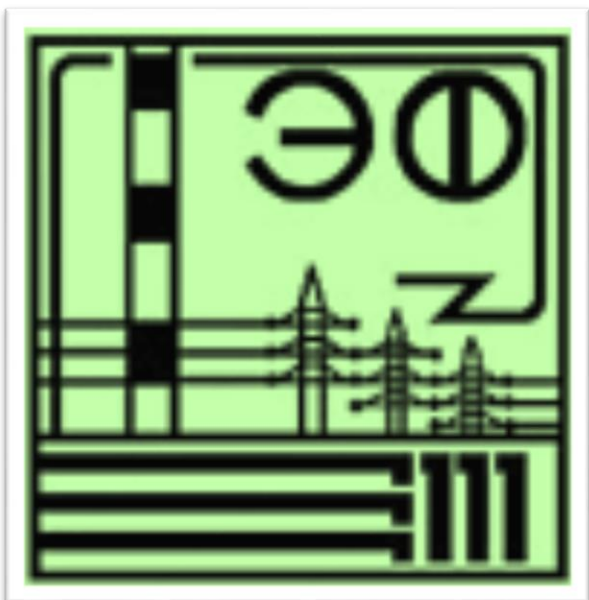


Министерство образования Республики Беларусь  
Белорусский национальный технический университет  
Энергетический факультет



**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**  
**Материалы 79 – й научно – технической конференции**  
**студентов и аспирантов**  
**«Актуальные проблемы энергетики»**  
(Апрель 2023г.)

**Минск БНТУ 2023**

УДК 621.311(06)  
ББК 31.2я43  
Э 45

**Редакционная коллегия:**

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

*Новаш Иван Владимирович* – профессор кафедры «Электротехника и электроника», к.т.н., доцент;

*Дерюгина Елена Александровна* – заведующая кафедрой «Электроснабжение». к.т.н., доцент.

**Составитель:**

Жуковская Т.Е. – старший преподаватель кафедры «Электротехника и электроника» БНТУ

В сборник включены материалы секции «Электроэнергетика и электротехника». 79 – й научно-технической конференции студентов и аспирантов БНТУ «Актуальные проблемы энергетики» (Апрель 2023 г.).

Статьи печатаются в авторской редакции

Белорусский национальный технический университет.  
Энергетический факультет.  
пр - т Независимости, 65/2, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: (017) 292-42-32 Факс: 292-71-73  
E-mail: ef@bntu.by  
<http://www.bntu.by/ef.html>

ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>GAN – ТРАНЗИСТОРЫ</b>	<b>7</b>
<i>А.С. Шенец, П.Д. Кагочкин</i>	
<i>Научный руководитель – О.А. Пекарчик, старший преподаватель</i>	
<b>УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ СВЕТОДИОДОВ</b>	<b>11</b>
<i>А. В. Казейка</i>	
<i>Научный руководитель – О.А. Пекарчик, старший преподаватель</i>	
<b>КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>14</b>
<i>Кречко А.А.</i>	
<i>Научный руководитель – Е.Н. Савкова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b>	<b>18</b>
<i>Чибисова П.А.</i>	
<i>Научный руководитель – Е.Н. Савкова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ</b>	<b>22</b>
<i>Тибеж Я. В., Эльяшевич А. П.</i>	
<i>Научный руководитель – Е.Н. Савкова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ОБЗОР РЫНКА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В БЕЛАРУСИ</b>	<b>26</b>
<i>Н.С. Некало, А.О. Булавский</i>	
<i>Научный руководитель – С. В. Лозицкая, ассистент</i>	
<b>СПОСОБЫ УРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ В ОЭС</b>	<b>29</b>
<i>Н.С. Некало, А.О. Булавский</i>	
<i>Научный руководитель – С. В. Лозицкая, ассистент</i>	
<b>ДАТЧИКИ ХОЛЛА</b>	<b>32</b>
<i>В. О. Воронова, В. А. Гриневич, С. А. Крейдич</i>	
<i>Научный руководитель - В.В. Зеленко, старший преподаватель</i>	
<b>УМНАЯ СЕТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ</b>	<b>37</b>
<i>А. В. Яценко</i>	
<i>Научный руководитель – В.В. Зеленко, старший преподаватель</i>	
<b>АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ</b>	<b>41</b>
<i>П.И. Рымко</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>ТЕРМОРЕГУЛЯТОРЫ</b>	<b>47</b>
<i>А.Д. Касач</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>ВОЛОКНО-ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ</b>	<b>54</b>
<i>Падрез А. С.</i>	
<i>Научный руководитель – Т. Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>ЭЛЕКТРОНИКА. ФОТОЭЛЕКТРОНИКА.</b>	<b>59</b>
<i>А.А. Заяц</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>ТИПЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ</b>	<b>68</b>
<i>Корякин М.</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ</b>	<b>73</b>
<i>Р. С. Борисюк, И. В. Пигуль</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА</b>	<b>83</b>
<i>В.В. Гарновский</i>	
<i>Научный преподаватель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ</b>	<b>89</b>
<i>В.В. Сенюта</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>ИЗМЕРИТЕЛИ – РЕГУЛЯТОРЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ</b>	<b>96</b>
<i>К.А. Чабанова, И. Пряник</i>	
<i>Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	

<b>СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>101</b>
<i>К. Д. Сырцов</i>	
<i>Научный руководитель – Т. Е. Жуковская, старший преподаватель</i>	
<b>СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ</b>	<b>107</b>
<i>Е.А. Шетик, И.В. Кулинич,</i>	
<i>Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ</b>	<b>114</b>
<i>Р.С. Борисюк</i>	
<i>Научный руководитель – В.П. Счастный, к.т.н., доцент</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ</b>	<b>117</b>
<i>Д.А. Русаков, А.А. Супрунюк</i>	
<i>Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ</b>	<b>126</b>
<i>М.Г. Лысюк, П.Ч. Запасник,</i>	
<i>Руководитель – А.Ю. Капустинский, старший преподаватель</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И КОНТРОЛЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ</b>	<b>132</b>
<i>А.П. Буйвол, И.М. Гаращенко, Е.С.Халецкий</i>	
<i>Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ</b>	<b>137</b>
<i>Е.А. Шетик, С.П. Клопов</i>	
<i>Научный руководитель – В.Н. Калечиц, старший преподаватель</i>	
<b>УПРАВЛЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЕМ</b>	<b>142</b>
<i>Д.В. Лагунов, Д.А. Козловская</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.И. Богданов, преподаватель-стажер</i>	
<b>ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН</b>	<b>146</b>
<i>Д.В. Лагунов, Д.А. Козловская</i>	
<i>Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>152</b>
<i>Барановский В.Д.</i>	
<i>Научный руководитель – Е.Н. Савкова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b>	<b>158</b>
<i>Чибисова П.А.</i>	
<i>Научный руководитель – Е.Н. Савкова, к.т.н., доцент</i>	
<b>НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭНЕРГИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕТИ</b>	<b>162</b>
<i>А.Ю. Кирикович</i>	
<i>Научный руководитель – Е.А. Дерюгина, к.т.н., доцент</i>	
<b>КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>166</b>
<i>Кречко А.А.</i>	
<i>Научный руководитель – Е.Н. Савкова, к.т.н., доцент</i>	
<b>ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ БОЛЬШИХ ТОКАХ КЗ</b>	<b>170</b>
<i>Траскевич Д.И.</i>	
<i>Руководитель – А.Ю. Капустинский, старший преподаватель</i>	
<b>ДРАЙВЕРЫ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА</b>	<b>176</b>
<i>М. В. Кишкель, Ю.А. Котковец</i>	
<i>Научный руководитель: В. Б. Козловская, к.т.н., доцент</i>	
<b>СОВРЕМЕННЫЕ НАКОПИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СФЕРЕ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>181</b>
<i>Е.В. Радюк, И.В. Ковалец</i>	
<i>Научный руководитель – С.О. Новиков, к.т.н., доцент</i>	
<b>ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>186</b>
<i>В.С. Вадейко, В.Н. Коршун</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент</i>	
<b>ПУНКТ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ</b>	<b>189</b>
<i>А.И. Васильева, С.В. Зеньков</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент</i>	

<b>СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ</b>	<b>193</b>
<i>В.В. Голуб, М.А. Шешко</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ</b>	<b>198</b>
<i>И.В. Ковалец, Е.В. Радюк</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент</i>	
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УЩЕРБ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b>	<b>203</b>
<i>Г.Д. Козин, М.В. Прокопович</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент</i>	
<b>БИОТОПЛИВО ИЗ ВОДОРΟΣЛЕЙ</b>	<b>207</b>
<i>Падрез А. С.</i>	
<i>Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент</i>	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ</b>	<b>210</b>
<i>В.С. Вадейко, В.Н. Коршун</i>	
<i>Научный руководитель – А.Л. Старжинский, доцент</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАФОВ В НАДЕЖНОСТИ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА</b>	<b>216</b>
<i>А.И. Васильева</i>	
<i>Научный руководитель – А.Л. Старжинский, доцент</i>	
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЛЭП</b>	<b>222</b>
<i>Е.В. Радюк, И.В. Ковалец</i>	
<i>Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент</i>	
<b>АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ ПО УСЕЧЕННОМУ ГРАФУ СОСТОЯНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ</b>	<b>227</b>
<i>А.А. Бандюкевич, Г.Д. Козин</i>	
<i>Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент.</i>	
<b>СТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ВЛ И ОБОРУДОВАНИЯ ЭС</b>	<b>231</b>
<i>В.В. Голуб, М.А. Шешко</i>	
<i>Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент</i>	
<b>Оценка надёжности изоляции электрооборудования.</b>	<b>235</b>
<i>А.В. Манько, Н.Ю. Подоба</i>	
<i>Научный руководитель – А.Л. Старжинский, доцент</i>	
<b>АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ</b>	<b>241</b>
<i>С.В. Климчук, М.В. Прокопович</i>	
<i>Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент</i>	
<b>АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ ВЫШНЕГРАДСКОГО</b>	<b>246</b>
<i>И.Ю. Аникейчик</i>	
<i>Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель</i>	
<b>ВВОД РЕЗЕРВОВ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ</b>	<b>250</b>
<i>А.А. Бандюкевич</i>	
<i>Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС</b>	<b>254</b>
<i>А.А. Белоус</i>	
<i>Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА И АНАЛИЗА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</b>	<b>260</b>
<i>И.А. Болбат, Е.Ч. Рудько</i>	
<i>Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель</i>	
<b>ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ВКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗОК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ. ЧАСТОТНОЕ АПВ</b>	<b>267</b>
<i>А.И. Васильева</i>	
<i>Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель</i>	
<b>РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ВЕТВЕЙ ИЗ СЕТИ</b>	<b>271</b>
<i>К.Д. Сырцов</i>	
<i>Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель</i>	

<b>ОПИСАНИЕ ТРЕНАЖЕРОВ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 - 10 КВ</b>	<b>276</b>
<i>И.Н. Адамович, В.Ю. Докутович, К.Д. Сырцов</i> <i>Научный руководитель – Д.А. Секацкий, старший преподаватель</i>	
<b>АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМАССЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ</b>	<b>282</b>
<i>П.Е.Касатая, А.С.Мелькова</i> <i>Научный руководитель – Е.А.Кравчук, старший преподаватель</i>	
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД К НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ</b>	<b>285</b>
<i>А.С.Мелькова, П.Е.Касатая</i> <i>Научный руководитель – Е.А.Кравчук, старший преподаватель</i>	
<b>ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ</b>	<b>289</b>
<i>А.С. Коледа, К.А. Габибова</i> <i>Научный руководитель – Д.А. Лапченко, старший преподаватель</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ</b>	<b>293</b>
<i>П.Г.Назарова, Недоружев М.С.</i> <i>Научный руководитель – Е.П. Корсак, старший преподаватель</i>	
<b>ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОФФШОРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	<b>295</b>
<i>М. Р. Пильковская</i> <i>Научный руководитель – Е.П. Корсак, старший преподаватель</i>	
<b>ОСОБЕННОСТИ МАРКЕТИНГА В ЭНЕРГЕТИКЕ</b>	<b>300</b>
<i>Д.М. Райко</i> <i>Научный руководитель – Е.П. Корсак, старший преподаватель</i>	
<b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ</b>	<b>303</b>
<i>Д.Н. Романюк</i> <i>Научный руководитель – Т.Ф. Манцерова, к.э.н., доцент</i>	
<b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАГРУЗКАМИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ</b>	<b>307</b>
<i>А. В. Тарасюк</i> <i>Научный руководитель – Корсак Е. П., м.э.н., старший преподаватель</i>	
<b>РАЗВИТИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ</b>	<b>310</b>
<i>А. Д. Фальченко, М. В. Наталевич</i> <i>Научный руководитель – Е.А. Кравчук, старший преподаватель</i>	
<b>АНАЛИЗ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ</b>	<b>313</b>
<i>М. В. Наталевич, А. Д. Фальченко</i> <i>Научный руководитель – Е. А. Кравчук, старший преподаватель</i>	

УДК 621.311

## GAN – ТРАНЗИСТОРЫ GAN – TRANSISTORS

А.С. Шенец, П.Д. Кагочкин

Научный руководитель – О.А. Пекарчик, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

piakarchyk@bntu.by

A. Shenets, P. Kagochkin

Supervisor – O. Piakarchyk, Senior lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** В данной статье рассмотрен принцип действия транзистора на основе нитрида галлия. Описаны преимущества использования данного транзистора, его свойства и сферы применения.

**Abstract:** This article discusses the principle of operation of a transistor based on gallium nitride. The advantages of using this transistor, its properties and applications are described.

**Ключевые слова:** транзистор, нитрид галлия, электрические свойства, надежность.

**Keywords:** transistor, gallium nitride, electrical properties, reliability.

### Введение

GaN — это методика изготовления транзисторов с применением нитрида галлия. Транзистор на основе нитрида галлия (GaN – транзистор) является полупроводниковым элементом с высокой подвижностью электронов (HEMT). Включает в себя три вывода — затвор, исток и сток. Высокая степень подвижности электронов говорит о том, что GaN – транзистор имеет большую напряженность электрического поля в сравнении с транзисторами на основе кремния.

### Основная часть

Преимуществами данных транзисторов считаются низкое сопротивление в открытом состоянии, небольшие потери проводимости и потери переключения, высокочастотное переключение, высокий КПД, малый форм-фактор, более высокая плотность мощности и устойчивость к высоким температурам.

Рассмотрим простейшую классическую ячейку GaN-транзистора, которая представлена на рисунке 1 [1]. На кремниевой подложке образуется защитный слой AlN. На нем возникает гетероструктура GaN/AlGaIn. Далее выстраиваются защитный диэлектрический слой и электроды.

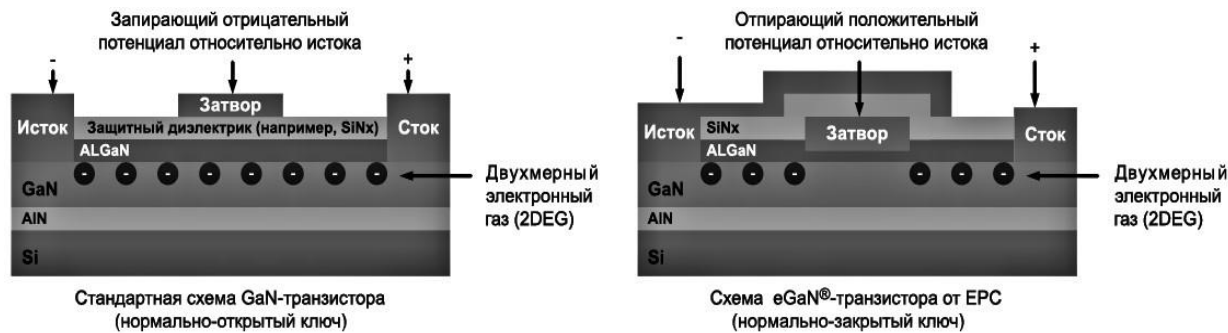


Рисунок 1 - Ячейка GaN-транзистора

GaN и AlGaN имеют полярную природу. В связи с этим, уже в процессе роста на их границе протекает самопроизвольная поляризация с возникновением поверхностных зарядов. Помимо этого, GaN имеет выраженные пьезоэлектрические свойства. Под воздействием деформации и механических напряжений он дополнительно поляризуется. Поскольку решетки GaN и AlGaN имеют рассогласование, то такие напряжения непременно возникают на границе раздела их сред.

В итоге процесс поляризации способствует образованию заряда в виде двумерной плоскости (двухмерный электронный газ, 2DEG).

Если на электроды стока и истока данной ячейки подать напряжение, то станет проходить ток даже при том, что напряжение на затворе равно нулю. Поэтому можно сказать, что данный прибор является нормально открытым.

Для того, чтобы остановить протекание тока на затвор, нужно подать отрицательное напряжение по отношению к истоку (рисунок 1).

Определенно данный транзистор не совсем удобен в использовании. Во-первых, чтобы не произошло выгорание схемы, необходимо до включения основного питания организовать выключение транзистора. Во-вторых, необходимо иметь вспомогательный источник отрицательного напряжения.

Стоит сказать о том, что рассмотренная структура имеет весьма примитивный вид. На деле же она достаточно сложная.

Для более рационального отвода тепла от GaN слоя требуется наличие подложки, но все классические материалы (например, Si, SiC, сапфир) имеют расхождение кристаллических решеток с GaN. Поэтому, чтобы понизить механические напряженности, вводят специальные связующие слои. Таким же образом добавляются и слои между другими различными материалами ячейки. В результате получается сложная структура.

Трудности добавляет тот факт, что конечных решений данной проблемы нет и нужно проводить дорогостоящие исследования для нахождения наиболее соответствующих материалов, толщины слоев и прочее [1].

### Типы GaN - транзисторов:

Транзисторы на основе GaN делятся на два вида: силовые транзисторы на основе GaN с улучшенным режимом (e-GaN) и силовые транзисторы на основе GaN в режиме истощения (d-GaN).



В расширенном режиме GaN-транзистор эквивалентен «нормально открытому» переключателю (обычно выключенному). Это говорит о том, что когда на клемму затвора не подается напряжение, GaN-транзистор не проводит (выключен). Он включается подачей положительного напряжения затвор-исток.

В режиме истощения GaN-транзистор эквивалентен «нормально закрытому» переключателю (нормально включенному). Это показывает, что транзистор находится во включенном состоянии при нулевом напряжении затвор-исток. Выключается подачей отрицательного напряжения относительно электродов стока и истока [2].

### **Сферы применения:**

Устройства на основе GaN имеют значительные преимущества по сравнению с другими полупроводниковыми технологиями: снижение затрат на энергию, так как GaN эффективнее, чем кремний, поэтому, меньшее количество энергии рассеивается в виде тепла, что обеспечивает меньшие затраты на охлаждение и меньшее количество систем охлаждения (например, радиаторы, вентиляторы).

Достаточно быстрое внедрение мощных транзисторов и интегральных схем на основе GaN было обусловлено преимуществом скорости GaN по сравнению с кремнием. Транзисторы GaN-on-Si переключаются примерно в 10 раз быстрее, чем MOSFET, и в 100 раз быстрее, чем IGBT. Приложения отслеживания радиочастотных огибающих для базовых станций 4G/LTE и системы обнаружения и определения дальности света (лидары) для автономных автомобилей, роботов, дронов и систем безопасности стали первыми массовыми приложениями, которые в полной мере использовали возможности высокоскоростной коммутации GaN.

GaN-транзисторы были не только быстрее, чем Si MOSFET и IGBT, но и намного меньше — примерно в 5–10 раз. Это дало толчок в развитии многих приложений в робототехнике и медицинской электронике, в космических спутниках и дронах.

Приборы на основе нитрида галлия широко применяются в космосе, поскольку нитрид галлия по своей природе устойчив к радиации. В отличие от кремния, при использовании которого для защиты полупроводников от воздействия радиации необходимы специальные технологии изготовления и специальная упаковка, природные свойства GaN делают его достаточно невосприимчивым к этим вредным лучам. GaN-транзисторы используются в ионных двигателях, для преобразования энергии от солнечных панелей спутников, в высокоточных двигателях BLDC повышенной прочности для привода реактивных колес, а также в робототехнике и автоматизированных приборах, используемых в космических миссиях, для определения дальности с использованием лидара.

Использование нитрида галлия способствует развитию возобновляемой энергетики. Для ускорения распространения возобновляемых источников энергии, необходимо добиться более эффективного преобразования, увеличения емкости хранения энергии и снижения затрат без ущерба для долгосрочной надежности. Энергетические решения на основе GaN позволяют солнечным микроинверторам, оптимизаторам и системам накопления энергии, используе-

мым для солнечной энергетики, повышать эффективность и уменьшать размер и стоимость, обеспечивая при этом непревзойденную надежность [3].

