений на удельное сопротивление сдвигу увеличилась с 1000 Па до 1340 Па (по расчету) или в 1,34 раза, а по экспериментальным данным с 970 до 1020 Па, т.е. на 50 Па. Таким образом, как химический состав, так и показатели аутогезии свидетельствуют о слипаемости золовых отложений как на высокотемпературных, так и низкотемпературных поверхностях нагрева при сжигании мазута в котлах с подовой компановкой горелочных устройств.

На рис. 3, 4 приведены аутогезионные характеристики наружных отложений на трубных досках выносных кубов воздухоподогревателя котла БКЗ-160-100.

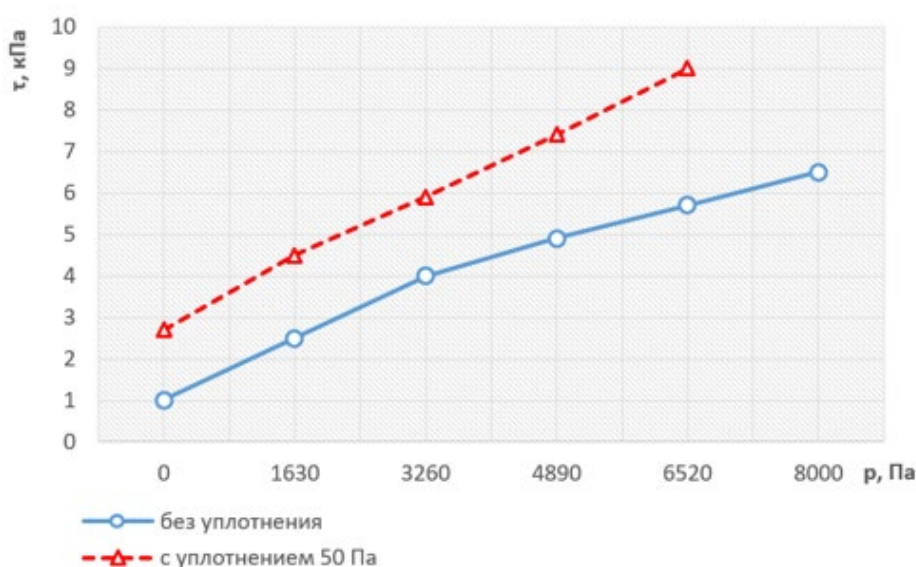


Рисунок 3 – Расчетно-экспериментальное определение начального сопротивления сдвигу и коэффициента внутреннего трения отложений на трубных досках выносных кубов воздухоподогревателя котла БКЗ-160-100 при  $\tau_0^{\text{эксп}} = 1340 \text{ Па}$  и  $\operatorname{tg} \phi = 0,68$

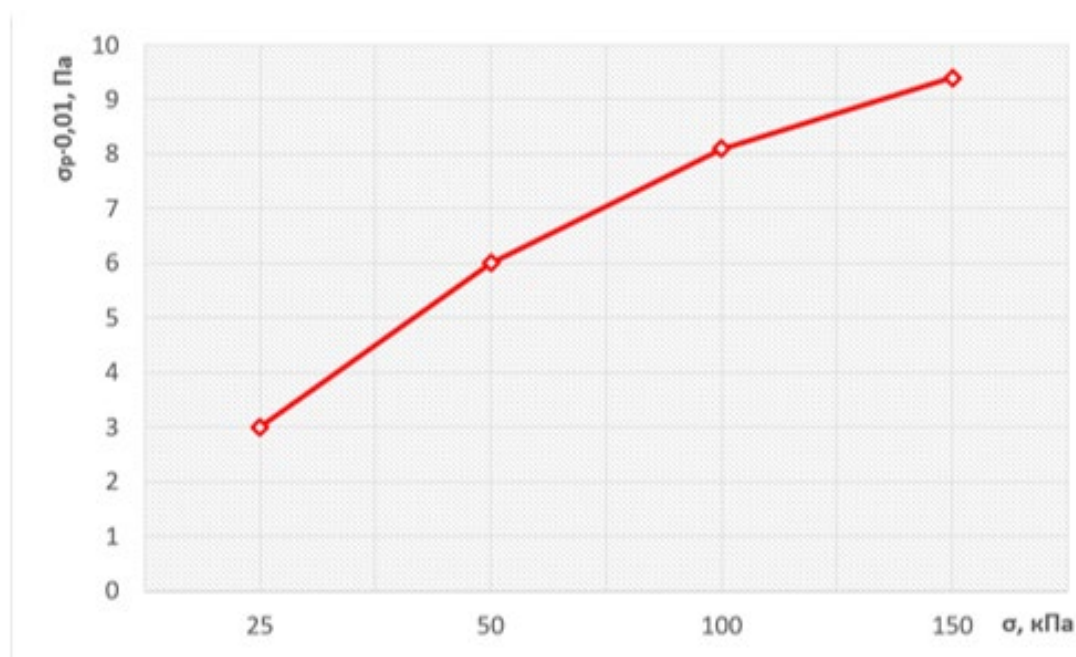


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления на разрыв от уплотнения на трубных досках выносных кубов воздухоподогревателя котла БКЗ-160-100

### Заключение

В данной работе были определены основные факторы, определяющие образование отложений на поверхности нагрева при сжигании мазута в котле. Проведены испытания проб отложений на разрыв, на прямой сдвиг, в результате которых были получены интересующие нас данные. Так же было проведено расчетно-экспериментальное определение начального сопротивлению сдвигу. С понижением температуры аутогезионные характеристики пылей уменьшаются. Это подтвердили исследования отложений на трубных выносных кубах воздухоподогревателя котла БКЗ-160-100.