### **Заключение**

В настоящее время, GaN-транзисторы и материал из нитрида галлия более эффективны и надежны, несмотря на то, что они меньше и легче. С ростом цифровизации и развитием многих технологий эти преимущества позволяют внедрять передовые инновации. Высокая скорость переключения, высокая удельная мощность, более высокая эффективность при меньшем форм-факторе и невероятная надежность — вот лишь некоторые из них.

### **Литература**

1. Нитрид-галлиевые транзисторы [Электронный ресурс]/ нитрид-галлиевые транзисторы. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/71931>. – Дата доступа: 10.03.2022.
2. Что такое GaN-транзисторы [Электронный ресурс]/ что такое GaN-транзисторы. – Режим доступа: <https://www.everythingpe.com/community/what-is-a-gan-transistor>. – Дата доступа: 10.03.2022.
3. Сферы использования GaN-транзисторов [Электронный ресурс]/ сферы использования GaN-транзисторов. – Режим доступа: <https://epc-co.com/epc/gallium-nitride/where-is-gan-going>. – Дата доступа: 10.03.2022.

УДК 621.382.2

## УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ СВЕТОДИОДОВ LED PROTECTION DEVICE

А. В. Казейка

Научный руководитель – О.А. Пекарчик, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь  
piakarchyk@bntu.by

А. Kazeika

Supervisor – O. Piakarchyk, Senior lecturer  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** В данной статье описаны причины применения светодиодного освещения и как защитить от перегрузки системы. Рассмотрена схема устройства защиты светодиодов. Приведены бюджетные варианты использования светодиодного освещения

**Abstract:** This article describes the reasons for using LED lighting and how to protect against system overload. The scheme of the LED protection device is considered. Budget options for using LED lighting are given

**Ключевые слова:** светодиодное освещение, транзистор, варистор, балластный элемент.

**Keywords:** LED lighting, transistor, varistor, ballast element.

### Введение

В настоящее время уже меньше используются традиционные источники света, так как высокую популярность набирает светодиодное освещение. Такое освещение имеет высокое КПД, а также использует вторичную оптику, что помогает улучшить освещение в несколько раз. С одной стороны, применение светодиодов экономичнее и современнее, но, с другой стороны, при неправильном обслуживании происходит деградация кристалла и диод быстро теряет яркость.

Так как светодиоды часто применяются в системах, которые находятся за пределами сооружений, то появляется риск выхода из строя прибора в следствии воздействия теплового нагрева, электростатического удара и переходных процессов в электрических цепях. Поэтому при проектировании требуется учитывать негативные факторы, влияющие на работу светодиодов. Для этого в смету проекта внедряют схему защиты светодиодов. Стандартным защитным устройством светодиода является последовательно включённый балластный элемент (резистор, дроссель или конденсатор) [1].

### Основная часть

Наиболее распространенным защитным устройством является балластный резистор, но имеет значительные потери электроэнергии и поэтому нельзя использовать с мощными светодиодами. Потери электроэнергии на дроссельных

и конденсаторных балластах меньше, но такие балласты громоздкие по размерам и ненадежны.

Основными параметрами при выборе устройств защиты светодиодов являются номинальный ток и мощность светодиода, прямое рабочее напряжение и выходное напряжение драйвера светодиода. Максимальный ток, потребляемый светодиодом высокой яркости при его номинальной мощности можно определить по формуле 1 [2].

$$I = \frac{P}{U_{пр}} \quad (1)$$

где I — ток, А;

P — номинальная мощность светодиода, Вт;

$U_{пр}$  — прямое напряжение светодиода, В.

Схема устройства защиты светодиодов представлена на рисунке 1 [1]. Основной элемент схемы – усилитель постоянного тока на биполярном (VT2) и полевом (VT1) транзисторах.

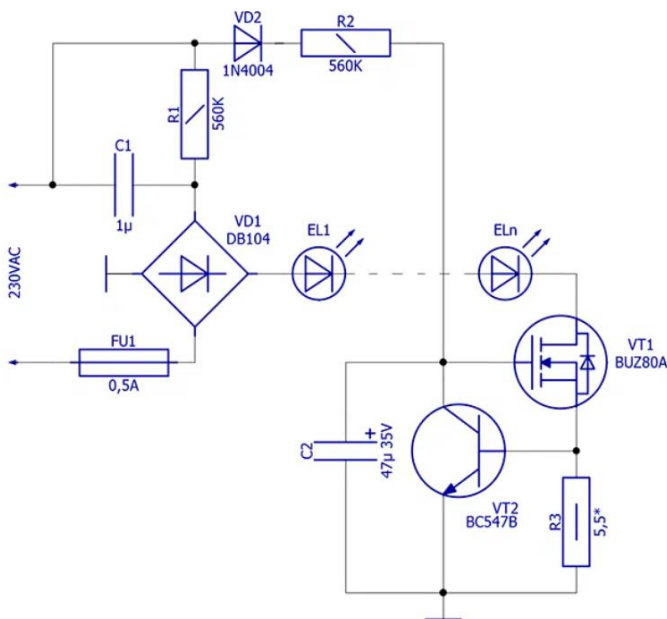


Рисунок 1 – Схема устройства защиты светодиодов

Устройство защиты состоит из двух балластов: конденсаторного (C1) и нелинейного (УТП), которые включены последовательно со светодиодами. Если включить конденсатор C2, то исключается скачкообразное включение и перегрузка светодиодов, так как происходит плавная зарядка диода VD2, что приводит к открыванию VT1. Чем больше подается напряжение питания, тем больше яркость диодов, но будет меньше время их включения.

Для того, чтобы избежать перегрузки схемы, нужно правильно подобрать тип и количество светодиодов. Поэтому требуется правильно рассчитать номинальное напряжение, которое определяется емкостью C1 и параметрами светодиодов.

После выбора типа светодиода следует выбрать тип корпуса устройства защиты, который подходит для применения в данной системе освещения. Сле-

дует определить температуру окружающей среды для рабочих условий эксплуатации устройства защиты и, при необходимости, обеспечить отвод тепла.

В соответствии с требованиями нормативно-технических документов, светодиодное освещение, которое размещено за пределами сооружений заземлены. Кроме заземления, для защиты осветительного оборудования применяются специальные защитные компоненты (варисторы), которые подключаются на питающих проводах снаружи. Одним из производителей таких приборов является компания Littelfuse, которая, помимо иных защитных компонентов, производит и высококлассные средства защиты LED-светильников [3].

### **Заключение**

Полностью исключить вероятность перегорания светодиодных ламп невозможно. Однако можно продлить светодиодам жизнь, минимизировав влияние скачков напряжения. Сделать это можно либо своими руками, либо купив блок защиты светодиодных ламп заводского исполнения.

Для того, чтобы использовать менее дорогую схему защиты светодиодов можно установить одно защитное устройство для двух последовательных диодов, но если погаснет один, то откажет и второй. Поэтому лучше всего использовать для каждого светодиода свое защитное устройство, хоть будет и дороже.

По основным характеристикам – сроку службы, экономичности, экологичности и параметрам светоотдачи – светодиодное освещение превосходит люминесцентное, галогенное и накаливания. Диоды становятся дешевле в производстве, совершенствуются их конструктивные элементы и одновременно с этим увеличивается популярность. Можно уверенно утверждать: за светодиодными источниками – будущее [4].

### **Литература**

1. Дзен [Электронный ресурс]/ Устройство защиты светодиодов. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/Y4doAVERd0hhENxd>. – Дата доступа: 26.03.2023.
2. Elec [Электронный ресурс]/ Устройства защиты предохраняют светодиоды от импульсных помех. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/publications/osveschenie/2711/>. Дата доступа: 26.03.2023.
3. Electric info [Электронный ресурс]/ Защита светодиодных ламп от перегорания: схемы, причины, продлеваем жизнь. – Режим доступа: <http://electrik.info/main/master/1439-zaschita-svetodiodnyh-lamp-ot-peregoraniya.html#i5>. – Дата доступа: 26.03.2023.
4. Интера лайтинг [Электронный ресурс]/ Светодиодное освещение. – Режим доступа: [https://interalighting.ru/blog/2515\\_svetodiodnoe-osveshchenie](https://interalighting.ru/blog/2515_svetodiodnoe-osveshchenie). Дата доступа: 26.03.2023.

УДК 621.311

**КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  
ЭНЕРГЕТИКИ**  
**QUANTUM MEASUREMENTS AS A PERSPECTIVE DIRECTION OF  
ENERGY**

Кречко А.А.

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

А. Krechko

Supervisor – Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Рассмотрены сущность и принципы квантовых измерений, их особенности и применение в энергетике. Описаны комбинаторные задачи, которые возникают в энергетическом секторе экономики и проблемы их решения. Показано, как квантовые измерения могут помочь в решении данных задач, приведены конкретные примеры их применения в энергетике РБ*

***Abstract:** In this paper, quantum measurements are considered as an effective way to solve problems in the energy sector*

***Ключевые слова:** Квантовые измерения, квантовые технологии, оптимизация энергетических систем*

***Keywords:** Quantum measurements, quantum technologies, optimization of energy systems*

### **Введение**

Люди всегда использовали природные ресурсы земли для производства продуктов и услуг, удовлетворяющих их основные потребности, экспериментировали с формой, размером и производительностью изобретений.

Метрологические стандарты определяют критерии качества измерений и устанавливают требования к точности, надежности, повторяемости и воспроизводимости измерений. Они также определяют требования к эталонам, используемым для проведения измерений, к процедурам и методам измерений.

### **Основная часть**

В современном мире энергетика играет ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности человечества. Но в процессе производства и потребления энергии возникает множество комбинаторных задач, связанных с оптимизацией расходов и повышением эффективности процессов. Решение этих задач является одним из важных направлений развития энергетики.

В 1900 году Максом Планком был впервые введен термин квант в первой работе по квантовой теории, заложившей её основу. Вокруг идеи квантования с начала 1900-х годов развилась новая физическая концепция, называемая кван-

товой физикой. Квантовые измерения позволяют проводить измерения с высокой точностью и чувствительностью, что делает их особенно полезными для измерения нано масштабных объектов, атомов и молекул. В отличие от классических измерений, квантовые измерения могут приводить к квантовым эффектам, таким как интерференция и рентгламент.

Цель данной работы – изучение возможности применения квантовых измерений для решения комбинаторных задач в энергетике и анализ перспектив данного подхода.

### **Сущность и особенности квантовых измерений.**

Одна из особенностей квантовых измерений является невозможность одновременного измерения нескольких квантовых состояний. Кроме того, в квантовой механике не существует точного значения для физических величин, и результаты измерений являются вероятностными. Вот почему квантовые измерения представляют собой уникальный подход к измерению и анализу физических систем. Квантовые приборы используются для измерения таких физических величин, как электронный заряд, магнитный момент, атомные свойства и другие характеристики частиц и систем. В энергетическом секторе квантовые измерения могут более эффективно использоваться для решения различных задач, включая комбинаторные задачи, связанные с оптимизацией работы энергетических систем, так как традиционные методы оптимизации могут быть ограничены классическими вычислительными возможностями [1].

Сущность квантовых измерений - измерение физической величины изменяет состояние самой системы. Измерение происходит через взаимодействие измерительного прибора с системой, и это взаимодействие неизбежно приводит к изменению квантового состояния системы.

Квантовые измерения имеют ряд уникальных свойств, таких как неопределенность, неоднозначность и взаимозависимость, которые отличают их от классических измерений. В некоторых случаях они позволяют достигнуть уровня точности, недостижимого с помощью классических методов.

В энергетическом секторе экономики для эффективного управления распределительными сетями необходимо решать задачи о поиске оптимальных путей передачи энергии от источников к потребителям, распределении нагрузки между различными узлами сети и т.д. Такие задачи могут иметь огромное количество вариантов решения, которые не всегда могут быть найдены классическими методами оптимизации [2].

Применение квантовых измерений позволяет проводить оптимизацию энергетических систем с высокой точностью и находить оптимальные решения в условиях большой размерности пространства поиска. Квантовые алгоритмы оптимизации также могут быть использованы для решения задач о синтезе оптимальных управляющих воздействий, например, в управлении генерацией энергии ветровыми и солнечными установками. Для решения комбинаторных задач в энергетике важно то, что результаты измерений, полученные в ходе вычислений на квантовом компьютере, являются вероятностными. Однако вероятности получаемых решений могут быть высокими, что делает возможным

использование квантовых алгоритмов для решения сложных комбинаторных задач в энергетике.

Существует множество методов квантовых измерений. Некоторые из этих методов включают:

1. Метод квантовой интерферометрии. Этот метод основан на принципах интерференции волн и используется для измерения различных параметров, таких как длина волны, частота и фаза.

2. Метод квантовых каскадов. Этот метод используется для измерения малых электрических сигналов, например, в процессе детектирования слабых сигналов в радиолокации или в измерении биологических сигналов.

3. Метод квантовой томографии. Этот метод используется для измерения квантовых состояний системы. Он основан на реконструкции плотности матрицы квантовой системы из экспериментальных данных.

4. Методы квантовой метрологии. Эти методы используются для точных измерений физических величин, например, массы, заряда и времени.

5. Квантовая магнитометрия. Этот метод используется для измерения магнитных полей с высокой точностью [3].

Для проведения квантовых измерений используются специальные приборы и устройства, такие как:

1. Квантовые датчики – устройства, которые используют квантовые свойства материи для измерения различных параметров, таких как магнитное поле, температура, давление и т.д.

2. Квантовые компьютеры – устройства, использующие квантовые принципы для обработки информации и решения сложных вычислительных задач.

3. Квантовые приборы – устройства, которые используют квантовые эффекты для измерения различных параметров, таких как время, частота, силы.

### **Внедрение квантовых измерений в энергетике.**

Квантовые измерения представляют собой более эффективный способ измерения и контроля параметров. Их применение позволит повысить эффективность и экономическую выгоду работы энергетических систем.

Квантовые измерения широко применяются в энергетической отрасли:

1. Оптимизация работы электростанций и сетей. Квантовые компьютеры могут использоваться для решения комбинаторных задач, связанных с оптимизацией работы энергетических систем. Например, они могут оптимизировать распределение нагрузки в энергосистемах, уменьшая издержки на производство электроэнергии.

2. Разработка новых материалов. Квантовые измерения могут помочь в создании новых материалов для энергетических установок и устройств. Например, измерения квантовых свойств материалов позволяют оптимизировать их свойства и улучшить работу солнечных батарей, батарей для хранения энергии и других устройств.

3. Создание квантовых датчиков. Квантовые датчики могут использоваться для измерения различных параметров, связанных с производством и использованием энергии. Например, квантовые датчики могут измерять темпера-



туру и давление в реакторах ядерных электростанций, что поможет предотвратить аварии и повысить безопасность.

4. Исследование квантовых явлений в энергетических системах. Квантовые явления, такие как квантовые переходы и квантовая интерференция, могут играть важную роль в энергетических системах. Исследования этих явлений могут привести к созданию новых устройств и технологий для производства и использования энергии [4].

Это лишь несколько примеров применения квантовых измерений в энергетической отрасли. Квантовые технологии становятся все более востребованными, открывая новые возможности для применения в энергетике.

### **Заключение**

В результате исследования были рассмотрены сущность и принципы квантовых измерений, их особенности и применение в энергетике. Описаны комбинаторные задачи, которые возникают в энергетическом секторе экономики и проблемы их решения, а также показаны возможности квантовых измерений в решении данных задач и приведены конкретные примеры их применения в энергетике РБ [5].

Таким образом, квантовые измерения представляют собой новую технологию, которая может эффективно применяться в энергетической отрасли. Использование квантовых измерений в энергетике представляет большой потенциал для развития отрасли и решения многих ее проблем.

### **Литература**

1. Ахметов, Т. И., & Кудряшов, Н. А. Квантовые вычисления и квантовые информационные технологии: современное состояние и перспективы. Информационные технологии и вычислительные системы, 1, 7-16. (2018).
2. Белоусов, А. В., & Гончаров, В. Ю. Квантовые компьютеры: принципы работы и перспективы применения. Вестник Российской академии наук, 86(2), 108-117. (2016).
3. Кириченко, О. В., & Костюк, П. В. Квантовые вычисления: от теории к практике. Современные технологии в технике и науке, 1, 80-84. (2019).
4. Романюк, В. М., & Дубовик, О. В. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления: состояние и перспективы. Радіоелектроніка, інформатика, управління, 2, 5-14. (2017).
5. Яковлев, С. В., & Панкратов, А. П. Квантовые приборы и их применение в современных технологиях. Физика и техника полупроводников, 52(2), 200-212. (2018).

УДК 698

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
**PERSPECTIVE DIRECTIONS IN THE FIELD OF ENERGY SAVING IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

Чибисова П.А.

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

P. Chibisova

Supervisor – Y. Saukova

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Рассмотрены основные положения и направления Республики Беларусь в области энергосбережения на основе анализа нормативных документов. Выполнен обзор энергосберегающих мероприятий для повышения энергоэффективности*

***Abstract:** In this article the main provisions and directions of the Republic of Belarus in the field of energy conservation are considered*

***Ключевые слова:** Энергосбережение, направление, энергоэффективность*

***Keywords:** Energy saving, direction, energy efficiency*

### **Введение**

Энергосбережение - один из приоритетов национального уровня, что подтверждается развитием экологических программ и внедрением новых технологий в сфере эффективного энергопотребления, это «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». Основополагающие документы в области энергосбережения:

1) закон Республики Беларусь «Об энергосбережении» (от 24.05.2021 №111-3), устанавливающий целевые показатели энергосбережения, показатели по использованию местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых источников энергии, а также другие показатели в сфере энергосбережения в соответствии с законодательством об энергосбережении и определяет порядок их доведения, утверждает государственные программы в сфере энергосбережения и принимает меры по их реализации.

2) закон Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии» (от 27 декабря 2010 г. № 204-3); регулирующий отношения, связанные с

использованием возобновляемых источников энергии для производства электрической энергии, ее дальнейшим потреблением и иным использованием, а также с производством установок по использованию возобновляемых источников энергии. Возобновляемые источники энергии – энергия солнца, ветра, тепла земли, естественного движения водных потоков, древесного топлива, иных видов биомассы, биогаза.

3) Директива Президента Республики Беларусь от 14.06.2007 № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства» (с учетом изменений, внесенных Указом от 14.01.2016 №26), В этом документе одним из направлений является обеспечение повышения уровня энергетической безопасности страны.

4) Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы (в редакции Постановления СМ РБ от 09.02.2023 №116), разработанная с целью обеспечения сдерживания роста валового потребления топливно-энергетических ресурсов (далее–ТЭР) Республики Беларусь, а также максимально возможного вовлечения в топливный баланс страны собственных ТЭР, включая возобновляемые источники энергии.

Показателям Целей устойчивого развития (далее – ЦУР), а именно ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех». 17 Целей устойчивого развития (ЦУР) и 169 подчиненных им задач, которые необходимо достичь к 2030 году. Прогресс в достижении ЦУР будет контролироваться и отслеживаться при помощи набора глобальных показателей (индикаторов).

### **Мероприятия в области энергосбережения**

Мероприятия, реализуемые на национальном уровне в сфере энергосбережения, нацелены на экономию топливно-энергетических ресурсов, сокращение импортируемых ТЭР, развитие альтернативной энергетики и др.

1. Пропаганда рационального использования ТЭР с помощью организации и проведения республиканских конкурсов в области энергосбережения, в том числе республиканского конкурса школьных проектов по экономии и бережливости «Энергомарафон», издания ежемесячного специализированного научно-практического журнала «Энергоэффективность».

2. Повышение эффективности теплоснабжения, с ликвидацией неэффективных теплоисточников, незагруженных паро- и теплотрасс, возможного внедрения современных автоматизированных электрических источников тепловой энергии, в том числе тепловых насосов, для нужд отопления и горячего водоснабжения.

3. Модернизация систем освещения мест общего пользования жилых домов с внедрением энергоэффективных, осветительных устройств, в том числе светодиодных, и автоматических систем управления освещением.

4. Ввод в эксплуатацию только энергоэффективного котельного оборудования, работающего на природном газе.

5. Развитие сегмента электромобилей, гибридных автомобилей и зарядной сети, электрификация городского пассажирского транспорта в целях замещения использования углеводородного топлива.

б. Дальнейшая электрификация участков железной дороги и т.д.

В ноябре 2017 года был разработан Национальный план действий по энергоэффективности до 2030 года. Основные мероприятия, прописанные в документе: «термореновация зданий в жилом секторе, модернизация уличного освещения, энергетическое использование твердых коммунальных отходов совершенствования систем энергоменеджмента, модернизация зданий органов государственного управления, реализация планов обеспечения устойчивой мобильности в городах, «Экологичное вождение» для профессиональных водителей и др.».

### **Перспективные направления в области энергосбережения**

1. Одним из перспективных направлений в области энергосбережения в Беларуси является повышение энергоэффективности в промышленности. Для этого необходимо разработать и внедрить современные технологии производства, снижающие расход электроэнергии и топлива. Также важным аспектом является обучение персонала промышленных предприятий методам энергосбережения.