### Литература

1. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок / А. Ф. Гаврилов, Б. М. Малкин. – Москва: Издательство Энергия, 1980. – 328 с.
2. Коррозия регенеративных воздухоподогревателей и методы ее предупреждения / И. И. Надыров. – Москва: Издательство ОРГРЭС, 1973. – 12 с.
3. О механизмах импульсной очистки / Б. Д. Кацнельсон – Казань: Издательство Казанского университета, 1973. – 72 с.

УДК 662.611.22

**ПРОГРАММА РАСЧЕТА РАСХОДА ВОДЫ В БАСЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ  
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА  
THE PROGRAM TO CALCULATE WATER CONSUMPTION  
OF A COOLING BASIN FOR SPENT NUCLEAR FUEL**

З. В. Ковганов, Е. В. Таранко

Научный руководитель – В. А. Романко, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
tes@bntu.by

Z. Kovganov, E. Taranko  
Supervisor – V. Romanko, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** расчет остаточного тепловыделения отработавшего ядерного топлива и расхода воды, необходимой для его охлаждения. Создание программы на языке C++ для расчета.*

***Abstract:** the calculation of spent nuclear fuel residual afterheat and water consumption necessary for its cooling. The creation of a C++ program for the calculation.*

***Ключевые слова:** расчет, отработавшее ядерное топливо (ОЯТ), остаточное тепловыделение, бассейн выдержки, расход воды.*

***Keywords:** calculation, spent nuclear fuel (SNF), residual afterheat, cooling basin, water consumption.*

### **Введение**

Для работы любой тепловой электростанции необходимо топливо. Так, например, на конденсационных электростанциях (КЭС) и тепловых электростанциях (ТЭС) сжигают химическое топливо (уголь, природный газ, мазут и т. д.) и выделяемую теплоту преобразуют в электроэнергию [1]. На атомных электростанциях (АЭС) тепло выделяется благодаря распаду ядерного топлива в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛах). Однако после длительной работы реактора его мощность снижается. Чтобы решить эту проблему, необходимо заменить ОЯТ на свежее. Но после выгрузки этого топлива из активной зоны реактора оно все еще продолжает выделять некоторое количество теплоты. Чтобы избежать вредных выбросов в атмосферу из-за разрушения оболочки ТВЭЛа путем действия на него остаточного тепловыделения, ОЯТ необходимо охлаждать. Для этого на некоторых АЭС размещены так называемые бассейны выдержки, где и хранится это отработавшее топливо.

### **Основная часть**

Для охлаждения ОЯТ в бассейнах выдержки должна поддерживаться постоянная температура. Достигается это путем циркуляции охлаждающей среды в зоне расположения топлива.

На рис. 1 представлена возможная схема движения охлаждающей воды в бассейне выдержки (БВ). Нагретая от топливных элементов вода с помощью

циркуляционного насоса (ЦН) поступает в охлаждающую установку (ОУ). После снижения температуры она поступает обратно в бассейн, где вновь нагревается.

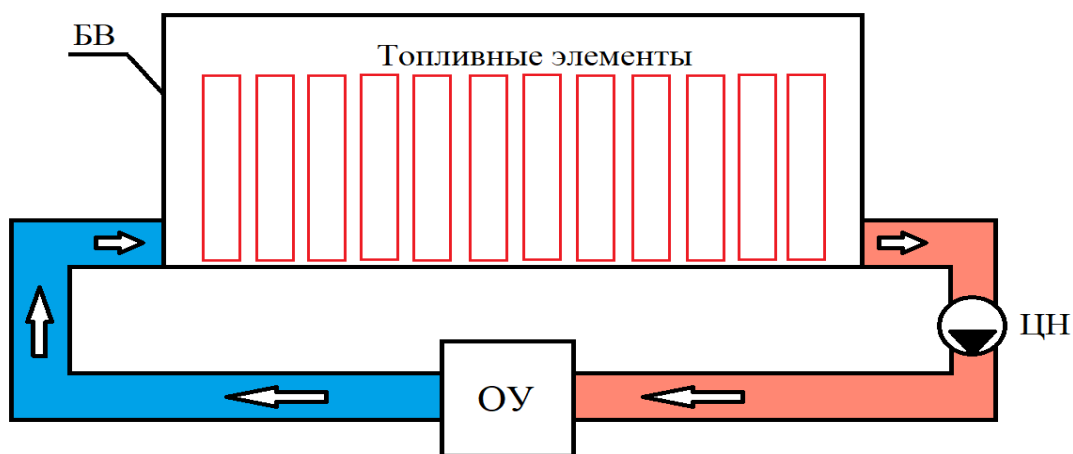


Рисунок 1 – Бассейн выдержки

Чтобы рассчитать расход воды, необходимый для поддержания постоянной температуры воды в бассейне выдержки, необходимо знать количество выделяемой теплоты от ОЯТ. Для этого существует формула Вэя-Вигнера [2]:

$$w = W \cdot 0,002 \cdot (t^{-0,2} - (t+T)^{-0,2}), \tag{1}$$

где  $w$ , кВт – тепловая мощность кассет после прекращения реакции деления в активной зоне реактора;

$W$ , кВт – тепловая мощность кассет в активной зоне реактора;

$t$ , лет – время выдержки кассет после прекращения реакции деления в активной зоне реактора;

$T$ , лет – время работы кассет в активной зоне реактора.

Рассмотрим пример. В водо-водяном энергетическом реакторе с номинальной мощностью 1000 МВт (ВВЭР-1000) в активной зоне находится 163 тепловыделяющих кассеты. Их суммарная тепловая мощность составляет 3000 МВт. Каждая кассета находится в реакторе 3 года и каждый год происходит замена 54, 55 кассет (треть реактора). Соответственно их тепловая мощность будет равняться 1000 МВт. В табл. 1 представлена зависимость остаточного тепловыделения от времени.

Таблица 1 – Зависимость остаточного тепловыделения от времени выдержки ОЯТ

$t$ , лет	0,5	1	1,5	2	3	5	8	15	30	50
$w$ , кВт	740,7	484,3	363,8	291,5	207,8	130,1	81,4	41,7	19,1	10,6



Чтобы отводить выделяемое кассетами тепло необходим расчет расхода охлаждающей воды. Рассмотрим формулу:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2), \quad (2)$$

где  $Q$ , Дж – количество теплоты, необходимой для нагрева воды;

$c$ ,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$  – удельная теплоемкость воды ( $4183 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ );

$m$ , кг – масса воды;

$t_2$ ,  $^\circ\text{C}$  – температура, до которой нужно нагреть воду;

$t_1$ ,  $^\circ\text{C}$  – начальная температура воды.

Если пренебречь потерями теплоты в атмосферу и считать температуру воды в бассейне выдержки неизменной, то при расчете расхода воды для охлаждения обе части формулы (2) разделим на время и получим:

$$w = c \cdot G \cdot (t_2 - t_1), \quad (3)$$

где  $w$ , Вт – тепловая мощность кассет;

$G$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$  – массовый расход воды.

Так как подразумевается постоянство температуры в бассейне, то все выделяемое тепло от кассет идет на нагрев охлаждающей воды. Следовательно, за  $t_2$  будем принимать температуру, которая должна быть в бассейне выдержки, а за  $t_1$  – температуру охлаждающей воды. Тогда окончательный вид формулы:

$$G = \frac{w}{c \cdot (t_2 - t_{\text{охл}})}. \quad (4)$$

Таким образом, зная, как производится расчет, по формулам (1) и (4), создадим программу, которая считает расход воды на охлаждение и строит графики зависимостей для лучшей интерпретации результата и большей наглядности.

В программе есть возможность отдельного расчета как остаточного тепловыделения, так и расхода воды в различных единицах измерения. Также для наглядности построены два графика зависимости расхода воды и тепловыделения от времени. Так, с помощью разработанного алгоритма можно произвести расчет в разы быстрее, точнее, что позволяет сэкономить время и избежать ошибок, которые может допустить человек. Чтобы посчитать все необходимые величины, пользователю требуется ввести тепловую мощность кассет до извлечения их из реактора, а также время, в течение которого работали эти кассеты. Далее, в зависимости от того, что нужно рассчитать (мощность через какое-то время либо время, через которое будет достигнута мощность) ставим флажок. Вводим время (или мощность) и указываем какой тип расхода требуется посчитать. Заполняем поле с температурой, которую необходимо поддерживать в бассейне выдержки, и температурой охлаждающей воды и ждем кнопку рас-



считать. В окне программы сразу же появятся численные значения необходимых величин и построятся графики. Пользователь может сразу оценить результат вычислений. Программа имеет удобный интерфейс, поэтому ее удобно использовать любому человеку как для расчета, так и для анализа данных, что является одной из главных задач программирования.

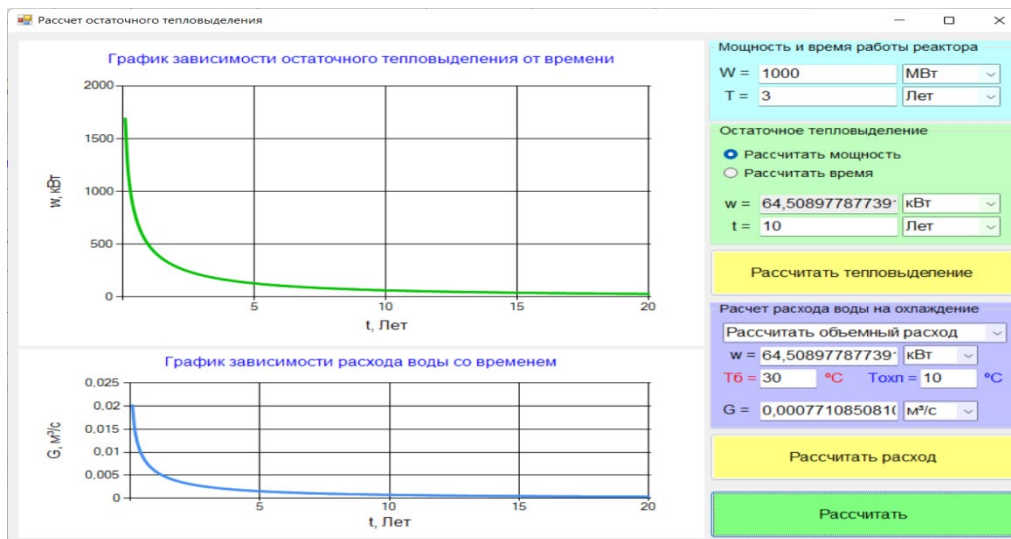


Рисунок 2 – Внешний вид программы

### Заключение

Возможности языка программирования C++ позволяют моделировать и рассчитывать большое количество процессов в энергетике, что очень полезно в учебном процессе. Используя C++ составлена программа, которая существенно ускоряет процесс расчета остаточного тепловыделения отработавшего ядерного топлива и расхода воды для его охлаждения. Автоматически строит графики процессов, которые описываются объемными формулами. Зная язык программирования составить программу для некоторых расчетов бывает в разы быстрее, чем считать это вручную, что существенно экономит время и трудозатраты. А используя огромную функциональность языка C++ процесс реализации алгоритма в рабочую программу становится гораздо проще.