2. Внедрение возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, является еще одним перспективным направлением в области энергосбережения в Беларуси. В частности, строительство солнечных ферм и ветрогенераторов может существенно снизить зависимость страны от импорта энергоресурсов и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

В настоящее время были проведены исследования, которые показали потенциал Республики Беларусь для производства ветровой энергии на побережье Балтийского моря, где скорость ветра достаточно высока.

В настоящий момент существуют несколько солнечных электростанций в Беларуси, которые производят энергию из солнечных батарей. Самая большая в Беларуси фотоэлектрическая станция (солнечная электростанция) мощностью 55 МВт находится недалеко от Речицы.

Солнечная и ветровая энергия в Республике Беларусь имеют потенциал для развития и становятся более популярными в свете растущей экологической осознанности в мире.

3. Еще одним перспективным направлением в области энергосбережения в Беларуси является развитие умного города.

Основными элементами системы умного дома являются датчики, контроллеры, управляющие приложения. Системы могут быть открытыми или закрытыми, то есть могут работать только с оборудованием от производителя или быть универсальными и поддерживать оборудование различных производителей.

Установка умного дома может проводиться на различных уровнях – от индивидуального жилья до больших коммерческих объектов. Наиболее популярными функциями, которые могут быть реализованы в умном доме, являются управление освещением, климатическими системами, безопасностью, энергоэффективностью и мультимедиа.

За счет управления различными системами удаленно через мобильные приложения, умный дом может значительно снизить расходы на электроэнергию, повысить уровень комфорта жизни и обеспечить безопасность.

### **Заключение**

Таким образом, в области энергосбережения в Беларуси есть ряд перспективных направлений, которые позволят снизить расход энергоресурсов и сократить вредное воздействие на окружающую среду. Рекомендуется продолжать работу над внедрением современных технологий, развитием возобновляемых источников энергии и созданием умных городов.

В целом, наше государство представляет собой пример успешной реализации программ по энергосбережению, которые не только помогают уменьшить нагрузку на окружающую среду, но и эффективно сокращают расходы на энергопотребление.

### **Литература**

1. Концепция "Умного города" на белорусской платформе // elibrary.ru: сайт. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27478066> Дата доступа: 16.04.2023.
2. Самая большая в Беларуси солнечная электростанция открыта возле Речицы // БелТА URL: <https://www.belta.by/regions/view/samaja-bolshaja-v-belarusi-solnechnaja-elektrostantsija-otkryta-vozle-rechitsy-271281-2017/> Дата доступа: 16.04.2023.
3. В Беларуси разработан Национальный план действий по энергоэффективности до 2030 года // Департамент по энергоэффективности URL: [https://energoeffect.gov.by/news/news\\_2020/20200827\\_news1](https://energoeffect.gov.by/news/news_2020/20200827_news1) Дата доступа: 16.04.2023.
4. О достижении Целей устойчивого развития в Республике Беларусь // minenergo.gov.by URL: <https://www.minenergo.gov.by/press/novosti/odostizhenii-tseley-ustoychivogo-razvitiya-v-respublike-belarus/> Дата доступа: 16.04.2023.
5. Использование возобновляемых источников энергии как фактор энергетической безопасности Республики Беларусь // cyberleninka.ru URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-kak-faktor-energeticheskoy-bezopasnosti-respubliki-belarus/viewer>
6. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ // rep.bntu.by URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/122070/12-15.pdf?sequence=1>

УДК 504.564

**ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРО-  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ**  
**INDICATORS OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRICAL PROD-  
UCTS**

Тибеж Я. В., Эльяшевич А. П.

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

Students – Y. Tsibezh, A. Elyashevich  
Supervisor – Y. Saukova

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** Стратегия энергоэффективности стимулирует пристальное внимание к энергетической потребляемой продукции, что регулируется в процессе испытаний при оценке соответствия.

**Abstract:** The energy efficiency strategy encourages close attention to the energy consumption of products, which is regulated during the testing process in conformity assessment.

**Ключевые слова:** Энергетическая эффективность, Энергосбережение, Электротехническая продукция, Класс энергоэффективности, Показатель энергоэффективности.

**Key words:** Energy efficiency, Energy saving, Electrical products, Energy efficiency class, Energy efficiency rating.

**Введение:**

Сегодня на рынках представлено огромное количество бытовой техники: различных брендов и разной ценовой категории, а также стран производителей. Определить преимущества того или иного энергопотребляющего устройства, а также степень его экономичности позволяет оценка энергетической эффективности. Для проведения оценки соответствия в Беларуси, а также ограничения допуска на рынок неэнергоэффективной продукции, действует постановление Совета Министров Республики Беларусь от 21 октября 2016 г. № 849 «О некоторых вопросах подтверждения соответствия в Национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь» (в ред. постановления Совмина от 27.01.2017 № 77) с внесенными изменениями и дополнениями.

**Основная часть:**

Согласно ГОСТ Р 51541-99, «Энергоэффективность – характеристика, отражающая отношение полезного эффекта от использования топливно-энергетических ресурсов к затратам топливно-энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.»

Класс энергетической эффективности – отдельная характеристика разного рода продукции и технологических процессов, базирующаяся на энергоэффективности.

Показатели энергетической эффективности – широкое определение, которое может подразумевать абсолютную, относительную, а также удельную величину, характеризующую расход или потери электроэнергии. Применяется для различной продукции, процессов или приборов.

Показатели энергоэффективности разделены на 3 группы: показатели эффективности продукции, показатели эффективности процессов и удельные показатели

Энергосбережение - это использование энергии с максимальной эффективностью и минимальными потерями. Это может быть достигнуто путем использования энергоэффективных технологий и устройств, а также путем сокращения потребления энергии в быту и на производстве. Например, можно использовать светодиодные лампы вместо обычных лампочек, установить двойные стекла на окнах или использовать теплоизоляционные материалы для уменьшения потерь тепла в зданиях.

ГОСТ 31532-2012 “Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения” определяет показатели энергосбережения, характеризующие деятельность юридических и физических лиц по реализации мер по повышению энергетической эффективности.

Может применяться множество показателей энергетической эффективности, они могут оценить расходы электроэнергии и ресурсов для разных секторов инженерии и экономики. Самые распространенные из них рассчитываются следующим образом:

1) Коэффициент полезного действия:

$$\mu = \frac{A_{\text{полезная}}}{Q_1},$$

где  $Q_1$  – затраты на выполнение работы.

2) Коэффициент использования электроэнергии:

$$\mu = \frac{A_{\text{полезная}}}{Q_2},$$

где  $Q_2$  – затраты электроэнергии для выполнения работы.

3) Коэффициент использования топлива:

$$\mu = \frac{A_{\text{полезная}}}{Q_3},$$

где  $Q_3$  – затраты на необходимое для совершения работы топливо.

4) Коэффициент использования тепла:

$$\mu = \frac{A_{\text{полезная}}}{Q_4},$$

где  $Q_4$  – расходы на тепловую энергию для выполнения работы.

Необходимость использования показателей энергетической эффективности в первую очередь обусловлена современными требованиями для стабильного развития экономики. Эти требования подразумевают повышение энергетической эффективности не только приборов, но и энергетики, предприятий, а также зданий. Проекты, которые реализуют правительства разных стран для по-

вышения производительности электростанций, заводов, действительно оказывают положительно влияние на экономику, с понижением затрат на энергию повышает прибыль, и как следствие, конкурентоспособность предприятий. Таким образом, повышение энергоэффективности реализуется и в других сферах.

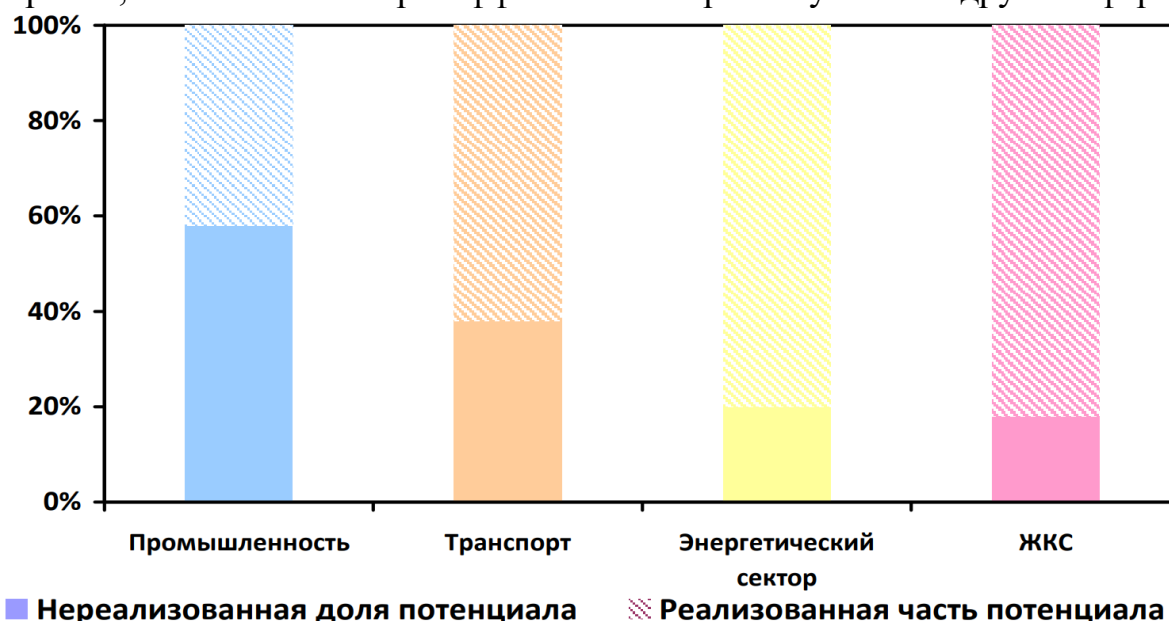


Рисунок 1 - Прогнозируемые пропорции реализации потенциала энергосбережения по основным отраслям мировой экономики в течение 2012-2035 годов

Указанные выше коэффициенты используют для характеристики электротехнической продукции, бытовых приборов и техники. Для большинства этих устройств данные показатели энергетической эффективности являются одной из главных характеристик. Во многих странах для электротехнической продукции в обязательном порядке вводится маркировка класса энергоэффективности. В Беларуси для информирования покупателей представлены информирующие этикетки, на которых указан класса энергетической эффективности. Требование по их применению охватывает 18 категорий товаров, потребляющих электроэнергию.

Показатели энергетической эффективности определяются в аккредитованных лабораториях в соответствии с ГОСТ Р 51749-2001. Эти показатели выявляют на основе данных, полученных с помощью специальных процессов оценки.

Самые распространенный – это энергоаудит здания. Энергоаудит представляет собой процесс оценивания энергетической эффективности какого-либо здания. Энергоаудит подразумевает не только анализ потребления энергоресурсов, но и поиск способов по повышению энергоэффективности.

На территории Республики Беларусь создано множество подобных лабораторий для характеристики энергетической эффективности. В частности, они относятся к Институту энергетики НАН Беларуси. Лаборатория «Энергоэффективность», являющаяся одной из них, ставит своей целью разработку нового высокоэффективного оборудования для промышленности и исследование процессов теплопереноса в различных средах.



Для определения энергетической эффективности используют в том числе экспериментальные методы. Как вариант, они могут основываться на измерении энергии в конечных точках элементов оборудования. В пример ставится «Метод конечных отношений», разработанный относительно недавно. Специфика метода позволяет использовать его для различных электротехнических приборов.

**Заключение:**

Повышение энергетической эффективности становится новой научной задачей, и, как следствие, создаются новые системы для уменьшения потерь энергии. Характеристика энергетической эффективности стала актуальна не только для создания подобных систем, но и для конечных потребителей.

**Литература**

1. Государственная программа «Энергоснабжение» на 2021-2025 годы. Режим доступа: [https://energoeffect.gov.by/programs/20210302\\_program/program-2021-2025-687-2](https://energoeffect.gov.by/programs/20210302_program/program-2021-2025-687-2)
2. Госстандарт Республики Беларусь. Режим доступа: <https://gosstandart.gov.by/>
3. Национальный план действий по энергоэффективности до 2030 г. Режим доступа: <https://gosstandart.gov.by/national-plan-of-action-on-energy>

УДК 620.92

## ОБЗОР РЫНКА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В БЕЛАРУСИ BELARUS RENEWABLE ENERGY MARKET SUMMARY

Н.С. Некало, А.О. Булавский  
Научный руководитель – С. В. Лозицкая, ассистент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
svetlana290598@gmail.com  
N. Nekalo, A. Bulavskiy  
Supervisor – S. Lozitskaya, assistant  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация:* обзор рынка возобновляемых источников энергии в Беларуси

*Abstract:* overview of the renewable energy market in Belarus

*Ключевые слова:* анализ рынка, тенденции рынка, энергия

*Keywords:* market analysis, market trends, energy

### Введение

Рассмотрим установившуюся мощность возобновляемых источников энергии в Беларуси на период 2014 – 2018 годов.

### Основная часть

Анализ рынка возобновляемых источников энергии в Беларуси. Ожидается, что белорусский рынок возобновляемых источников энергии будет иметь среднегодовой темп роста более 15% в течение прогнозируемого периода 2020-2025 годов. Такие факторы, как поставленные страной цели по сокращению углеродного следа и значительное снижение цен на установки возобновляемой энергии, вероятно, будут стимулировать белорусский рынок возобновляемой энергии. Однако ожидается, что длительный период возврата инвестиций будет сдерживать белорусский рынок возобновляемых источников энергии. Солнечная энергетика занимала значительную долю рынка в 2018 году, в секторе солнечной энергетике страны произошел резкий рост, а предстоящие солнечные проекты, вероятно, будут иметь значительный рост на рынке. Правительство Беларуси поставило цель к 2030 году получить 10% от общего объема производства электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии, таким образом, сократив выбросы парниковых газов на 25-30% по сравнению с 1990 годом.

Энергетический рынок в будущем. Увеличение установленной мощности возобновляемых источников энергии и предстоящие проекты в стране, такие как установка 500 мегаватт (МВт), ветровой энергии к 2030 году, вероятно, будут стимулировать белорусский рынок возобновляемых источников энергии в течение прогнозируемого периода.

Тенденции рынка возобновляемой энергетике Беларуси. В этом разделе рассматриваются основные рыночные тенденции, формирующие белорусский

рынок возобновляемых источников энергии, по мнению наших экспертов-исследователей: Солнечная энергия будет доминировать на рынке. В 2018 году из общей установленной мощности возобновляемых источников около 33,7% установок в стране приходилось на солнечную энергию. Установленная мощность солнечной энергетики в 2018 году составила 154,3 мегаватт (МВт), что выше, чем в 2017 году, 152,6 мегаватт (МВт), что можно наблюдать на рисунке 1. В 2018 году правительство Беларуси планировало к 2020 году установить в стране новые солнечные электростанции мощностью 250 мегаватт (МВт). Правительство Беларуси также начало использовать свою землю, пострадавшую в результате Чернобыльской аварии, в качестве места для установки солнечной электростанция. Правительство Беларуси постоянно прилагает усилия в пользу внедрения возобновляемых источников энергии. Например, в 2019 году Беларусь завершила установку в стране солнечной электростанции мощностью 109 мегаватт (МВт). Белорусская строительная компания ЗАО «Белзарубежстрой» получила подряд на строительство солнечной фотоэлектрической станции в Чериковском районе Могилевской области. Таким образом, с учетом вышеперечисленных факторов можно констатировать, что солнечная энергетика, вероятно, будет иметь значительный рост на белорусском рынке возобновляемых источников энергии в течение прогнозируемого периода.

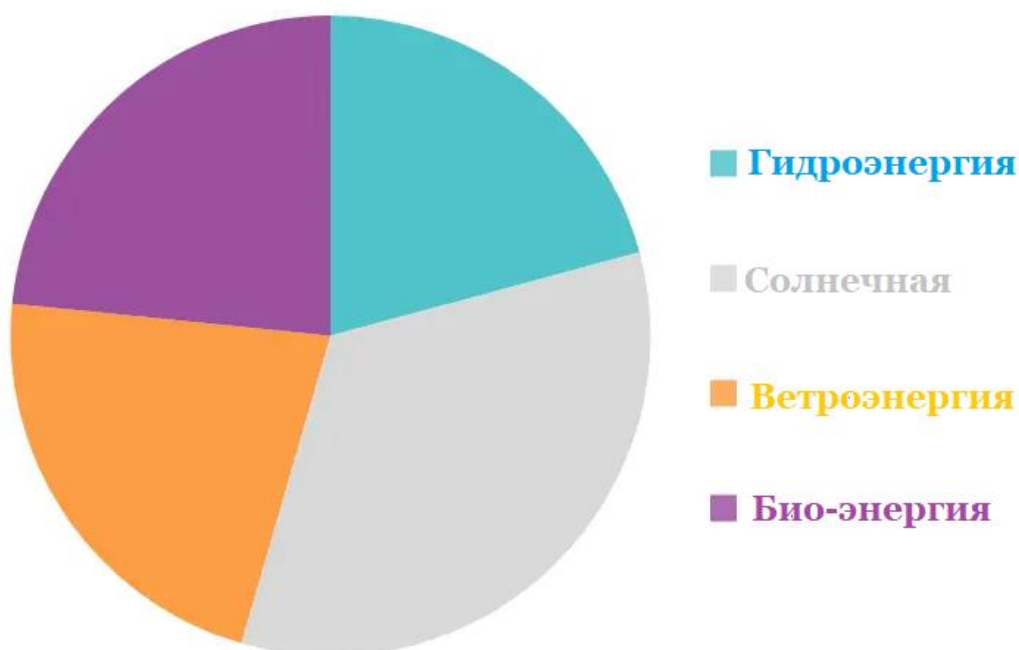


Рисунок 1 – Доля установленной мощности возобновляемых источников энергии, в%, по источникам, Беларусь, 2018 г.

Ожидается, что увеличение количества установок возобновляемой энергии будет стимулировать рынок. В 2018 году общая установленная мощность электростанций возобновляемой энергетики в стране составила 457,3 мегаватт (МВт), что выше установленной мощности 2017 года, равной 431,2 мегаватт (МВт). Возобновляемые источники энергии в стране включают гидро-, солнечную, ветровую и биоэнергию. В 2019 году правительство Беларуси объявило о

разработке крупнейшего в стране ветроэнергетического проекта установленной мощностью 25 мегаватт (МВт) вблизи села Велешковичи (Лиозненский район Витебской области). Это ясно показывает, что белорусский рынок возобновляемых источников энергии привлекает иностранные инвестиции, которые, вероятно, будут стимулировать рынок. В 2020 году Green Genius, компания по возобновляемым источникам энергии, входящая в Modus Group, успешно запустила новую биогазовую электростанцию в Беларуси. Установленная мощность станции составляет 1 мегаватт (МВт). Беларусь, благодаря большой площади лесного покрова, обладает значительным биоэнергетическим потенциалом в стране. Таким образом, вышеизложенное указывает на то, что увеличение мощности возобновляемых источников энергии, как ожидается, будет стимулировать белорусский рынок возобновляемых источников энергии в течение прогнозируемого периода.

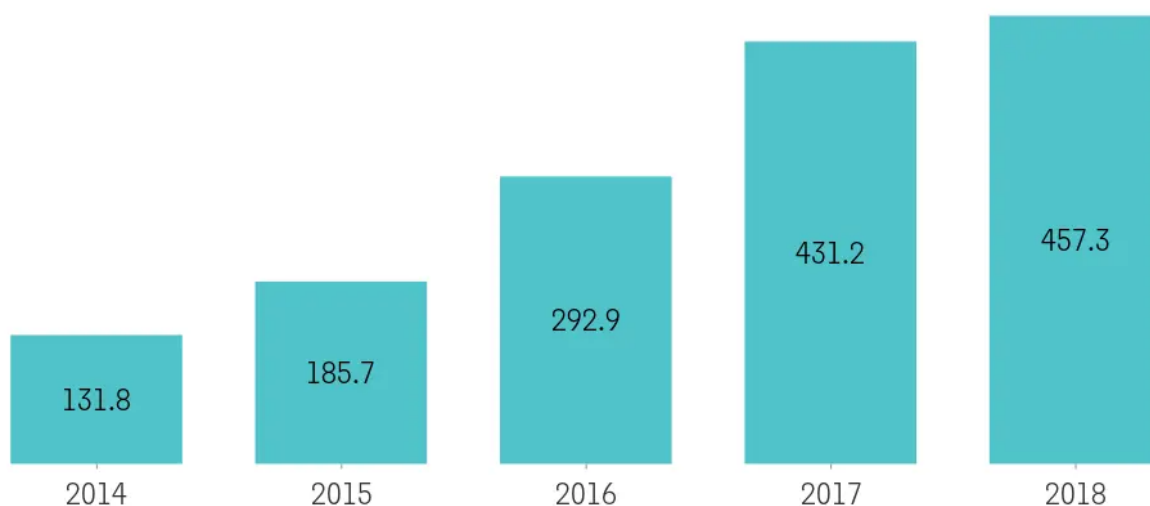


Рисунок 2 – Установленная мощность возобновляемых источников энергии, мегаватт (МВт), Беларусь, 2014-2018

### **Заключение**

Ожидается, что увеличение количества установок возобновляемой энергии будет стимулировать рынок.