### Литература

1. Ковганов, З. В. Применение возможностей языка C++ для расчета выделяемой теплоты при сжигании топлива / З. В. Ковганов, Е. В. Таранко; науч. рук. В. А. Романко // Актуальные проблемы энергетики 2021 [Электронный ресурс]: материалы студенческой научно-технической конференции / сост.: И. Н. Прокопеня, Т. А. Петровская; редкол.: Е. Г. Пономаренко [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 657-660. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/108932>
2. АЭС с шахтой выдержки отработавшего ядерного топлива [Электронный ресурс] / Обращение с РАО и ОЯТ. – Режим доступа: <http://proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=8035>. – Дата доступа: 24.03.2022.

УДК 621.311

**СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕАЛЬНЫХ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ**  
**COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT METHODS OF STRUCTURAL-PARAMETRIC OPTIMIZATION OF REAL PID-REGULATORS**

Е. Р. Сазоненко

Научный руководитель – Г. Т. Кулаков, д.т.н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

tes\_bntu@tut.by

E. Sazonenko

Supervisor – G. Kulakov, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье производится выбор и обоснование структуры реализации и методов параметрической оптимизации ПИД-регуляторов. В ходе работы проводились экспериментальные исследования по сравнению методов динамической настройки ПИД-регуляторов.*

***Abstract:** the article selects and justifies the implementation structure and methods for parametric optimization of PID controllers. In the course of the work, experimental studies were carried out to compare methods for dynamic tuning of PID controllers.*

***Ключевые слова:** ПИД-регуляторы, сравнительное исследование, методы БНТУ, динамические настройки.*

***Keywords:** PID controllers, comparative study, BNTU methods, dynamic setting.*

### **Введение**

Задача эффективного управления технологическими процессами остается актуальной проблемой для предприятий различных отраслей промышленности. Особенно актуальна эта задача для газо-мазутных тепловых электрических станций (ТЭС) энергосистемы Республики Беларусь, вынужденных работать в пиковой и полупиковой части графиков электрических нагрузок из-за работы энергоблоков БелАЭС в базовой части электрических нагрузок (второй энергоблок БелАЭС будет введен в эксплуатацию в 2022 году).

Большинство методов динамической настройки ПИД-регуляторов позволяют определить параметры динамической настройки регулятора в аналитической форме.

Сравнительные исследования различных методов структурно-параметрической оптимизации реальных ПИД-регуляторов показали явное преимущество экспресс-методов БНТУ.

### **Основная часть**

В работе [1] приведены результаты сравнительных исследований качества переходных процессов в одноконтурных САР с ПИ-регуляторами, настроенными по методу полной компенсации большей постоянной времени передаточной функции объекта (Метод полной компенсации в частном виде – МПК в ЧВ-1),

а также методу частичной компенсации (МЧК) при обработке внутренних возмущений в сравнении с известными методами, применяемыми в теплоэнергетике и обоснованы преимущества методов БНТУ (МПК в ЧВ-I и МЧК).

Целесообразность перехода к ПИД-регуляторам обоснована повышением быстродействия и точности. Это существенно уменьшает расход электрической энергии на привод регулирующих клапанов, что приводит к повышению экономичности работы ТЭС за счет уменьшения расхода электроэнергии на собственные нужды.

Вначале проведем расчет параметров динамической настройки ПИД-регулятора по МПК в ЧВ-I [1]:

$$W_{об}^{расч} = \frac{k_{об} \cdot e^{-\tau p}}{T_k p + 1}, \tag{1}$$

где  $T_k = T_1 + \sigma = 3 + 1 = 4$  мин; (2)

$$W_p(p) = \frac{k_{об}(T_{И2}p + 1)}{T_{И2}p}, \tag{3}$$

где настройки ПИ-регулятора рассчитывают по формулам:

$$T_{И2} = T_k = 4 \text{ мин}; \tag{4}$$

$$\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} : k_{p2} = \frac{T_1}{2k_{об}\tau_y} = \frac{3}{2 \cdot 1 \cdot 5} = 0,3; \tag{5}$$

$$\xi_2 = 1 : k_{p2} = \frac{T_1}{4 \cdot 1 \cdot 5} = 0,15; \tag{6}$$

Схемы моделирования переходных процессов САР с ПИ-регуляторами приведены на рис. 1, 2.

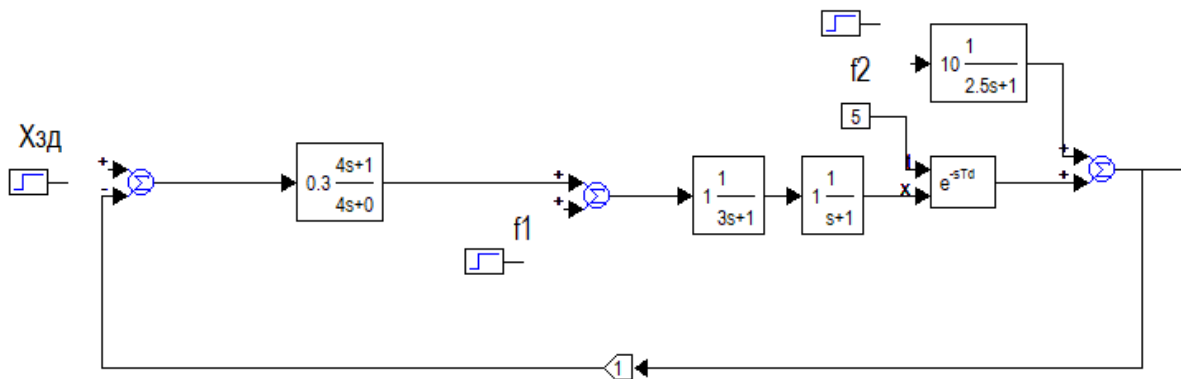


Рисунок 1 – Структурная схема САР, построенной по МПК в ЧВ-I ( $\xi = 1/\sqrt{2}$ )

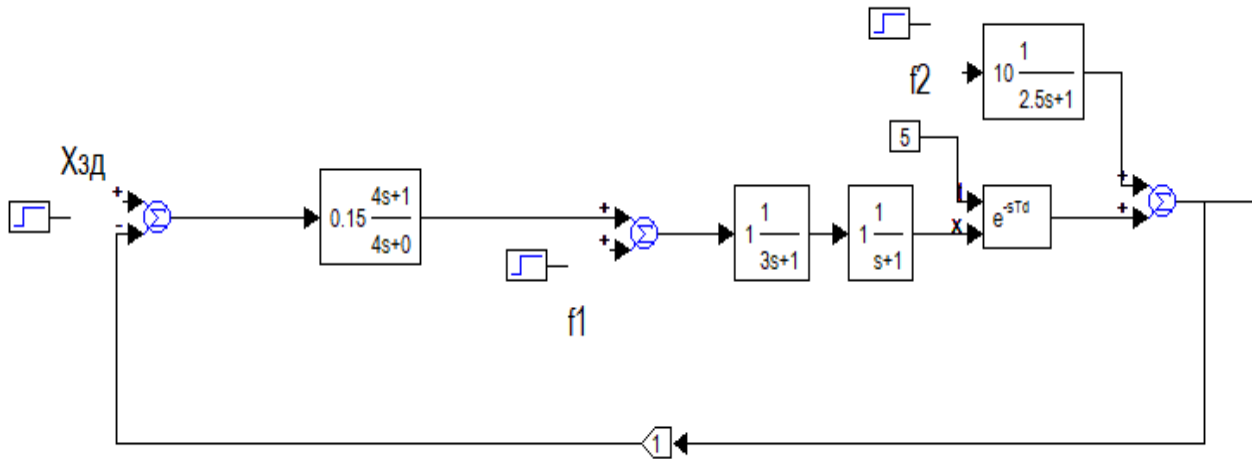


Рисунок 2 – Структурная схема САР, построенной по МПК в ЧВ-I ( $\xi = 1$ )

Выберем структуру регулятора на базе передаточной функции оптимального регулятора с использованием обратной передаточной функции объекта и заданной передаточной функции разомкнутой системы при  $n = 2$  с одним расчетным параметром динамической настройки  $T_{зд}$ , определяемым как доля от величины запаздывания, которое принимаем за целое, и выбираем из ряда чисел пропорции золотого сечения [2]:

$$W_p^{opt}(p) = [W_{об}^*(p)] W_{зд}^{PC(n=2)} = \frac{k_p (T_k p + 1)(\tau p + 1)}{T_k p (\frac{T_{зд}}{2} p + 1)}, \quad (7)$$

где  $k_p = \frac{T_k}{2T_{зд}}$  (8)

Здесь  $T_{зд1} = 0,382 \cdot \tau = 1,91$  мин,  $k_p = 1,05$ ; (9)

$$T_{б1} = \frac{T_{зд2}}{2} = \frac{1,91}{2} = 0,955 \text{ мин}; \quad (10)$$

$$W_{p2}^{opt}(p) = \frac{1,05(4p + 1)(5p + 1)}{4p(0,955p + 1)}; \quad (11)$$

На рис. 3 приведена схема моделирования переходных процессов САР с РПИД, реализованная на передаточной функции оптимального регулятора с использованием принципа динамической компенсации [2].

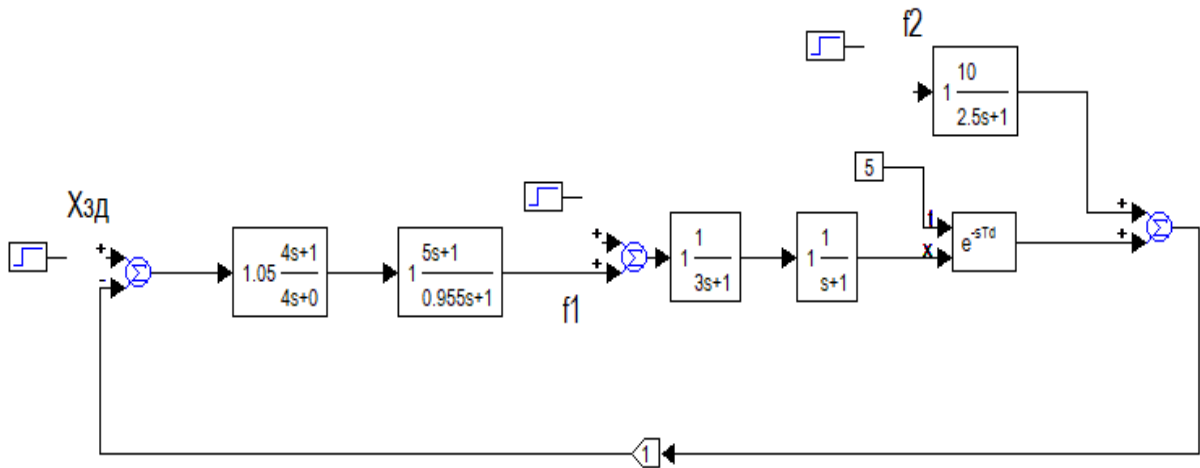


Рисунок 3 – Структурная схема САР с РПИД на базе передаточной функции оптимального регулятора ( $T_{зд1} = 1,91$  мин)

Сравним наилучшие методы настройки ПИД-регуляторов БНТУ:

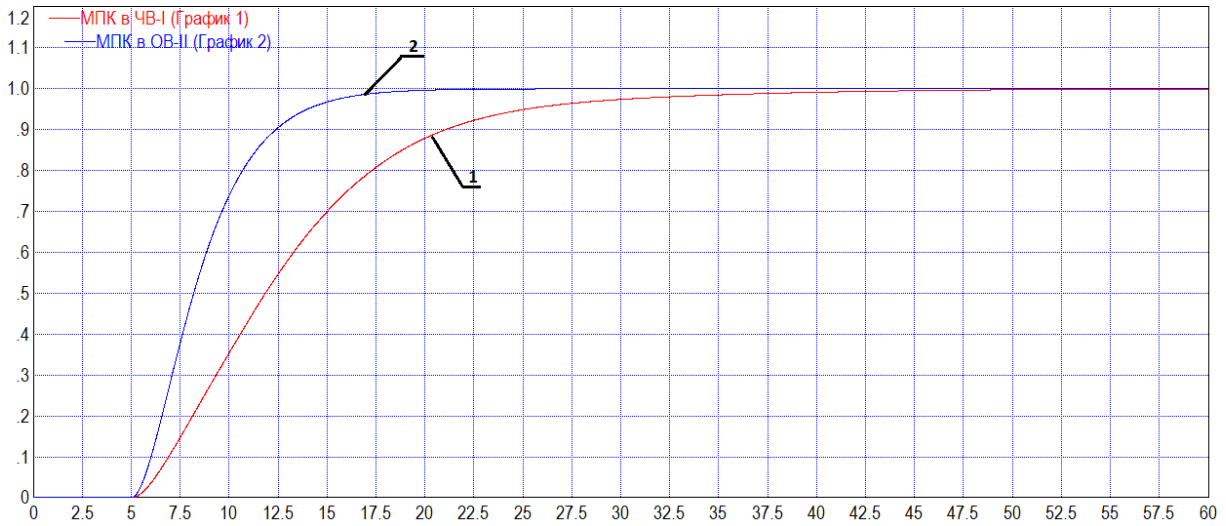


Рисунок 4 – Оработка скачка задания  $x_{зд}$

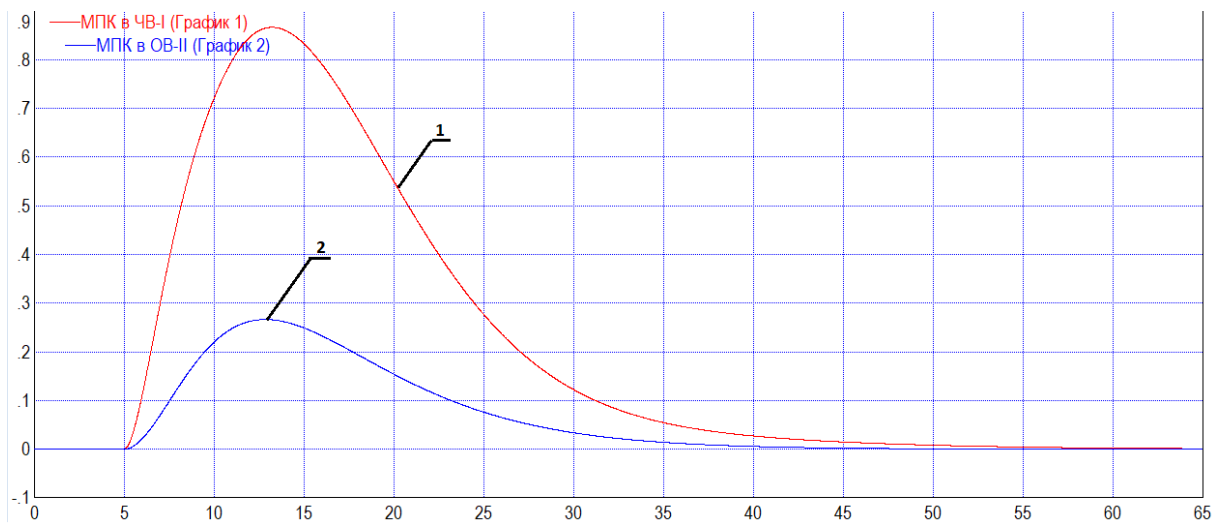


Рисунок 5 – Оработка внутреннего возмущения  $f_1$

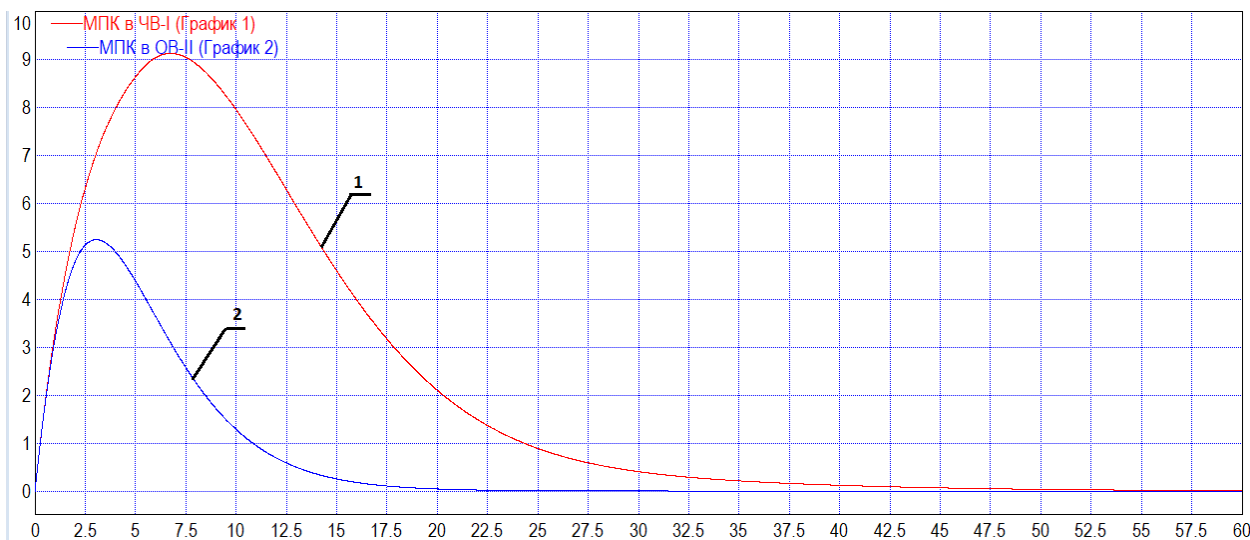


Рисунок 6 – Отработка внешнего возмущения  $f_2$

### Заключение

Для объектов регулирования, передаточные функции которых имеют отношение величины запаздывания по каналу регулирующего воздействия ко времени разгона меньше единицы, можно сделать следующие выводы по структурно-параметрической оптимизации ПИД-регуляторов:

1. При использовании типовых ПИД-регуляторов для улучшения качества регулирования при основных воздействиях целесообразно использовать структуру последовательного соединения ПИ-регулятора и звена быстрого реагирования.

2. Для повышения быстродействия и точности САР при отработке задания в 2 раза и более и уменьшения времени отработки внешнего возмущения от 1,9 раза и более, целесообразно вместо ПИД-регулятора использовать структуру передаточной функции оптимального регулятора БНТУ как произведение передаточной функции фильтра на обратную передаточную функцию ошибки регулирования при отработке скачка крайнего внешнего возмущения.

### Литература

1. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г. Т. Кулаков. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 192 с.
2. Теория автоматического управления: учеб.-метод. пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: БНТУ, 2017. – 133 с.
3. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. для вузов / В. Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.



УДК 628.9.041.9

**СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСИ  
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ  
STRATEGIC DIRECTIONS OF THE REPUBLIC OF BELARUS IN THE  
FIELD OF ENERGY-SAVING LIGHTING**

А. М. Ярохович

Научный руководитель – Е. Н. Савкова, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь

savkova@bntu.by

А. М. Yarohovich

Supervisor – Y. N. Saukova

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассмотрены основные положения и цели концепции Республики Беларусь в области энергосбережения на основе анализа нормативных документов. Выполнен обзор энергосберегающих мероприятий применительно к освещению. Предложены пути создания благоприятной световой среды с учетом инновационных разработок и энергосбережения.*

***Abstract:** the main provisions and objectives of the concept of the Republic of Belarus in the field of energy saving are considered on the basis of the analysis of regulatory documents. The review of energy-saving measures in relation to lighting is carried out. The ways of creating a favorable light environment taking into account innovative developments and energy saving are proposed.*

***Ключевые слова:** энергосбережение, энергообеспечение, биодинамическое освещение.*

***Keywords:** energy saving, energy supply, biodynamic lighting.