### **Литература**

1. Рынок энергоресурсов: Катюха П.Б., Москва 2022
2. Энергетический бизнес: Гительман Л.Д., Ратников Б.Е., Москва 2006.

УДК 620.92

## СПОСОБЫ УРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ В ОЭС WAYS TO REGULATE ENERGY AND POWER IN THE IPS

Н.С. Некало, А.О. Булавский  
Научный руководитель – С. В. Лозицкая, ассистент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
svetlana290598@gmail.com  
N. Nekalo, A. Bulavskiy  
Supervisor – S. Lozitskaya, assistant  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация: задача и способы урегулирования энергии и мощности в ОЭС*

*Abstract: the task and ways of regulating energy and power in the IPS*

*Ключевые слова: коэффициента трансформации, особенность режимов работы магистральных сетей белорусской ОЭС, реактивную перетоки мощности*

*Keywords: transformation ratio, feature of the operation modes of the main networks of the Belarusian IPS, reactive power flows*

### **Введение**

Урегулирование энергии и мощности в ОЭС необходимо для обеспечения качества электроэнергии, а также поддержание стабильных потоков реактивной мощности на межгосударственных линиях.

### **Основная часть**

Задача регулирования напряжения в энергосистеме и промышленных предприятиях заключается в обеспечении качества электроэнергии, соответствующего установленным нормам, экономичная совместная работа электрических сетей энергосистемы и энергопринимающих устройств и сопутствующие механизмы, обеспечивающие необходимый запас устойчивости энергосистем, соответствие уровня напряжения допустимым значениям для оборудования электростанции и сети, а также поддержание стабильных потоков реактивной мощности на межгосударственных линиях. Одним решением этой проблемы является:

- поддержание оптимального распределения потоков реактивной мощности в сетях, обеспечение минимальных потерь активной и реактивной мощности.
- поддержание необходимого баланса ОЭС по реактивной мощности.

Дежурные диспетчеры РУП «ОДУ», КДЦ, ОДС и оперативный персонал электростанции и подстанции требуют постоянного контроля, чтобы поддерживать заданные графики работы генераторов реактивной мощности и синхронных компенсаторы. Отклонения напряжения и реактивной мощности от заданных значений на графике не должен превышать 1%.

Суть регулирования напряжения воздействием на реактивную перетоки мощности по элементам электрической сети заключается в том, что при изменяется реактивная мощность, меняются потери напряжения в реакентах.

Регулирование напряжения осуществляется:

- регулирование реактивной нагрузки генераторов и синхронных компенсаторов;
- изменение коэффициента трансформации трансформатора под нагрузкой, автотрансформаторы и трансформаторы перенапряжения всех типов;
- перевод части генераторов и СУ в режим недовозбуждения на часы минимальные нагрузки;
- изменение количества включенных шунтирующих реакторов на ВЛ 750 кВ;
- изменение количества статических конденсаторов, включенных у потребителей и в сеть ОПС Беларуси;
- отключение линий 330 кВ в резерв.

Регулируя напряжение в системе, диспетчер должен обеспечить уровень напряжения находится в пределах графика во всех контрольных точках системы. Если указанное условие не может быть выполнено по каким-либо причинам (например, праздники, послеаварийный режим) необходимо добиться меньшего количества баллов при отклонение напряжения от нормы, допускающее в отдельных точках повышение (понижение) напряжения выше (ниже) нормы, но не допуская отклонений от установленных пределов в других точках.

Таким образом, мы можем обратиться к средствам регулирования реактивной энергии и мощности:

- РПН автотрансформаторов и трансформаторов перенапряжения;
- режим недовозбуждения генераторов и короткого замыкания;
- шунтирующие реакторы;
- статические конденсаторы;
- Отключение резервных линий.

Эта линия длиной 417 км имеет значительную емкостную проводимость, и, как следствие, большая зарядная мощность (~1000 Мвар). Ограничивать напряжение на концах ВЛ как в холостом режиме, так и в других режимах, на ВЛ-707 шунтирующие реакторы (ШР), подключаемые поперечно линии на подстанции.

Белорусская однореакторная группа - 330 МВА, а от Смоленской АЭС – две реакторные группы по 330 МВА каждая. Кроме этих реакторных групп на ВЛ-707 на ПС.

На Белорусской установлен второй ШР мощностью 330 МВА.

Характерная особенность режимов работы магистральных сетей белорусской ОЭС на регулирование потоков напряжения и реактивной мощности велико протяженность ВЛ 750-330 кВ и, соответственно, большие зарядные мощности и их небольшая нагрузка в непиковые часы и выходные дни, что создает большие трудности с компенсацией избыточной реактивной мощности и регулированием напряжения.

В связи с тем, что в часы минимальных нагрузок и особенно летом, по воскресеньям и в праздничные дни, возникают большие трудности с обеспечением необходимого уровня напряжения и компенсации избыточной реактивной мощности диспетчера РУП «ОДУ». Соответствующий оперативный персонал должен обеспечить своевременный переход возражает против графика выходного напряжения или ночного минимума, так как задержки приводят к затруднениям, а иногда и к невозможности снижения уровня напряжения, если генераторы крупных электростанций и к этому времени они будут полностью использованы по режиму потребления реактивной мощности.

### **Заключение**

Сложности с компенсацией реактивной мощности и регулировкой тактового напряжения минимальные нагрузки и выходные - актуальная проблема, т.к. состоит из ВЛ 750-330 кВ большой протяженности, соответственно эти линии генерируют большую зарядную емкость.

### **Литература**

1. Основы современной энергетики: учебник для вузов : в 2 т. / редкол.: Р.В. Аметистова (гл ред) [и др.]. — Москва: Издательский дом МЭИ, 200 - 2008. — 2т.
2. Шеметов, А.Н. Надёжность электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности 140221 «Электроснабжение». — Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006.

УДК 621.3

## ДАТЧИКИ ХОЛЛА HALL SENSOR

В. О. Воронова, В. А. Гриневич, С. А. Крейдич  
 Научный руководитель - В.В. Зеленко, старший преподаватель  
 Белорусский национальный технический университет,  
 г. Минск, Республика Беларусь  
 zelenko@bntu.by  
 V. Voronova, V. Hrynevich, S. Kreidzich  
 Supervisor – V. Zelenko, Senior lecturer  
 Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** В статье описывается общее представление об эффекте Холла и о том, как Allegro MicroSystems разрабатывает и внедряет технологию Холла в полупроводниковые монокристаллические интегральные схемы.

**Abstract:** The article describes a general idea of the Hall effect and how Allegro MicroSystems develops and implements Hall technology in semiconductor monolithic integrated circuits.

**Ключевые слова:** датчик Холла, эффект Холла.

**Keywords:** Hall sensor, Hall effect.

### Введение

Эффект Холла назван в честь Эдвина Холла, который в 1879 году обнаружил, что на токопроводящей пластине возникает разность потенциалов, когда магнитное поле проходит через пластину в направлении, перпендикулярном плоскости пластины, как показано на рисунке 1.

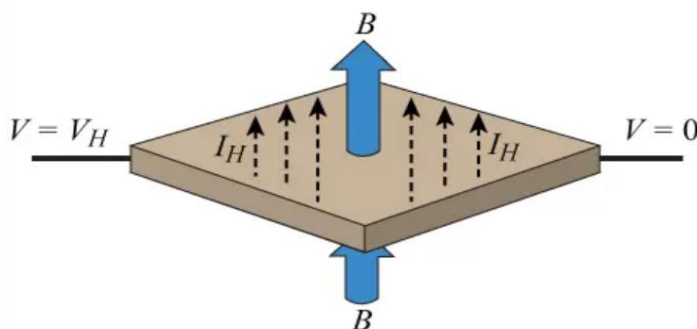


Рисунок 1 – Эффект Холла

Фундаментальным физическим принципом, лежащим в основе эффекта Холла, является сила Лоренца, которая проиллюстрирована на рисунке 2. Когда электрон движется в направлении  $v$ , перпендикулярном приложенному магнитному полю  $B$ , он испытывает силу  $F$ , силу Лоренца, которая нормальна как к приложенному полю, так и к протеканию тока.



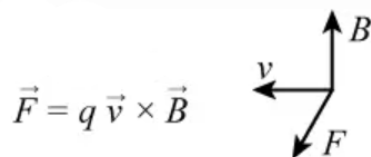


Рисунок 2 – Сила Лоренца

В ответ на эту силу электроны движутся по изогнутой траектории вдоль проводника, и на пластине возникает суммарный заряд и, следовательно, напряжение. Это напряжение Холла,  $V_H$ , подчиняется приведенной ниже формуле, которая показывает, что  $V_H$  пропорционально напряженности приложенного поля и что полярность  $V_H$  определяется направлением приложенного магнитного поля - северным или южным. Благодаря этому свойству эффект Холла используется в качестве магнитного датчика.

$$V_H = \frac{IB}{\rho_n q t},$$

где  $V_H$  - напряжение Холла на проводящей пластине,  
 $I$  - ток, проходящий через пластину,  
 $q$  - величина заряда носителей заряда,  
 $\rho_n$  - количество носителей заряда на единицу объема, а  
 $t$  - толщина пластины.

### Основная часть

Интегральные схемы Allegro semiconductor включают элемент Холла, поскольку эффект Холла применим как к проводящим, так и к полупроводниковым пластинам. Используя эффект Холла в полностью интегрированной монолитной микросхеме, можно измерять напряженность магнитного поля и создавать широкий спектр интегральных схем с эффектом Холла для самых различных применений.

Переключатель приводится в действие положительным магнитным полем, генерируемым южным полюсом. Положительное поле включает выходной транзистор и подключит выход к точке нулевого потенциала микросхемы, действуя как активное устройство низкого напряжения.

Поле, необходимое для активации устройства и включения выходного транзистора, называется магнитной рабочей точкой. Когда поле снимается, выходной транзистор выключается. Разница между магнитной рабочей точкой и точкой магнитного расцепления называется гистерезисом и используется для предотвращения скачков переключения из-за шума.

Allegro также производит магнитные защелки и линейные устройства. Магнитные защелки включаются с помощью южного полюса и выключаются с помощью северного полюса. Требование наличия северного полюса для отключения защелки отличает защелки от простых выключателей. Поскольку они не отключаются при удалении поля, они "фиксируют" вывод в текущем состоянии до тех пор, пока не будет применено противоположное поле. Защелки используются для считывания вращающихся магнитов для коммутации двигателя или определения скорости.

Линейные устройства имеют аналоговый выход и используются для определения линейного положения в линейных датчиках угла поворота, таких как автомобильные датчики положения педали газа. Они имеют номинальное выходное напряжение, равное  $V_{CC}/2$ , когда поле не приложено. При наличии южного полюса выходной сигнал будет перемещаться в направлении  $V_{CC}$ , а при наличии северного полюса выходной сигнал будет перемещаться в направлении точка нулевого потенциала микросхемы. Allegro предлагает различные переключатели Холла, защелки и линейные устройства, подходящие для широкого спектра применений. Например, микросхемы магнитных датчиков линейного и углового положения, микросхемы магнитных цифровых датчиков положения, микросхемы датчиков тока на основе эффекта Холла и микросхемы магнитных датчиков скорости.

### Использование эффекта Холла

Интегральные схемы (ИС) с эффектом Холла используют эффект путем объединения элемента Холла с другими схемами, такими как операционные усилители и компараторы, для создания переключателей с магнитной активацией и устройств аналогового вывода. Простой переключатель Холла, такой как открытый МОП-транзистор с каналом n-проводимости - устройство, показанное на рис. 3, может быть использован для определения наличия или отсутствия магнита и выдает цифровой выход.

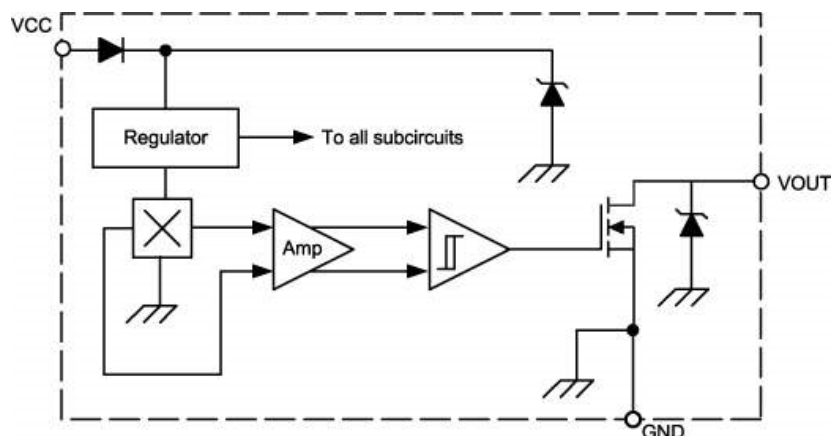


Рисунок 3 – Простой переключатель Холла

Интегральные схемы - это электронные структуры, имеющие большое количество элементов схемы с высокой плотностью, рассматриваемые как единое целое. Элементы схемы включают активные компоненты, такие как транзисторы и диоды, а также пассивные компоненты, такие как резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Эти компоненты соединены между собой металлом, обычно алюминием, для создания более сложных операционных усилителей и компараторов устройства. Переключатель Холла на рисунке 3 используется для простой иллюстрации, но эти компоненты используются во всех устройствах Allegro даже для самых сложных микросхем. Элемент Холла на рисунке 3 показан в виде квадратного прямоугольника с буквой "X". Его выходной сигнал усиливается, подается в компаратор, а затем на открытый цифровой выход МОП-транзистор. Allegro также производит микросхемы Холла с

двумя элементами Холла для измерения дифференциальных магнитных полей и даже с тремя элементами Холла для определения направления движущихся ферромагнитных целей (цепей). Какой бы сложной ни была топология датчика, все компоненты изготавливаются внутри и на поверхности тонкой подложки из полупроводникового материала.

### Структура ИС Холла

Устройства Allegro изготавливаются на кремниевых подложках путем легирования непосредственно в кремний различных материалов для создания областей носителей n-типа (электронных) или p-типа (электронно-дырочных). Эти области материала n-типа и p-типа формируются в геометрические формы, которые составляют активный и пассивный компоненты интегральной схемы, включая элемент Холла, и соединяются вместе путем нанесения металла поверх геометрических форм. Таким образом, активный и пассивный компоненты электрически соединены друг с другом. Поскольку требуемая геометрия очень мала, в диапазоне микрон, а иногда и меньше, плотность схемы чрезвычайно высока, что позволяет создавать сложные схемы на очень небольшой площади кремния.

Тот факт, что все активные и пассивные элементы выращены внутри подложки или нанесены на кремний, делает их неотделимыми от кремния и действительно идентифицирует их как монокристаллические интегральные схемы. На рисунке 4 показано, как элемент Холла интегрирован в ИС Allegro. Это просто область легированного кремния, которая создает пластину n-типа, которая будет проводить ток.

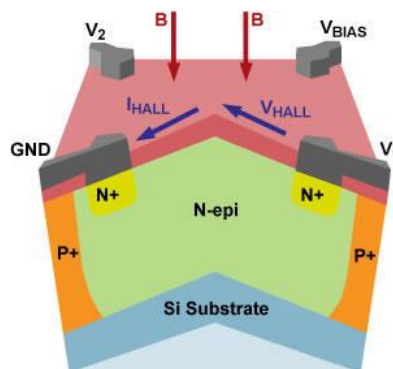


Рисунок 4 – Монолитная схема

### Сборка датчика Холла

После распиливания рядов и столбцов кремниевых пластин на отдельные матрицы, они затем упаковываются для индивидуальной продажи. Готовый макет, один из многих возможных стилей, показан на рисунке 5. Матрица видна внутри корпуса, установленная на медной подушечке матрицы. Контакт с медными выводами осуществляется посредством соединения золотой проволоки от металлических прокладок на поверхности матрицы к электрически изолированным выводам корпуса. Затем упаковка инкапсулируется или переформовывается пластиком для защиты матрицы от повреждений.

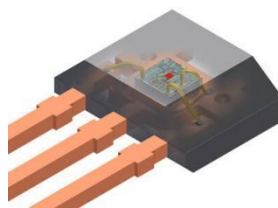


Рисунок 5 - Макет

### Заключение

Таким образом, можно сказать, что датчики Холла очень популярны при конструировании и сборке интегральных систем. Также можно отметить, что их цена и качество соответствует требованиям потребителей. Компания по разработке интегральных схем Allegro MicroSystems отлично справляется созданием улучшенных датчиков.

### Литература

1. Электронное учебное пособие по курсу физики «Электростатика. Электродинамика. Электромагнетизм. Электромагнитные колебания и волны» - Режим доступа: <https://moodle.kstu.ru/mod/book/view.php?id=31680&chapterid=7445>.  
- Дата доступа: 09.04.2023.
2. Датчики Холла [Электронный ресурс]/датчики Холла. - Режим доступа: <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/allegro-hall-effect-sensor>. - Дата доступа: 09.04.2023

УДК 621.311

## УМНАЯ СЕТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ SMART GRID

А. В. Ященко

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

г. Минск, Республика Беларусь

zelenko@bntu.by

A. Yashchenko

Supervisor – V. Zelenko, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** Умные сети электроснабжения: преимущества, технологии, проблемы.

**Abstract:** Smart power grids: advantages, technologies, problems.

**Ключевые слова:** Счетчики, Сенсоры, Системы управления, Системы хранения энергии, электроснабжение.

**Keywords:** Energy meters, Sensors, Control systems, Energy storage systems, Power supply.

### Введение

Тема умной сети электроснабжения крайне актуальна сегодня, когда многие страны сталкиваются с вызовами в области энергосбережения, устойчивости и безопасности электроснабжения. Умная сеть электроснабжения (Smart Grid) является одним из ключевых элементов ответа на эти вызовы.

### Основная часть

Умная сеть электроснабжения - это сеть электропитания, которая использует передовые технологии информатики и связи для оптимизации и управления распределением и потреблением энергии. Она объединяет традиционную систему электроснабжения с передовыми технологиями, такими как сенсоры, счетчики, системы управления и другие элементы IoT (Internet of Things).

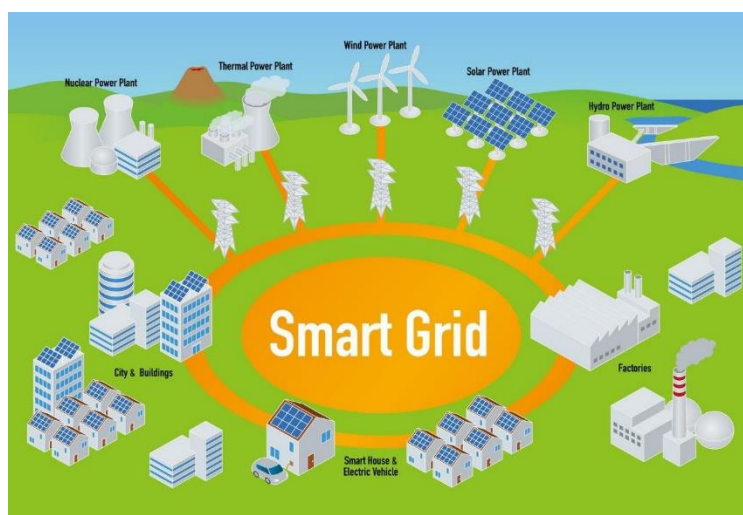


Рисунок 1 - Умная сеть электроснабжения

Основные преимущества умной сети электроснабжения включают:

**Увеличение эффективности использования энергии:** умная сеть электроснабжения позволяет более эффективно управлять потреблением и распределением энергии, что ведет к снижению расходов на энергопотребление. **Увеличение устойчивости и надежности электроснабжения:** умная сеть электроснабжения позволяет более точно управлять распределением и потреблением энергии, что позволяет снизить риск возникновения аварий и сбоев в работе системы.

**Увеличение безопасности электроснабжения:** умная сеть электроснабжения использует передовые системы мониторинга и управления, которые позволяют быстро обнаруживать и устранять возможные проблемы.

Технологии, используемые в умной сети электроснабжения.

Умная сеть электроснабжения использует широкий спектр технологий, включая счетчики энергопотребления, изображенные на Рисунке 2



Рисунок 2 - Счетчики энергопотребления

Эти устройства устанавливаются на домах и офисах, чтобы позволить пользователям отслеживать свое потребление энергии и оптимизировать его в соответствии с их потребностями. Счетчики могут быть связаны с центральной системой управления, которая позволяет управлять потреблением энергии на уровне отдельных домов или районов.

**Сенсоры:** сенсоры используются для мониторинга состояния сети и обнаружения возможных проблем. Они могут быть установлены на линиях передачи электроэнергии, трансформаторах и других ключевых узлах сети.

**Системы управления:** системы управления позволяют оптимизировать работу сети, управлять распределением энергии и предотвращать возникновение аварий и сбоев. Они могут быть интегрированы с другими системами управления, такими как системы управления трафиком или системы управления зданиями, чтобы оптимизировать использование энергии в большом масштабе.

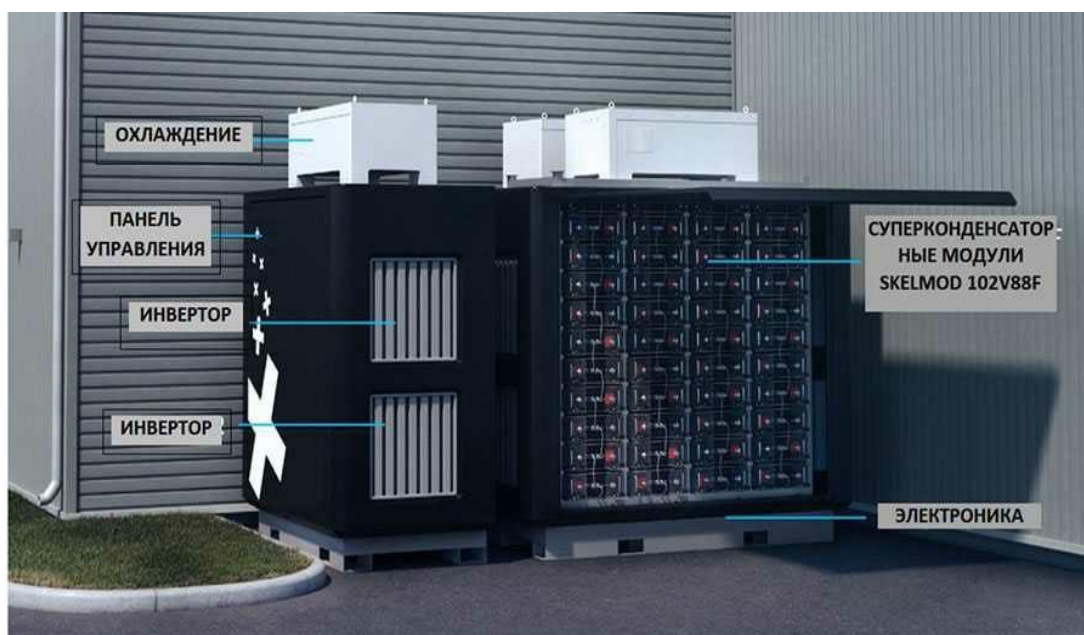


Рисунок 3 - Системы хранения энергии

Системы хранения энергии, такие как аккумуляторы или системы хранения водорода, могут быть использованы для хранения избыточной энергии, производимой в периоды пиковой нагрузки, и использоваться в периоды пониженной нагрузки.

Примеры реализации умной сети электроснабжения можно найти по всему миру. Одним из наиболее успешных примеров является проект «Future Energy Savvy Home», запущенный в Великобритании. Проект включает установку счетчиков энергопотребления, сенсоров и системы управления в домах, чтобы оптимизировать потребление энергии и снизить расходы на электроэнергию.

Другой пример - проект «Smart Grid City», запущенный в Боулдере, штат Колорадо в США. В рамках проекта были установлены смарт-счетчики и системы управления, а также запущен ряд исследований для определения наиболее эффективных технологий и методов управления электросетью.

### Заключение

Умная сеть электроснабжения является ключевым элементом ответа на вызовы, связанные с энергоэффективностью и устойчивостью энергетических систем. Она позволяет оптимизировать расход электроэнергии, управлять потреблением и распределением энергии, повысить надежность и безопасность энергосистемы, а также увеличить использование возобновляемых источников энергии.

Несмотря на то, что умные сети электроснабжения все еще находятся в стадии развития, уже сегодня можно наблюдать успехи в их реализации по всему миру. Можно отметить, что умные сети электроснабжения - это важный шаг в развитии современных энергетических систем. Они позволяют решить многие проблемы, связанные с недостатком энергии, потреблением, а также позволяют более эффективно использовать возобновляемые источники энергии. Однако, для их эффективного развития, необходимо продолжать инвестировать в разви-

тие новых технологий, стандартов и законодательства, а также проводить исследования и эксперименты для выявления лучших практик и оптимальных методов управления сетью.

### Литература

1. Умные сети электроснабжения.  
-Режим доступа: <http://ingsvd.ru/main/smarthome/1190-umnye-seti-elektrosnabzheniya.html>. – Дата доступа: 27.04.2023.
2. Международная электротехническая комиссия. (2018). IEC 62559:2018 - Варианты использования для IEC 61850. -Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/72315.html>.
3. Умные сети. -Режим доступа: [https://ec.europa.eu/energy/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters/smart-grids\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters/smart-grids_en).
4. Путь интеллектуальной сети. IEEE Power and Energy Magazine, 8(1), 18-28. -Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876>.



УДК 621.311

**АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
ELECTRIC ENERGY STORAGE**

П.И. РЫМКО

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

jte@tut.by

P. Rymko

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** *какие способы сохранения энергии есть. Сможет ли песчаная батарея хранить избыточную энергию солнца и ветра. Перспективы песчаной батареи. Как и каким методом Республика Беларусь решает вопрос с аккумулярованием энергии необходимым для обеспечения постоянной работы АЭС в базовом режиме. Все эти вопросы рассматриваются в данной статье.*

**Ключевые слова:** *Аккумулярование, компания Vatajankoski, песчаная батарея, АЭС, электростанция PARAT Halvorsen AS*

**Abstract:** *What ways to conserve energy are there. Will the sandy battery be able to store excess energy from the sun and wind. Sand battery prospects. How and by what method the Republic of Belarus solves the issue of energy accumulation necessary to ensure the constant operation of the NPP in the basic mode. All of these issues are covered in this article.*

**Keywords:** *Accumulation, company Vatajankoski, sand battery, NPP, electric boiler PARAT Halvorsen AS*

**Введение**

Будущее энергетики всегда связывали с потребностью эффективно накапливать мощности и использовать их по мере необходимости. Человечество постоянно ищет способы сохранения энергии. Среди них: литий-ионные аккумуляторы, газовые хранилища, гидроаккумулирующие электростанции и гравитационные системы хранения энергии. У всех вариантов есть свои преимущества и недостатки, поэтому ученые не перестают искать новые технологии и способы. Например, хранить энергию, буквально, в песке. Как первая в мире коммерческая песчаная батарея, установленная в Финляндии может изменить правила игры в хранении зеленой энергии?

**Основная часть**

«Песчаная батарея» – это высокотемпературный накопитель тепловой энергии, в котором в качестве среды хранения используется песок или подобные ему материалы (рисунок 1). Он хранит энергию в песке в виде тепла. Его основное предназначение – работать в качестве мощного и вместительного резервуара для избыточной энергии ветра и солнца. Энергия хранится в виде тепла, которое можно использовать для обогрева домов или для обеспечения горя-

чего пара и высокотемпературного технологического тепла для отраслей промышленности, которые часто зависят от ископаемого топлива.



Рисунок 1 – Песчаная батарея

По мере того, как мир переходит к все более и более высокой доле возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии, прерывистый характер этих источников энергии создает проблемы для энергетических сетей. Песчаная батарея помогает амбициозно увеличить производство возобновляемых источников энергии, гарантируя, что всегда есть способ извлечь выгоду из чистой энергии, даже если излишки огромны.

Первая в мире коммерческая песчаная батарея находится в городе Канканпяя, Западная Финляндия. Она подключена к сети централизованного теплоснабжения и обогревает жилые и коммерческие здания, такие как частные дома и муниципальный бассейн. Сеть централизованного теплоснабжения находится в ведении энергетической компании Vatajankoski [1].

Инновационное решение позволяет использовать солнечную или ветровую энергию до 100 % от потребности в отоплении и электричестве. В основе решения лежит запатентованный высокотемпературный крупномасштабный накопитель тепла. Используют очень горячий песок в качестве носителя, преобразовывают электричество в тепло и сохраняют его для последующего использования. Используют песок в качестве среды хранения, что обеспечивает безопасную эксплуатацию и естественный баланс в цикле хранения. Кроме того, песок является дешевым и распространенным материалом, который можно нагревать до 1000 °C и даже выше.

Многие твердые материалы, такие как песок, можно нагревать до температур, намного превышающих точку кипения воды. Аккумуляторы тепла на основе песка могут хранить в несколько раз больше энергии, чем в резервуаре с водой аналогичного размера; это благодаря большому диапазону температур, допускаемому песком. Таким образом, он экономит место и позволяет универсально использовать его во многих промышленных приложениях. Какой песок

использует компания? Аккумуляция тепла не очень чувствительна к размеру песчинок. Компания Vatajankoski предпочитает недорогие материалы высокой плотности, которые не являются дефицитными. Компания предпочитает использовать материалы и размеры зерна, которые не подходят для строительной отрасли.

Внутри песка стоит своя запатентованная система теплопередачи, которая обеспечивает эффективную передачу энергии в хранилище и обратно. Надлежащая изоляция между хранилищем и окружающей средой обеспечивает длительный срок хранения, до нескольких месяцев, с минимальными потерями тепла. Объем хранилищ варьируется от десятков до тысяч кубометров. Хранилище можно разместить под землей, оставив при этом минимальное пространство на часто высоко ценимых квадратных метрах на строительных площадках.

Чистая энергия с минимальными выбросами. Выбросы CO<sub>2</sub> от теплоаккумулятора представляют собой встроенные выбросы от строительных материалов на этапе строительства. Поскольку эти встроенные выбросы теплоаккумулятора PHE незначительны, выбросы произведенного тепла в основном связаны с источником электроэнергии. Можно сказать, что тепло, взятое из нашего хранилища, такое же чистое, как и электроэнергия, подаваемая в хранилище.

Аккумуляция тепла всегда является частью энергосистемы, будь то тепловая сеть отдельного здания, крупная сеть централизованного теплоснабжения или автономная система электроснабжения и отопления завода или даже острова. В настоящее время компании реализовано два продукта. На данный момент они могут предложить систему накопления тепла мощностью 2 МВт тепловой мощностью 300 МВтч или мощностью 19 МВт тепловой мощностью 1000 МВтч. Система накопления тепла масштабируется для различных целей, и в будущем компания планирует расширить ассортимент продукции.

Хранилища разработаны на основе моделирования с использованием программного обеспечения COM50E. Разрабатывают системы с использованием трехмерных моделей нестационарного теплопереноса и реальных входных и выходных данных.

Компания спроектировала и построила свой первый коммерческий аккумулятор тепла на основе песка для Ватаянкоски, энергетической компании, расположенной в Западной Финляндии. Он будет обеспечивать теплом сеть централизованного теплоснабжения Ватаянкоски в Канкаанпяя, Финляндия. Тепловая мощность хранилища составляет 100 кВт, а мощность - 8 МВтч. Полномасштабное использование хранилища началось 20 января 2023 года.

У компании уже есть опытный образец мощностью 3 МВтч в районе Хиеданранте, Тампере. Он подключен к местной сети централизованного теплоснабжения и обеспечивает теплом несколько зданий. Экспериментальный проект позволяет проводить тестирование, проверку и оптимизацию решения по аккумуляции тепла. В экспериментальном проекте энергия частично поступает от массива солнечных панелей площадью 100 квадратных метров, а частично – из электрической сети.

Vatajankoski обслуживает широкий спектр различных предприятий и отраслей. Например, энергетические компании, операторы жилых и коммерче-

ских зданий, продукты питания и напитки, текстиль и одежда, химия и фармацевтика, производство металлов, целлюлозно-бумажная промышленность и другие отрасли.

Цифры хранилища: температура до 600-1000 градусов цельсия, номинальная мощность до 100 МВт, мощность до 20ГВтч, эффективность до 95%, цикл хранения энергии от часов до месяцев, срок службы 10 лет, Инвестиционные затраты <10 евро/кВтч емкости хранения, отсутствия ядовитых или опасных материалов, минимальные выбросы, эксплуатационные расходы минимальные, без расходных материалов, полностью автоматизированы [2].

В настоящее время во многих развитых странах все чаще просматривается тенденция, направленная на увеличение доли возобновляемой энергии в энергетическом балансе, что в первую очередь связано с решением полного отказа от использования угля в энергетических целях (Дания, Германия). Большинство возобновляемых энергоисточников (в первую очередь ветро- и солнечные установки) не способны обеспечивать базовую нагрузку энергопотребления из-за специфики выработки электроэнергии (ЭЭ), что делает крайне актуальным поиск различных технических решений по созданию систем аккумулирования энергии. Со схожей проблемой также сталкиваются страны с высокой долей атомной энергии в энергетическом балансе, для которых системы аккумулирования энергии необходимы для обеспечения постоянной работы АЭС в базовом режиме. Именно такую задачу необходимо будут решать в Республике Беларусь, в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС.

Существует несколько принципиально различных направлений в технологиях хранения электроэнергии (маховичные накопители, аккумуляторные батареи, газозвудушные аккумулирующие станции, гидроаккумулирующие электростанции, водородные системы, и т.д.), каждое из которых находится на различном этапе развития и промышленной адаптации.

Одним из популярных направлений является применение технологий по использованию электроэнергии для покрытия тепловых нагрузок (power-to-heat) в системах централизованного и децентрализованного теплоснабжения.

В качестве приоритетных технологий рассматриваются применение тепловых насосов и электрокотлов совместно с аккумулированием тепловой энергии. С энергетической точки зрения применение компрессионных теплонасосных установок (ТНУ) более привлекательно, однако их удельная стоимость в 3-4 раза превышает стоимость электрокотлов. Данное обстоятельство делает обе технологии конкурентными в энергосистемах с большой долей электроэнергии, получаемой от возобновляемых источников или АЭС. Очевидно, что ТНУ необходимо использовать как базовый источник теплоты с большим числом часов использования установленной мощности, в то время как электрокотлы могут быть выгодны даже при работе 500-1000 часов в году.

В настоящее время в Республике Беларусь также планируется широкое применение электрокотлов совместно с баками-аккумуляторами сетевой воды. В первую очередь, это планируется реализовать на крупных ТЭЦ для повышения их регулировочного диапазона, а также крупных котельных для прямого использования электроэнергии в системах отопления и горячего водоснабже-

ния. Общий объем электрокотлов, необходимых к установке на ТЭС и котельных ГПО «Белэнерго», оценивается величиной до 985 МВт, а на источниках иной ведомственной принадлежности – порядка 200 МВт.

Также электрокотлы, которые в течение 30 секунд могут изменить свою нагрузку от минимальной до максимальной, могут использоваться для первичного регулирования частоты энергосистемы. Пример такого использования показан на рисунке 2.

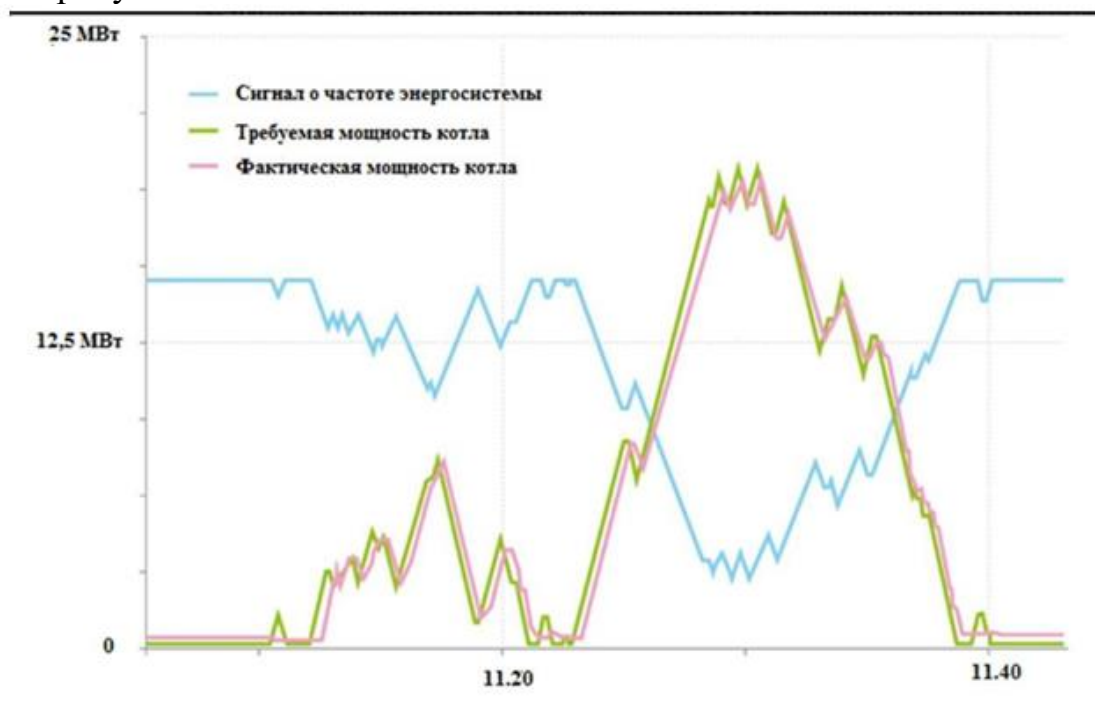


Рисунок 2 – График мощности

Акваэкология представляет на белорусском рынке электрокотлы производства норвежской компании PARAT Halvorsen AS (рисунок 3), ведущего поставщика решений в области тепло- и пароснабжения. Основная специализация производителя – изготовление электродных водогрейных и паровых котлов. Электрокотлы Parat мощностью от 4 до 40 МВт широко используются в энергосистемах стран Скандинавии, Германии, Италии и за это время зарекомендовали себя наилучшим образом [3].

Отличительными характеристиками котлов производства Parat являются:

- применение котловой воды с электропроводностью менее 3 мкс/см(допускается 6 мкс/см);
- раз в год осуществляется остановка на 3 дня для проверки и осмотра согласно регламенту производителя;
- нет износа электродов при нормальной эксплуатации;
- комплект расходных материалов для ТО: прокладки на люки-лазы, фарфоровые изоляторы, прокладки на фланцевые соединения;
- капитальный ремонт в течение эксплуатации не требуется;
- обучение персонала проводится в течение 2 дней при монтаже и пусконаладке оборудования;
- регулирование мощности и температуры не требует установки дополнительных насосов циркуляции и защитных экранов;



Рисунок 3 – Электрочотёл PARAT Halvorsen AS

### **Заключение**

Данное открытие – аккумулярование тепла с помощью песчаных батарей, действительно, нужное и весомое, так как открытие является практически чистым продуктом и не несет вред окружающей среде, позволяет увеличить производство возобновляемых источников энергии, аккумуляровать солнечную или ветровую энергию до 100% и в дальнейшем использовании энергии в отоплении и электричестве. Широкое применение электрочотлов совместно с баками-аккумуляторами сетевой воды на ТЭС и котельных ГПО «Белэнерго» Республики Беларусь необходимы для обеспечения постоянной работы АЭС в базовом режиме а также для прямого использования электроэнергии в системах отопления и горячего водоснабжения.

### **Литература**

1. BBS news [Электронный ресурс]/ Изменение климата: «Песчаная батарея». – Режим доступа: <https://www.bbc.com/news/science-environment-6199652>. – Дата доступа: 14.03.2023
2. Polar night energy [Электронный ресурс]/ Sand Battery. – Режим доступа: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery/>. – Дата доступа: 14.03.2023.
3. Акваэкология [Электронный ресурс]/ Применение электрочотлов в системах теплоснабжения. Взгляд профессионалов. – Режим доступа: <https://aquaecology.group/primenenie-elektrokotlov-v-sistemah-teplosnabzheniya-vzglyad-professionalov/> – Дата доступа: 14.03.2023

УДК 621.311

## ТЕРМОРЕГУЛЯТОРЫ THERMOSTATS

А.Д. Касач

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

jte@tut.by

A.Kasach

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

*Аннотация: классификация и принцип работы терморегуляторов*

*Abstract: classification and principle of operation of thermoregulators*

*Ключевые слова: терморегуляторы, термостат*

*Keywords: thermoregulators, thermostat*

### Введение

Терморегулятор (термостат) – прибор для поддержания постоянной температуры. Поддержание температуры обеспечивается либо за счёт использования терморегуляторов, либо осуществлением фазового перехода (например, таяние льда). Широко известны автомобильные моторы, где летом нет никакой теплоизоляции и за счёт действия восковых термостатов (на основе Церезина) поддерживается постоянная температура. Другим примером термостата является холодильник.