*

### **Общая концепция энергосбережения в Республике Беларусь**

Энергосбережение – организационная, научная, практическая, информационная деятельность государственных органов, юридических и физических лиц, направленная на снижение расходов и потерь топливно-энергетических ресурсов в процессе их добычи, переработки, транспортировки, хранения, производства, использования и утилизации [1]. Энергосбережение сейчас становится одним из приоритетов политики любой компании, работающей в сфере производства или сервиса. Это обусловлено тем, что удельные энергозатраты на производство основных видов продукции в Беларуси значительно выше, чем в западноевропейских странах. Одной из основных причин такого положения являются устаревшие энергорасточительные технологии, оборудование и приборы [1].

24 февраля 2021 г. Правительством Республики Беларусь утверждена (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24.02.2021 № 103) Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы (далее – Госпрограмма) [2]. Госпрограмма разработана с целью обеспечения сдерживания роста валового потребления топливно-энергетических ресурсов

(далее – ТЭР), сближения энергоемкости валового внутреннего продукта (далее – ВВП) Республики Беларусь со среднемировым значением этого показателя, а также максимально возможного вовлечения в топливный баланс страны собственных ТЭР, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [2].

В рамках Госпрограммы будет осуществлена работа по снижению энергоемкости ВВП и увеличению объема производства энергии из возобновляемых источников энергии, что в полной мере соответствует показателям Целей устойчивого развития (далее – ЦУР), а именно ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех» [2].

Стратегическими целями деятельности в области энергосбережения на период до 2025 г. будут являться [1]:

– снижение энергоемкости (ВВП) к 2026 г. не менее чем на 7 % к уровню 2020 г. при темпах роста ВВП в период 2021–2025 годы 121,5 %;

– достижение к 2026 г. доли местных ТЭР к валовому потреблению ТЭР не менее 16,5 %, что способствует наряду с использованием атомной энергии достижению нормативного уровня энергетической самостоятельности страны [1].

Энергетика является одной из ключевых отраслей экономики. Именно она обеспечивает энерговооруженность, а значит и производительность труда, создавая предпосылки для высокого благосостояния населения страны и укрепления авторитета и влияния государства на международной арене [3].

Энергосбережение сейчас становится одним из приоритетов политики любой компании, работающей в сфере производства или сервиса. Это обусловлено тем, что удельные энергозатраты на производство основных видов продукции в Беларуси значительно выше, чем в западноевропейских странах. Одной из основных причин такого положения являются устаревшие энергорасточительные технологии, оборудование и приборы [3].

Расходы на энергетические ресурсы (ЭР) современного промышленного предприятия является одной из основополагающих статей. Размер ее зависит от номенклатуры выпускаемой продукции, оборудования и от организации взаимодействия источников ЭР и их потребителей. Теплоэнергетическая система промышленного предприятия представляет собой сложное образование, предназначенное для обеспечения потребителей ЭР всех требуемых видов [4].