### Основная часть

Классификация термостатов:

Термостаты можно классифицировать по диапазону рабочих температур:

-Термостаты высоких температур (300–1200 °С);

-Термостаты средних температур (60–500 °С);

-Термостаты низких температур (менее –60 °С (200 К)) – криостаты.

Электрические термостаты можно классифицировать по принципу срабатывания:

-Механические, биметаллические (изменение температуры регистрируется через изменение формы биметаллической пластины, которая механически связана с контактной группой);

-Электронные (измерение температуры выполняется с помощью датчика (часто термопарой) или цифровой микросхемой с датчиком температуры, сигнал от которых обрабатывается микроконтроллером);

-Другие: изменение температуры может также регистрироваться через изменение объёма жидкости, излучающих свойств материала и т. д.

Термостаты можно классифицировать по рабочему телу (теплоносителю):-

-Воздушные;

-Жидкостные;

-Твердотельные с использованием элементов Пельтье и воска.

Механические термостаты:

Механический терморегулятор довольно часто используется в системах отопления не только частных домов, но и обычных жилых квартир. Более того, различные их разновидности могут управлять работой практически любых климатических систем - кондиционеров, теплых полов, водонагревателей.

Основным элементом любого комнатного механического термостата – газовая мембрана. Иногда термостат называют мембранный терморегулятор.



Рисунок 1 – Мембранный терморегулятор

Газ, который находится внутри мембраны при повышении/понижении температуры воздействует на стенки мембраны, изменяя свой объем. Стенки запускают механизм замыкания или размыкания электрической цепи, питающей системы отопления или охлаждения.

Выбор именно такого способа устройства для комнатного термостата обусловлен простотой, а также тем, что устройство реагирует именно на изменение температуры воздуха, а не поверхности, что наиболее важно в системах отопления и охлаждения. Поэтому, например, для теплых полов разумнее использовать механические жидкостные термостаты с выносным датчиком.



Рисунок 2 – Термостат с выносным датчиком

Регулировка температуры срабатывания у мембранного комнатного терморегулятора, выполняется с помощью управляющего колесика со шкалой, которое соединено с механизмом мембраны. Поворачивая колесо, мы приближаем или отдаляем стенки мембраны от управляющего механизма, тем самым изменяя температуру при которой произойдет замыкание или размыкание электрической цепи. Другими словами, если механизм срабатывания будет ближе к стенке мембраны, то газу, расположенному в ней, достаточно незначительно изменить объем, чтобы он сработал, соответственно понадобится меньшая температура и наоборот. По этому принципу и работает регулировочное колесо.

Схема подключение механического терморегулятора:



С комнатным механическим термостатом Zilon za-1 в комплекте поставляется вот такая схема подключения:

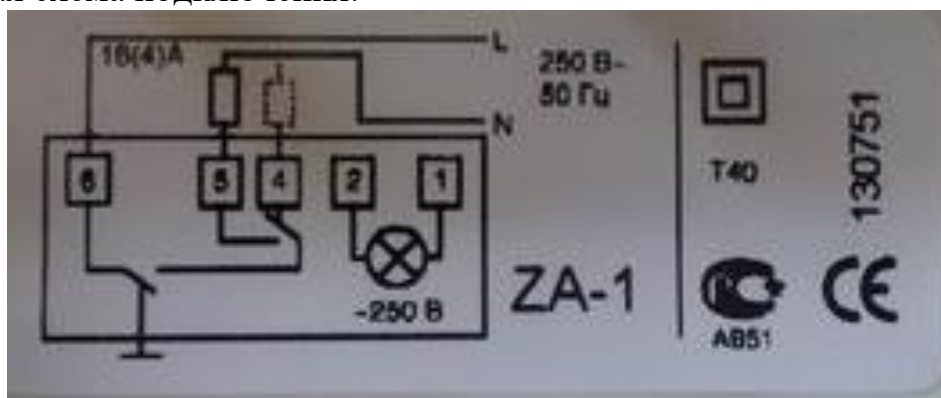


Рисунок 3 – Схема подключения термостата za-1

Как видите, основные здесь клеммы для подключения «4», «5» и «6», а сам терморегулятор работает по принципу переключателя. Пока температура окружающего воздуха не достигла выставленной регулятором величины, электрический ток, подведенный на клемму «6», подаётся на контакт «4», но как только будет достигнута необходимая температура, режим меняется и ток начинает поступать на клемму «5». Таким образом, к клемме «4» подключаются отопительные приборы, которые обогревают помещение и, если ничего не подключено к клемме «5», просто отключаются при достижении нужной температуры. А к контакту «5» обычно подключаются охлаждающие системы, которые начинают работать лишь когда температура воздуха превысит заданное значение.

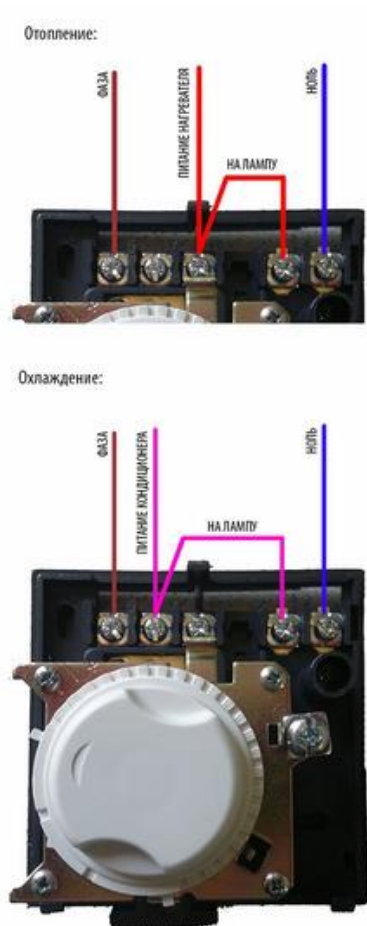


Рисунок 4 – Наглядная схема подключения термостата za-1

Схема простого терморегулятора:

В качестве датчика можно использовать полупроводниковые элементы, термисторы, термометры сопротивления, термопары и биметаллические термореле. Схема терморегулятор реагирует на превышения параметра над заданным уровнем и включает исполнительное устройство. Самым простым вариантом такого прибора является элемент на биполярных транзисторах. Термореле выполнено на основе триггера Шмидта. В роли датчика температуры выступает терморезистор – элемент, сопротивление которого изменяется в зависимости от повышения или понижения градусов. R1 – это потенциометр, который устанавливает начальное смещение на терморезисторе R2 и потенциометре R3. За счет регулировки происходит срабатывание исполнительного устройства и коммутации реле K1, когда сопротивление терморезистора изменяется. При этом рабочее напряжение реле должно соответствовать рабочему питанию оборудования. Чтобы защитить выходной транзистор от импульсов напряжения, параллельно подсоединен полупроводниковый диод. Величина нагрузки подключаемого элемента зависит от максимального тока электромагнитного реле.

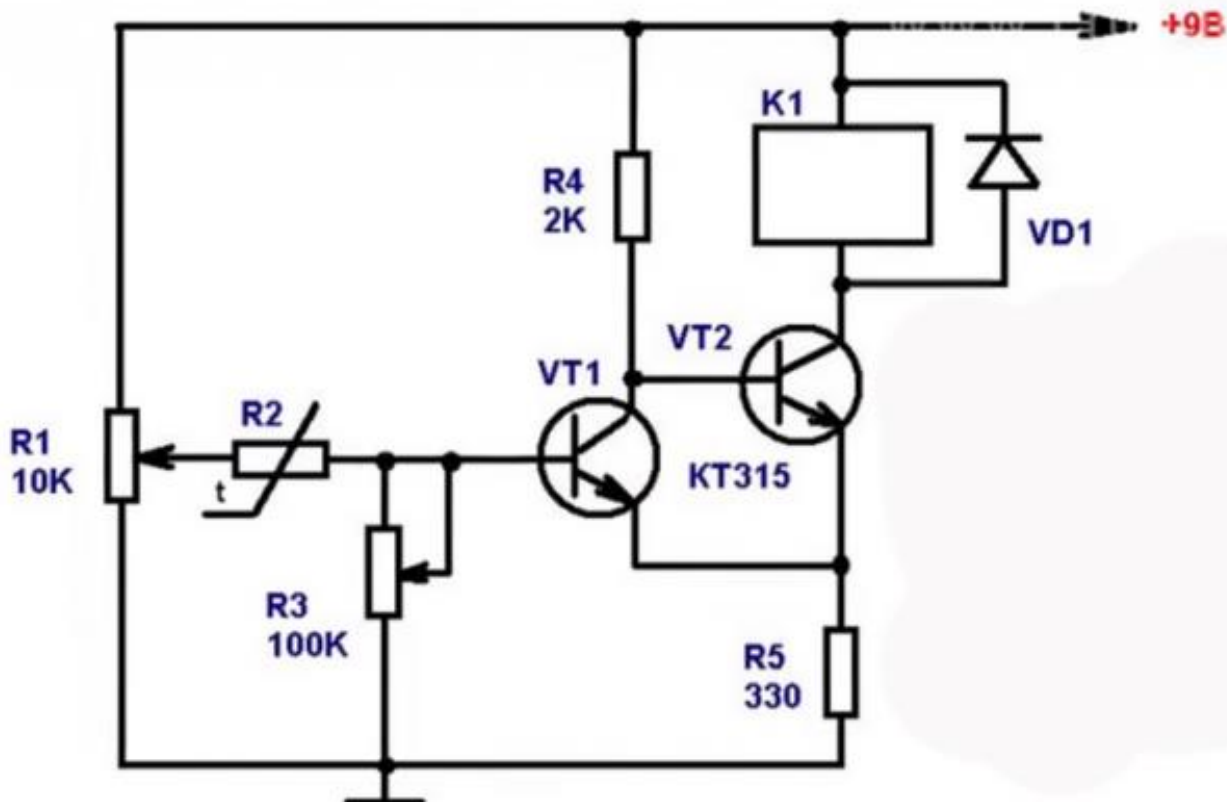


Рисунок 5 – Схема простого терморегулятора

Схема электронного терморегулятора на компараторе:

Схема будет применена для охлаждения стационарного компьютера.

Компаратор - это сравнивающее устройство.

Он сравнивает напряжение на прямом входе (у компаратора их два - прямой и инверсный), с напряжением на инверсном входе (напряжение срабатывания). Резисторы R1 и R2 образуют делитель напряжения. С их помощью осуществляется настройка порогового напряжения срабатывания компаратора. Если на прямом входе напряжение превысит напряжение инверсного входа, то компаратор выдаст на выходе высокий уровень, равный напряжению питания компаратора.

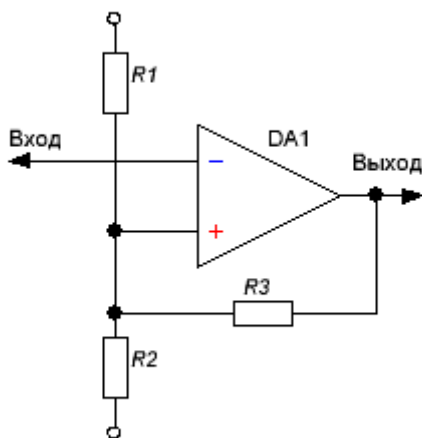


Рисунок 6 – Схема компаратора

Резистор R3 служит для создания положительной обратной связи для формирования гистерезисной передаточной характеристики. Эта мера позволяет избежать быстрых нежелательных переключений состояния выхода, обусловленном шумами во входном сигнале.

На компараторе можно даже построить простейший АЦП, если выставить порог срабатывания и напряжение питания компаратора равными логической единице.

Итак, термостат.

Принцип его действия таков: радиатор не охлаждается, пока его температура не достигнет 40-50 градусов (зависит от сопротивления резисторов R1 и R2). По достижении необходимой температуры кулер включается, охлаждает радиатор и снова отключается.

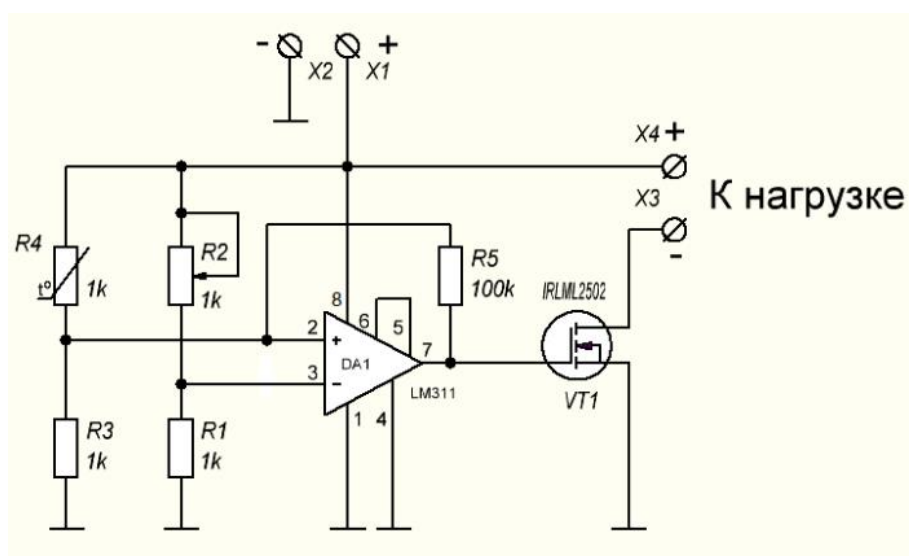


Рисунок 7 – Схема электронного терморегулятора

## Заключение

Терморегуляторы ориентированы, как и все приборы автоматического управления, на внедрение технических средств, управляющих тем или иным процессами без непосредственного участия человека. Терморегуляторы дают возможность настроить нужный прибор под необходимые температурные условия. Они просты в использовании и относительно недороги.

## Литература

1. Свободная энциклопедия «Википедия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Терморегулятор/> .– Дата доступа: 10.04.2023.
2. Терморегуляторы [Электронный ресурс]/ терморегуляторы. – Режим доступа: <http://electrosam.ru/glavnaja/jelektroobustrojstvo/termoregulatory/> .– Дата доступа: 10.04.2023



УДК

## ВОЛОКНО-ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ FIBER-OPTIC CURRENT AND VOLTAGE TRANSFORMERS

Падрез А. С.

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

A. Padrez

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

*Аннотация:* технологии в разработке новейших трансформаторов не стоят на месте и на данный момент активно разрабатываются волоконно-оптические трансформаторы тока и напряжения, которые облегчат измерения характеристик сети. В данной статье будут рассмотрены принципы их действия, варианты внедрения данных измерительных приборов в производство энергии, их характеристики и производители.

*Abstract:* technologies in the development of the latest transformers do not stand still and at the moment fiber-optic current and voltage transformers are being actively developed, which will facilitate the measurement of network characteristics. This article will consider the principles of their operation, options for the implementation of these measuring instruments in energy production, their characteristics and manufacturers.

*Ключевые слова:* трансформатор, магнитооптический эффект, чувствительные элементы, цифровой код, измерительный прибор, эффективность.

*Keywords:* transformer, sensing elements, magneto-optical effect, digital code, measuring device, efficiency.

### Введение

Измерительный трансформатор – электрический трансформатор, предназначенный для измерения и контроля (например, в системах релейной защиты сетей) напряжения, тока или фазы электрического сигнала переменного тока. Привычные нам измерительные трансформаторы имеют ряд недостатков, которые не позволяют объективно оценить состояние сети, и данная проблема требует решения, поскольку отслеживание параметров сети является одной из наиболее важных задач современной энергетики. Ключевыми проблемами являются явления насыщения, гистерезиса, резонанса, остаточного намагничивания, а так же опасность возникновения пожарной и взрывоопасности, безусловно также требуется обеспечения определенных условий при которых будет работать данный трансформатор и его погрешность будет минимизироваться. Попытки уменьшить зависимость от определенных факторов и увеличить эффективность измерений натолкнула разработчиков на создание трансформатора нового поколения, работа которого будет основываться от эффектов Фарадея

и Погкельса. Эффект Фарадея (рисунок 1) – магнитооптический эффект, который заключается в том, что при распространении линейно-поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света. Эффект Погкельса – это явление возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля. Такой выбор у разработчиков был сделан не случайно: вопросы по поводу изоляции данной системы отпадают поскольку оптические волокна сами по себе являются прекрасным диэлектриком. На данном этапе волокно-оптические трансформаторы активно внедряются в производство и решаются вопросы по улучшению их конструкции и повышения качества измерения связанное с желанием уменьшить погрешность данных приборов.

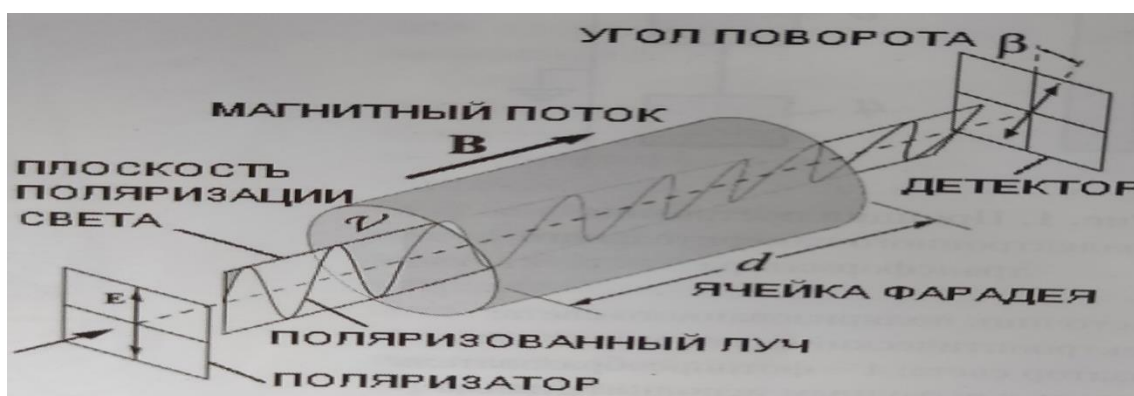


Рисунок 1 – Магнитооптический преобразователь на основе эффекта Фарадея

### Основная часть

Несомненно, каждый прибор имеет свои плюсы и минусы, но хочется отметить, что у волокно-оптических трансформаторов, по сравнению с классическими, плюсов огромное количество и каждый из них оправдан.

Основные преимущества волокно-оптических трансформаторов:

- трансформаторы данного типа имеют возможность измерения как постоянного, так и переменного электрического сигнала;
- отсутствуют явления гистерезиса, магнитного насыщения, а также остаточного намагничивания;
- процент точности данных приборов составляет 0,1 – 0,2 %, что не может радовать поскольку процент точности классических трансформаторов составляет около 0,5 – 0,7 %;
- широкая полоса пропускания сигналов, которая позволяет произвести не только качественный, но и количественный анализ электроэнергии;
- данная система позволяет использовать совместно с ней аналоговых, дискретных, цифровых интерфейсов;
- данные приборы имеют полную эколого-, пожаро-, взрыво- и электро-безопасность за счет отсутствия легковоспламеняющихся, а также загрязняющих окружающую среду элементов, что не может не радовать в современном мире;

– помехи данной группе приборов не страшны поскольку они не зависимы от магнитных полей, и вся информация передается по средствам светового излучения и данный плюс является чуть-ли самым важным для современных приборов, связанных с производством и контролем за электроэнергией.

Несомненно, плюсов у данных приборов еще много, но входе данной работы были описаны самые важные из них. Данные плюсы показывают несомненное превосходство волокно-оптических трансформаторов перед классическими измерительными трансформаторами.

Рассмотрим каждый волокно-оптический трансформатор в отдельности и начнем с трансформатора тока (рисунок 2) как с одного из самых распространенных. Любой трансформатор данного типа содержит чувствительный элемент в виде витков оптоволоконного материала, который помещен в защитную оболочку из немагнитного материала. Защитная оболочка собой представляет токовую головку трансформатора тока либо измерительную петлю для оптоволоконного преобразователя, электронно-оптический блок, соединенный с чувствительным элементом непосредственно или через оптический кросс. Электронно-оптический блок с помощью встроенного в него лазера и модулятора поддерживает состояние поляризованности сигнала для соблюдения процесса измерений. В чувствительном элементе плоскость поляризации подвергается воздействию магнитному полю, которое поворачивает область поляризации в соответствии с углом Фарадея и после прохождения сигнала через данный этап он попадает в виде световой волны на оптический вход электронно-оптического блока, где и формируется измеряемый сигнал.

После всех преобразований поступающего сигнала он поступает на аналого-цифровой преобразователь и в виде закодированного сигнала на интерфейсный выход электронно-оптического блока и проходя через цифро-аналоговый преобразователь на усилительно устройство, где происходит формирование нормированных аналоговых выходных сигналов в виде тока, так же данный окончательный процесс характерен и волокно-оптическому трансформатору напряжения. Таким образом, информация о сигнале получается доступной и понятной для дальнейшего использования при расчетах режима работы.

Волокно-оптические измерительные трансформаторы имеют следующие характеристики: номинальное напряжение 0 – 750 кВ, номинальный первичный ток 100 – 3000 А, диапазон рабочих температур -60 – +60°C, расстояние между датчиком и электронным блоком до 1200 м. Производителем таких трансформаторов с данными параметрами на территории России является компания Профотек, которая занимается не только производством и продажей, но и также занимается усовершенствованием данного прибора.



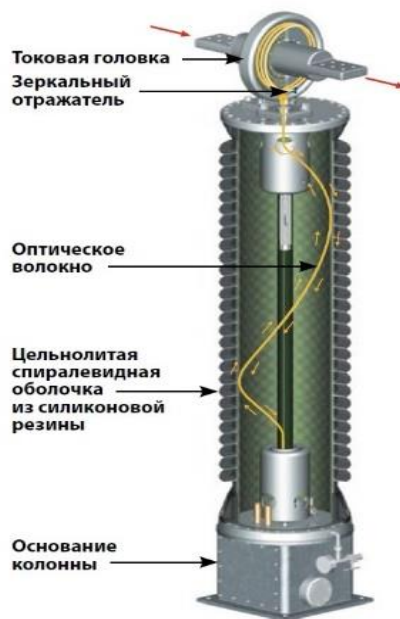


Рисунок 2 – Волокно-оптический трансформатор тока

Рассмотрев измерительный трансформатор тока, перейдем к трансформатору напряжения (рисунок 3). В данном примере используется эффект Погкельса, описанный выше. Коэффициент преломления в данной приборе линейно зависит от силы поля, которое приложено к кристаллу, не имеющего внутри себя симметрии, как пример пьезокристалл. Благодаря несимметрии внутри кристалла возникает двойное преломление луча, по-другому говоря расщепление световой волны на две составляющие. Один из лучей продолжает свое движение прямо и называется обыкновенным лучом, второй луч имеет отклонение сторону и называется необыкновенным. Данное явление напрямую связано с тем, что скорость распространения луча в таких материалах и с такой поляризацией как у этого луча зависит от его направления следования. Дальнейшая работа происходит также как и в волокно-оптическом трансформаторе тока.

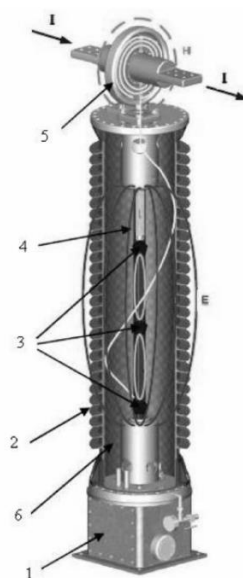


Рисунок 3 – Волокно-оптический трансформатор напряжения

Данный измерительный трансформатор имеет следующие характеристики: номинальное значение измеряемого напряжения 35 – 110 кВ, рабочая частота от 1 Гц до 10 кГц, модульная погрешность измерений составляет 0,2 – 0,5%. Основным производителем волоконно-оптических трансформаторов напряжения в России является МАРЭНЕРГО не только производящий, но также и разрабатывающий новые варианты усовершенствования данного прибора.

### **Заключение**

Данное открытие позволяет увеличить точность и производительность измерительных трансформаторов. Они позволяют производить измерения на больших частотах с большей точностью поскольку на них не влияет ряд факторов возникающих при измерениях на больших частотах. Минимизируют выбросы от производства себя поскольку большая часть составляющих данных приборов не нуждаются в тяжелом изготовлении и затрат столько важных нам ископаемых ресурсов, также несомненно вред природе уменьшается за счет того что в данных трансформаторах не чему загореться и привести в негодность прибор, что благоприятно отражается на экологии и кармане пользователя. Несомненно, в скором времени будет произведена замена всех классических трансформаторов на волоконно-оптические трансформаторы благодаря их плюсам. Будущее наступило уже сегодня и мы используем все возможные варианты для отслеживания и нормирования электроэнергии и в этом нам помогают современные волоконно-оптические трансформаторы.

### **Литература**

- 1 Гавричев, В. Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля : учебное пособие / В. Д. Гавричев, А. Л. Дмитриев. – СПб. : СПбНИУ ИТМО, 2013
- 2 Моржин, Ю. И. Цифровая подстанция – важный элемент интеллектуальной энергосистемы / Ю. И. Моржин. – URL : <http://www.ntc-power.ru/upload/presentation/CPS-intellectual-grid-element.pdf> /. – Дата доступа: 21.03.2023
- 3 Цифровая подстанция и ее режимы работы // NR Electric Co., Ltd. – URL : <http://www.nrec.com/ru/category/Digital-Substation.html> /. – Дата доступа: 21.03.2023
- 4 Электрические сети и системы / Ю. М. Бондаренко [и др.] // Изв. OMICRON. – 2020. – Т. 55, № 5 – 6. – с. 59–61.

УДК 621.38

**ЭЛЕКТРОНИКА. ФОТОЭЛЕКТРОНИКА.  
ELECTRONICS.PHOTOELECTRONICS.**

А.А. Заяц

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

jte@tut.by

A. Zayats

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Supervisor – Zhukovskaya T., Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация:* что представляет собой инвертор, для чего используется, технические характеристики, классификация и области применения инверторов.

*Abstract:* what is an inverter, what is it used for, technical characteristics, classification and applications of inverters.

*Ключевые слова:* инвертор, фотоэлектрический инвертор, однофазный инвертор, трёхфазный инвертор, автономный инвертор, сетевой инвертор.

*Keywords:* inverter, photovoltaic inverter, single-phase inverter, three-phase inverter, autonomous inverter, network inverter.

**Введение**

В настоящее время широкое распространение получили электрические схемы, где в качестве источника тока используются аккумуляторы и солнечные модули. Для преобразования постоянного тока от аккумуляторов или солнечных модулей в переменный ток применяют инверторы.

**Понятие об инверторе. Общие сведения**

Инвертор представляет собой электротехническое устройство для преобразования постоянного тока в переменный с изменением величины напряжения. Обычно представляет собой генератор периодического напряжения, по форме приближённого к синусоиде, или дискретного сигнала.

Инверторы напряжения могут применяться в виде отдельного устройства или входить в состав источников и систем бесперебойного питания аппаратуры электрической энергией переменного тока.



Рисунок 1 – Гибридный солнечный инвертор SILA V 5000P

Инвертор, как и любое сложное электротехническое устройство обладает следующими свойствами:

1. Инверторы напряжения позволяют устранить или по крайней мере ослабить зависимость работы информационных систем от качества сетей переменного тока. Например, в персональных компьютерах при внезапном отказе сети с помощью резервной аккумуляторной батареи и инвертора, образующих источник бесперебойного питания (ИБП), можно обеспечить работу компьютеров для корректного завершения решаемых задач. В более сложных ответственных системах инверторные устройства могут работать в длительном контролируемом режиме параллельно с сетью или независимо от неё.

2. Кроме «самостоятельных» приложений, где инвертор выступает в качестве источника питания потребителей переменного тока, широкое развитие получили технологии преобразования энергии, где инвертор является промежуточным звеном в цепочке преобразователей. Принципиальной особенностью инверторов напряжения для таких приложений является высокая частота преобразования (десятки-сотни килогерц). Для эффективного преобразования энергии на высокой частоте требуется более совершенная элементная база (полупроводниковые ключи, магнитные материалы, специализированные контроллеры).

3. Как и любое другое силовое устройство, инвертор должен иметь высокий КПД, обладать высокой надежностью и иметь приемлемые массогабаритные характеристики. Кроме того, он должен иметь допустимый уровень высших гармонических составляющих в кривой выходного напряжения (допустимое значение коэффициентов гармоник) и не создавать при работе недопустимый для других потребителей уровень пульсации на клеммах источника энергии.

4. В системах чистого измерения Grid-tie инвертор используется для подачи энергии от солнечных батарей, ветрогенераторов, гидроэлектростанций и других источников зелёной энергии в общую электрическую сеть.

Работа инвертора напряжения основана на переключении источника постоянного напряжения с целью периодического изменения полярности напряжения на зажимах нагрузки. Частота переключения задается сигналами управления, формируемыми управляющей схемой (контроллером). Контроллер также может решать дополнительные задачи:

- регулирование напряжения;
- синхронизация частоты переключения ключей;
- защитой их от перегрузок и др.

По принципу действия инверторы делятся на:

1. автономные;
2. инверторы напряжения (инверторы большинства ИБП);
3. инверторы тока (советский аэродромный преобразователь АПЧС-63У1);
4. резонансные инверторы (АИР);
5. зависимые инверторы, ведомые сетью, (силовой преобразователь электропоездов ВЛ85, ЭП1 и другие).

По своему исполнению солнечные инверторы подразделяются на:

- однофазные;
- трёхфазные.

### **Однофазные инверторы**

Существуют несколько групп инверторов. Первая группа более дорогих инверторов обеспечивает синусоидальное выходное напряжение. Вторая группа обеспечивает выходное напряжение упрощённой формы, заменяющей синусоиду. Чаще всего используется сигнал в виде трапецеидального синуса.

Для подавляющего большинства бытовых приборов не допустимо использовать переменное напряжение с упрощённой формой сигнала. Синусоида важна для приборов, содержащих электродвигатели/трансформаторы и некоторых телекоммуникационных, измерительных, лабораторных приборов, медицинской аппаратуры, а также профессиональной аудио аппаратуры. Выбор инвертора производится исходя из пиковой мощности энергопотребления стандартного напряжения 220В/50Гц.

Существуют три режима работы инвертора:

1. Режим длительной работы. Данный режим соответствует номинальной мощности инвертора.
2. Режим перегрузки. В данном режиме большинство моделей инверторов в течение нескольких десятков минут (до 30) могут отдавать мощность в 1,2-1,5 раза больше номинальной.
3. Режим пусковой. В данном режиме инвертор способен отдавать повышенную моментальную мощность в течение нескольких миллисекунд для обеспечения запуска электродвигателей и емкостных нагрузок.

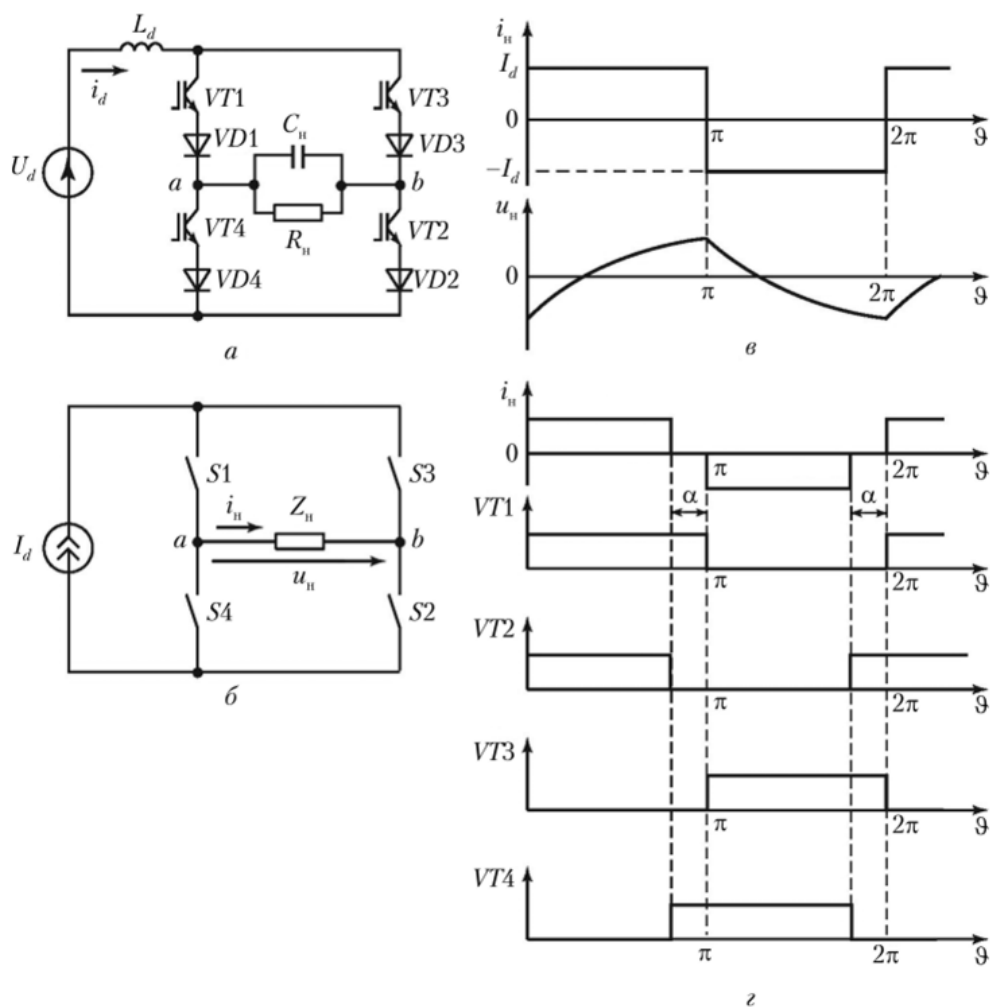


Рисунок 2 – Однофазный инвертор тока: а – мостовая схема; б – схема замещения; в – диаграммы токов и напряжения; г – диаграммы импульсов управления и тока нагрузки при широтно-импульсном регулировании

На рисунке 2 приведена схема однофазного инвертора тока, работающего на активно-ёмкостную нагрузку. Внешними отличительными признаками схем инвертора тока и инвертора напряжения являются:

- наличие дросселя  $L_{дл}$  в цепи постоянного тока инвертора тока;
- последовательное соединение транзисторов и диодов в инверторе тока;
- встречно-параллельное соединение диодов с транзисторами в инверторе напряжения.

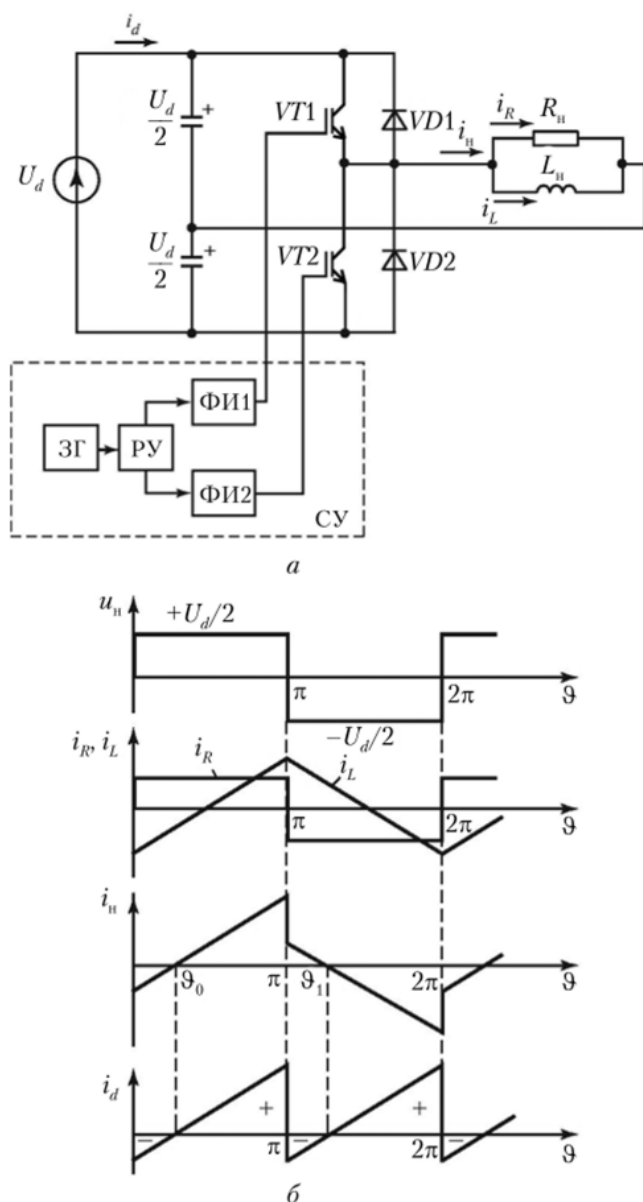


Рисунок 3 – Однофазный полумостовой инвертор напряжения а – схема; б – диаграмма работы

Простейшая однофазная полумостовая схема инвертора напряжения с активно-индуктивной нагрузкой представлена совместно с диаграммами токов и напряжений представлена на рисунке 3.

В течение нескольких секунд большинство моделей инверторов могут отдавать мощность в 1,5-2 раза превышающую номинальную. Сильная кратковременная перегрузка возникает, например, при включении холодильника.

Инвертора мощностью 150 Вт достаточно, чтобы запитать от бортовой электросети автомобиля практически любой ноутбук. Для питания и зарядки мобильных телефонов, аудио и фотоаппаратуры хватит 7,5 Вт.

### Трёхфазные инверторы

Трёхфазные инверторы обычно используются для создания трёхфазного тока для электродвигателей, например, для питания трёхфазного асинхронного

двигателя. При этом обмотки двигателя непосредственно подключаются к выходу инвертора.

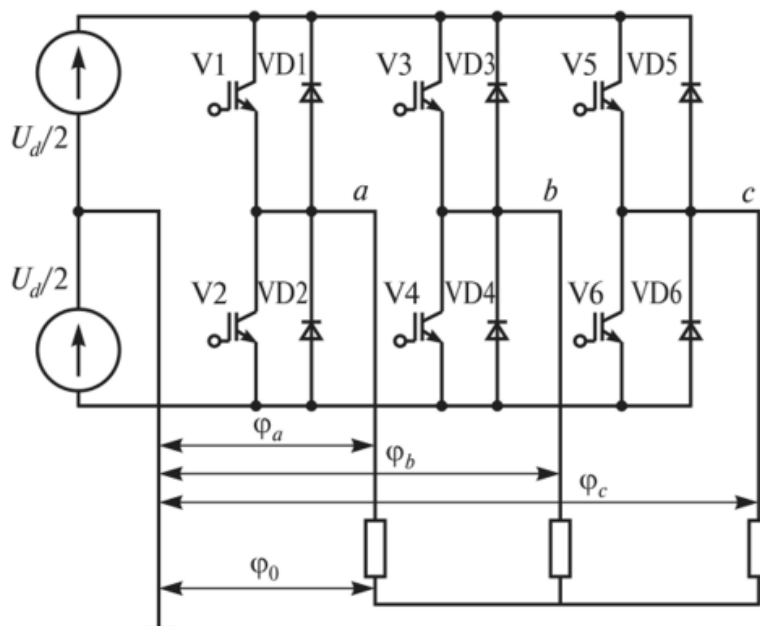


Рисунок 4 – Трёхфазная мостовая схема АИН

Рассмотрим процесс преобразования постоянного напряжения в трёхфазное периодическое напряжение с помощью АИН. Инвертор состоит из транзисторных ключей V1-V6 и диодов обратного тока VD1-VD6, которые включены параллельно транзисторам (рисунок 3). При таком соединении транзистор и диод представляют собой ключ с двусторонней проводимостью. При подключении фазы "а" к «плюсу» источника постоянного напряжения  $U_d$  через транзистор V1 может протекать ток нагрузки прямого направления, а через диод VD1 может протекать ток нагрузки обратного направления.

Пренебрегая незначительным падением напряжения на транзисторе и диоде можно считать, что потенциал точек a, b, c равен или потенциалу положительного полюса источника (при проводящем состоянии транзисторов V1, V3, V5), или потенциалу отрицательного полюса источника (при проводящем состоянии транзисторов V2, V4, V6).

Высокомощные трёхфазные инверторы применяются в тяговых преобразователях в электроприводе локомотивов, тепловозов, троллейбусов, трамваев, прокатных станов, буровых вышек, в индукторах (установки индукционного нагрева).

### Инверторы для солнечных панелей

Инвертор для солнечных панелей – это тип электрического преобразователя, который преобразует исходный постоянный ток фотоэлектрической солнечной панели в переменный ток определённой частоты и напряжения, который может подаваться в общую электрическую сеть или использоваться домашней электросетью. Это критически важный элемент в солнечной электростанции, который позволяет обычному оборудованию, потребляющему переменный ток, работать в сочетании с солнечными панелями и/или аккумуляторами на посто-



янном токе. Инверторы солнечной электростанции имеют специальные функции, необходимые для использования с солнечными панелями, включая отслеживание точки максимальной мощности и автоматическое выключение при исчезновении сети.