Энергообеспечение предприятий предусматривает совокупность средств и методов, предназначенных для разработки и применения установок и систем производящих, трансформирующих, распределяющих и потребляющих тепловую, электрическую и иные виды энергии, обеспечивающие функционирование промышленных предприятий. Для оптимизации процесса производства на предприятиях применяются электроприводы со встроенными функциями снижения энергопотребления. Благодаря гибкому изменению частоты их вращения в зависимости от нагрузки энергосбережение может составить 30–50 % [4].

#### **Оптимизация энергосберегающего освещения**

Важнейшим мероприятием по энергосбережению в зданиях станут также установка батарей отопления с автоматической регуляцией. Применение систем

вентиляции, имеющих функцию повторного использования тепловой энергии, позволят сберечь еще больше энергии [5]. Освещение оказывает большое влияние на психоэмоциональное состояние человека. Существует зависимость настроения и работоспособности человека от времени суток. Данная зависимость обусловлена биологическими часами человека, установившимися за счет Солнца, за все время его существования. Интенсивность и температура солнечного света изменяется в течение дня вместе со сменой деятельности людей: теплый свет утром, холодный днем и более теплый вечером. При недостатке солнечного света, который является идеальным для живых организмов, чувствуется ухудшение настроения, работоспособности и общего состояния человека. Особенно это наблюдается в осенне-зимний период [5].

Изначально для освещения в закрытых помещениях люди использовали огонь: лампы, свечи, факелы. Позже появились масляные, керосиновые и газовые лампы, и наконец, первые электрические осветительные приборы – лампы накаливания и дуговые источники света. Затем наступила эра люминесцентных ламп, и люди привыкли к их холодному свету, хотя он сильно отличался от теплого, мягкого и приятного – солнечного [6].

Голландские исследования показали, что способность к сосредоточенной работе, и высокая трудоспособность без оплошностей и ошибок, в бодром состоянии духа на протяжении длительного времени, возможна для человека в условиях более высокой освещенности, при цветовой температуре около 6500 К, которая относится к холодному свету [6].

Теплое освещение вызывает расслабление, дает возможность отдохнуть и повышает выработку мелатонина (гормона сна). Таким образом, оптимальная средняя цветовая температура для офисов и образовательных учреждений составляет 4000 К [6].

Лучшее решение – солнечный свет. Но настоящий свет Солнца изменяется в течение суток от холодного до теплого, так как меняется его интенсивность, оттенок и цветовая температура. Утром свет солнца более теплый, днем он становится холоднее, а к вечеру – снова теплеет [6].

Интенсивность солнечного света разнится в зависимости от времени года. В итоге, наиболее оптимальным решением в плане искусственного освещения является внедрение биодинамических систем освещения [6].

Биодинамическое освещение – технология, позволяющая регулировать интенсивность и температуру света при помощи специальной программы. Таким образом, характеристики освещения меняются в течение дня в соответствии с циркадными ритмами человека [7].

### **Перспективы применения**

Первыми эффективность биодинамического освещения оценили владельцы производственных предприятий. Регулируемое освещение позволило значительно улучшить рабочие показатели при сменной работе [8].

1. В офисах применение биодинамических источников света позволит добиться лучшей концентрации внимания сотрудников и снизить их утомляемость [8].

2. В жилых пространствах такой свет позволит чувствовать себя более комфортно, лучше регулировать время работы и отдыха. Особенно актуальна такая технология для удаленных работников [8].

3. В сфере медицины биосветильники позволяют позитивно влиять на динамику выздоровления пациентов, поддерживать нормальный циркадный ритм у больных, вынужденных находиться в стерильных боксах без окон. Предполагается также, что применение такого света в операционных увеличит точность работы хирургов [8].

4. В торговых залах применение биоосвещения принесет пользу и сотрудникам, и владельцам. Так, в ходе эксперимента в немецком продуктовом магазине было выявлено, что в результате установки специально настроенного биодинамического освещения сотрудники на 35 % реже брали больничный, а продажи выросли в различные дни от 17 до 28 % [8].

5. Целесообразность применения этой технологии в общественных местах подтвердил опыт установки таких светильников в новых поездах метрополитена [8].

Любой вариант искусственного освещения, при его неправильном оформлении, может нанести вред здоровью человека (особенно зрительной системе). Если придерживаться всех рекомендаций и норм, а также подобрать правильно источник света, можно минимизировать или полностью исключить негативное влияние искусственного света на организм.

### Литература

1. Директива Президента Республики Беларусь от 14.06.2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства». // г-та «Советская Белоруссия» № 109 от 15.06.2007 г.

2. Постановление СМ РБ от 24.02.2021 № 103 «О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.energoeffekt.gov.by/laws/resolution/20210224\\_psm\\_103](https://www.energoeffekt.gov.by/laws/resolution/20210224_psm_103). – Дата доступа: 18.04.2022.

3. Об утверждении Республиканской программы энергосбережения на 2016–2020 годы: Постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 марта 2016 г., №248 // Национальный реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2015.

4. Об энергосбережении: Закон Республики Беларусь, 8 января 2015 г. № 239 – З. – 2015// Национальный реестр правовых актов РБ. – 2015.

5. Об утверждении Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь: Указ Президента Республики Беларусь, 17 сент. 2007 г, № 433 – ДСП.

6. Цветовая температура ламп и биодинамическое освещение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elektrik.info/main/lighting/1615-что-такое-biodinamicheskoe-osveschenie.html>. – Дата доступа: 09.04.2022.

7. Постановление СМ РБ от 24.02.2021 № 103 «О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.energoeffekt.gov.by/laws/resolution/20210224\\_psm\\_103](https://www.energoeffekt.gov.by/laws/resolution/20210224_psm_103). – Дата доступа: 18.04.2022.