### **Классификация**

Солнечные инверторы можно классифицировать на три основных типа:

1. Автономные инверторы, используются в местах, которые не подключены к общественной сети. Инвертор использует энергию постоянного тока от аккумуляторов, заряженных солнечными панелями. Многие автономные инверторы также имеют встроенные зарядные устройства для дополнительной зарядки батареи от источника переменного тока, если таковые имеются. Обычно они никоим образом не взаимодействуют с общественными электросетями, и как таковые они не должны иметь защиту от пропадания сети.

2. Сетевые инверторы, которые синхронизируются с внешней сетью по фазе и синусоиде тока, который поставляется в сеть. По соображениям безопасности сетевые инверторы обязаны выключаться при потере электроснабжения. Они не обеспечивают резервное питание при отключении внешней сети.

3. Гибридные инверторы управляют фотоэлектрической системой, аккумуляторной батареей и внешней сетью, объединяя все эти элементы через себя. Это современные универсальные системы, которые, как правило, могут использоваться для сетевых, автономных или резервных программ, но их основной функцией является использование энергии для собственного потребления с возможным использованием резервных аккумуляторов.

### **Отслеживание точки максимальной мощности (MPPT)**

Солнечные инверторы используют отслеживание точки максимальной мощности (MPPT) для получения максимально возможной мощности от солнечного массива. Солнечные фотоэлементы имеют сложную взаимосвязь между солнечным облучением, температурой и общим сопротивлением, что создаёт нелинейную эффективность генерации, известную как вольтамперная характеристика (ВАХ). Целью системы MPPT является подбор параметров тока и напряжения солнечных фотоэлементов, определения сопротивления (нагрузки) для получения максимальной мощности при любых заданных условиях окружающей среды.

Коэффициент заполнения, более известный под аббревиатурой FF, является параметром, который вместе с напряжением разомкнутого контура ( $V_{oc}$ ) и током короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) панели определяет максимальную мощность солнечной батареи. Коэффициент заполнения определяется как отношение максимальной мощности солнечной батареи к произведению  $V_{oc}$  и  $I_{sc}$ .

### **Солнечные микроинверторы**

Солнечный микроинвертор – это инвертор, предназначенный для работы с одной или двумя солнечными панелями. Микроинвертор преобразует исходный постоянный ток с каждой панели в переменный. Конструкция микроинвертора

позволяет параллельно подключать несколько независимых блоков модульным способом.

К преимуществам микроинвертора можно отнести оптимизацию мощности одной панели, независимую работу каждой панели, возможность постепенного масштабирования СЭС.

К недостаткам, в первую очередь, следует отнести гораздо более высокую стоимость системы, увеличенную пожарную опасность и меньшую надёжность. Обычно микроинверторы используют на кровельных СЭС, где много разных углов и затенений.

### Сетевые инверторы для солнечных панелей

Главная роль сетевых или синхронных инверторов, или просто сетевого инвертора заключается в синхронизации генерации по фазе, напряжению и частоте с внешней электросетью. Сетевые инверторы для солнечных панелей имеют защиту для быстрого отключения от сети, если внешняя сеть не работает или зафиксированы другие, критически важные ошибки. Это требование ПУЭ, которое гарантирует, что в случае отключения электроэнергии инвертор автоматически и мгновенно выключится, что предотвратит генерацию энергии и не причинит вреда любым рабочим, которых направляют на исправление электросети.

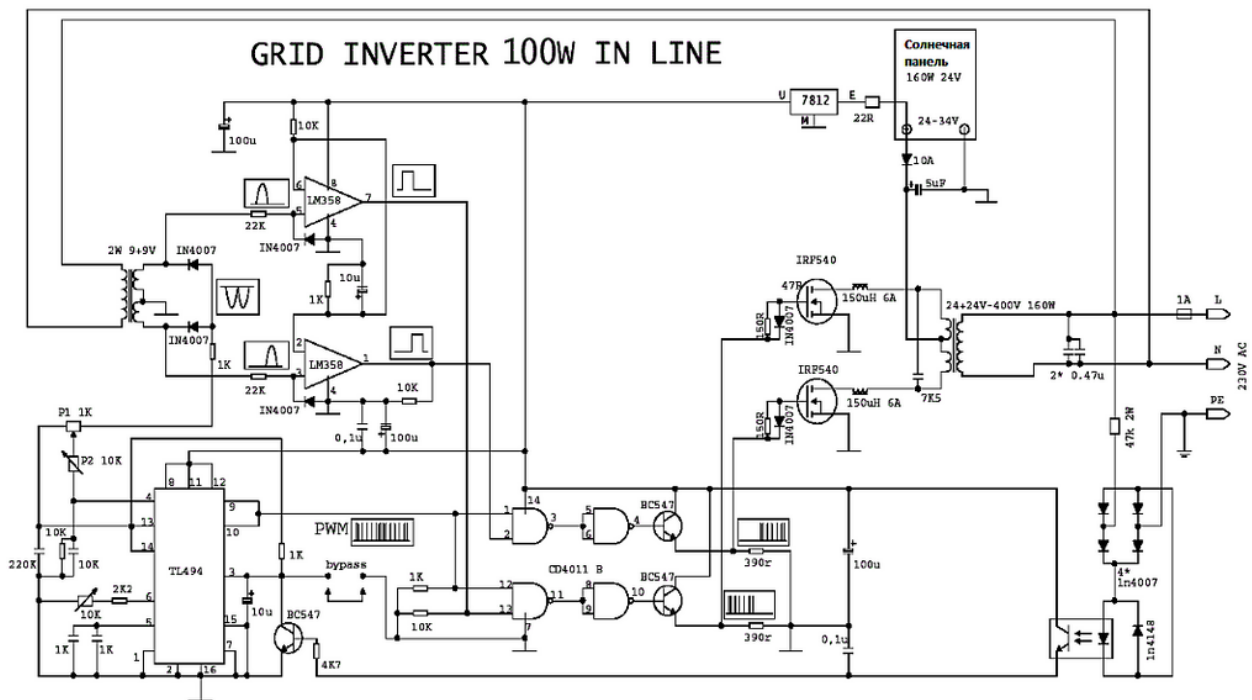


Рисунок 5 – Схема малоомощного сетевого инвертора

На рисунке 5 представлен простой сетевой инвертор напряжения, который позволяет преобразовывать электроэнергию из солнечных панелей в сетевое напряжение 220В и 50Гц, которое затем отдается в сеть.

Инверторы, которые сегодня доступны на рынке, используют различные технологии. Инверторы могут использовать новые высокочастотные трансформаторы, обычные низкочастотные трансформаторы или быть бестрансформаторными. Вместо преобразования постоянного тока непосредственно в 230В

переменного тока, высокочастотные трансформаторы используют компьютеризированный многоступенчатый процесс, который предполагает преобразование мощности в высокочастотный переменный ток, а затем обратно в постоянный, который в конечном итоге снова превращается в переменный ток.

Исторически сложилась обеспокоенность подключением бестрансформаторных инверторов к коммунальной сети. Опасения связаны с тем, что между цепями постоянного и переменного тока отсутствует гальваническая развязка, что может способствовать, при неисправностях, попаданию постоянного тока на сторону переменного тока. Начиная с 2005 года, разрешается использовать бестрансформаторные (или не гальванически развязанные) инверторы. В современных инверторах есть целый ряд защит, которые позволяют защитить как саму солнечную станцию, так и внешнюю сеть.

Все сетевые инверторы для солнечных панелей предназначены для подключения к внешней электросети, и они не будут работать, если останутся без подключения к внешней сети.

### **Заключение**

Солнечное излучение является практически неисчерпаемым источником энергии.

Применение фотоэлектрических инверторов позволяет практически решать вопросы использования солнечной энергии. Актуально применение схем с солнечными батареями не только для коммунального хозяйства, но особенно для космической отрасли. В схемах электроснабжения различного оборудования космических летательных аппаратов (искусственные спутники Земли, орбитальные космические станции, межпланетные зонды и другие) используют солнечные батареи и фотоэлектрические инверторы. Поэтому трудно переоценить значение фотоэлектрических инверторов для решения сложных научно-технических задач.

### **Литература**

1. Силовая электроника [Электронный ресурс]/силовая электроника. -Режим доступа: [https://studme.org/236023/tehnika/odnofaznye\\_invertory\\_toka](https://studme.org/236023/tehnika/odnofaznye_invertory_toka) – Дата доступа: 17.04.2023
2. Инвертор [Электронный ресурс]/Википедия. Свободная энциклопедия. -Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Инвертор\\_\(электротехника\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Инвертор_(электротехника)) – Дата доступа: 17.04.2023

УДК: 53.082

## ТИПЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ RESISTANCE STRAIN GAUGES TYPES, THEIR ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

Корякин М.

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

jte@tut.by

Karakin M.

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

**Аннотация:** перечисление типов тензорезисторов, их достоинств и недостатков.

**Abstract:** enumeration of resistance strain gauge type, their advantages and disadvantages.

**Ключевые слова:** тензорезистор, тензорезистивный эффект, тензорезисторная розетка, мембранная тензорезисторная розетка, тензорезисторная цепочка, приклеиваемые тензорезисторы, привариваемые тензорезисторы.

**Keywords:** resistance strain gauge, tensivity resistive effect, strain gauge rosette, membrane strain gauge rosette, resistance strain gauge chain, glued resistance strain gauge, welded resistance strain gauge.

### Введение

Тензорезистор – это измерительный преобразователь линейной деформации в изменение активного сопротивления, принцип действия которого основан на тензорезистивном эффекте.

Тензорезистивный эффект – это свойство проводников и полупроводников изменять электрическое сопротивление при объемном или линейном деформировании.

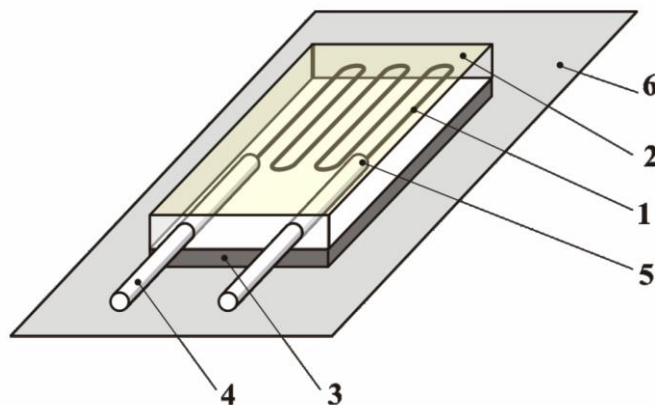


Рисунок 1 - Схематичное изображение тензорезистора  
1 - тензочувствительный элемент; 2 и 3 – подложки  
4 и 5 – соединительные провода  
6 – поверхность исследуемой детали

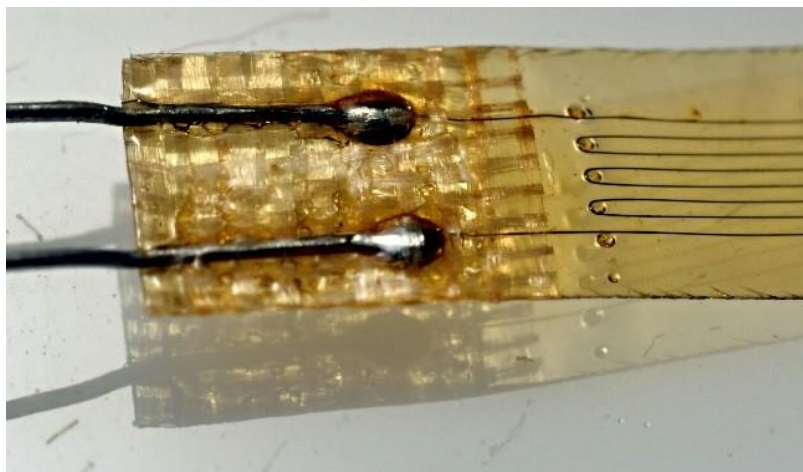


Рисунок 2 - Фотография проволочного тензорезистора

Основной характеристикой тензорезистора является его коэффициент относительной тензочувствительности, определяемый как

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

т.е. отношение относительного изменения электросопротивления  $\Delta R/R$  тензорезистора к вызывающей это изменение деформации  $\varepsilon = \Delta l/l$  исследуемого материала, где  $l$  – длина базы тензорезистора (Рисунок 3). Это значит, что зная коэффициент  $k$  и регистрируя изменение сопротивления тензорезистора  $\Delta R$  мы можем определить относительное удлинение тензочувствительного элемента  $\Delta l/l$ , а значит и силу необходимую для такого удлинения.

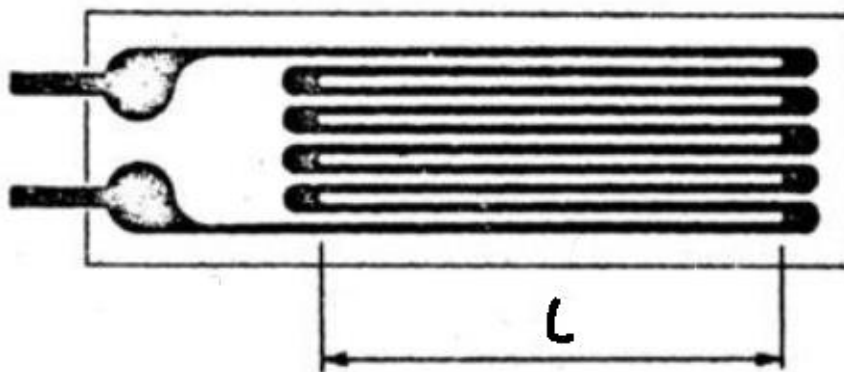


Рисунок 3 - Схематичное изображение тензорезистора

### Основная часть

Тензорезисторы используются в:

- Датчиках силы и давления (основная сфера использования тензорезисторов);
- Датчиках ускорения;
- Датчиках перемещения;
- Датчиках крутящего момента.

Тензорезисторы подразделяют по:

- Материалу чувствительного элемента;
- Количеству чувствительных элементов, их форме и расположению;
- Наличию или отсутствию подложки и материалу подложки;
- Способу установки на поверхность объекта;
- Диапазону измеряемых деформаций;
- Наличию или отсутствию термокомпенсации.

Материал чувствительного элемента может быть:

1. Полупроводниковым;
2. Проводниковым (металлическим).

Последние, в свою очередь, в зависимости от вида материала чувствительного элемента подразделяются на:

- a. Проволочные;
- b. Фольговые.

Тензорезисторы по количеству чувствительных элементов, их форме и расположению на подложке могут быть:

1. Одиночными тензорезисторами;
2. Тензорезисторными розетками;
3. Мембранными тензорезисторными розетками;
4. Тензорезисторными цепочками.

Тензорезисторная розетка – это измерительный преобразователь, содержащий на общей подложке чувствительные элементы тензорезистора, главные оси которых ориентированы под определенными углами друг к другу.

Мембранная тензорезисторная розетка – это вид тензорезисторных розеток предназначенных для измерения радиальных и тангенциальных деформаций.

Тензорезисторная цепочка – это совокупность чувствительных элементов тензорезистора или тензорезисторных розеток, расположенных на общей подложке в определенной последовательности.

Виды тензорезисторов выделяемых при делении по наличию или отсутствию подложки и материалу подложки:

1. На бумажной подложке;
2. На плёночной (клеевой, лаковой) подложке;
3. На стеклотканевой подложке;
4. На металлической подложке;
5. Со сводным чувствительным элементом (без подложки).

Таблица 1 - Достоинства и недостатки различных подложек

Вид подложки	Достоинства	Недостатки
Бумажная	Дешевизна	Не высокая прочность
Плёночная	Хорошая адгезия с многими связующими	Не высокая прочность

Стеклотканевая	Высокая прочность Хорошо выдерживает циклические нагрузки	
Металлическая	Высокая прочность Возможность приваривания к поверхности	Высокая цена
Без подложки	Малые размеры	Высокая хрупкость датчика

По способу установки на поверхность объекта тензорезисторы делят:

1. Приклеиваемые;
2. Привариваемые;

Приклеиваемые тензорезисторы – это тензорезисторы, закрепляемые на поверхности объекта с помощью связующего.

Таблица 2 - Достоинства и недостатки приклеиваемых тензорезисторов

Достоинства	Недостатки
Легко переносить датчик с одного измеряемого объекта на другой	Не высокая прочность соединения

Привариваемые тензорезисторы - тензорезисторы с металлической подложкой, закрепляемые на поверхности объекта помощью точечной или иной сварки.

Таблица 3 - Достоинства и недостатки привариваемых тензорезисторов

Достоинства	Недостатки
Высокая прочность соединения	Большие сложности при переносе датчика с одного измеряемого объекта на другой

По диапазону измеряемых деформаций тензорезисторы делят на:

1. Для измерения упругих деформаций (предельная измеряемая деформация в пределах диапазона  $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$ );
2. Для измерения упругопластических деформаций (предельная измеряемая деформация за пределами диапазона  $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$ ).

$\text{млн}^{-1}$  (миллионная доля) – единица измерения относительного удлинения проводника тензорезистора.

По наличию или отсутствию термокомпенсации тензорезисторы бывают:

1. Термокомпенсированные;
2. Частично термокомпенсированные;
3. Нетермокомпенсированные;

Термокомпенсированный – это тензорезистор включённый в мостовую схему вместе с ещё одним и более подобными тензорезисторами таким обра-

зом, чтобы последние не участвовали в измерении нагрузки, но имели ту же температуру, что и измеряющий нагрузку тензорезистор.

Частично термокомпенсированный – это тензорезистор у которого при снятии показаний предпринимаются меры по уменьшению влияния эффекта изменения сопротивления проводника при изменении температуры.

Нетермокомпенсированный – это тензорезистор с которого снимаются показания непосредственно, без учёта изменения сопротивления проводника при изменении температуры, а также тензорезистор в мостовой схеме, где нет тензорезисторов направленных на компенсацию эффекта изменения сопротивления проводника при изменении температуры.

Таблица 4 - Достоинства и недостатки различной термокомпенсации

По термокомпенсации	Достоинства	Недостатки
Термокомпенсированные	Легко снимать показания с датчика Отсутствует погрешность в связи с нагревом	Сложность строения датчика
Частично термокомпенсированные	Простота строения датчика	Сложности при снятии показаний с датчика в связи с необходимостью выполнения дополнительных действий для уменьшения влияния температуры
Нетермокомпенсированные	Легко снимать показания с датчика Простота строения датчика	Присутствует погрешность в связи с нагревом

### Заключение

Тензорезистор – это очень ценный элемент датчиков, без которого было бы очень сложно давать возможность ЭВМ определять силы, действующие на различные тела. Благодаря разнообразию тензорезисторов, их можно применять в множестве сфер жизнедеятельности человека, упрощая их.

### Литература

1. Тензорезистор // Википедия. [2022]. Дата обновления: 14.08.2022. URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=1520384&oldid=124803799> (дата обращения: 14.08.2022).
2. Тензорезисторы. Энциклопедия электроники L7805CV [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://l7805cv.ru/resistor-tenzo.html>. - Дата доступа: 14.08.2022.



УДК 621.35

**РУГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ  
DC MOTOR ROTATION REGULATION USING ELECTRONICS DEVICES**

Р. С. Борисюк, И. В. Пигуль

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

Г. Минск, Республика Беларусь

jte@tut.by

R. Borisiuk, I. Pihul

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior lecturer

**Аннотация:** В статье рассмотрена тема цифрового управления скоростью вращения бесколлекторного двигателя постоянного тока. В статье описана работа в соответствии с принципиальной схемой микропроцессорной системы управления БДПТ.

**Abstract:** The article deals with the topic of digital control of the speed of rotation of a brushless DC motor. The article describes the work in accordance with the schematic diagram of the microprocessor control system BDPT.

**Ключевые слова:** двигатель постоянного тока, статор, ротор, датчик углового положения ротора, частота вращения ротора, электромагнитный момент, обмотки якоря, микропроцессор.

**Keywords:** DC motor, stator, rotor, rotor angular position sensor, rotor speed, electromagnetic torque, armature windings, microprocessor.

**Введение**

В начале рассмотрим принцип работы бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ) с системой управления на микропроцессоре.

В двигателях постоянного тока (ДПТ) узел коллектора действует как автоматический переключатель направления тока в обмотке якоря, когда ротор проходит через геометрическую нейтраль. Геометрическая нейтраль – это линия, пролегающая через центр якоря на полпути от полюса N до полюса S системы возбуждения. Поэтому, чтобы создать бесколлекторный двигатель, нужно владеть информацией о положении ротора по отношению к данной нейтрали. Датчики углового положения ротора двигателя используются с целью получения этой информации. Самые распространенные датчики – оптические, индуктивные и емкостные.

Принцип работы оптического датчика заключается в перекрытии с определенным периодом оптического канала оптопары, установленной на статоре, непрозрачными участками диска сетки, установленного на роторах ДПТ. Возникает последовательность импульсов на выходе фотоприемника оптопары, частота повторения которых пропорциональна частоте вращения ротора. Количество импульсов дает представление об угловом положении ротора. Следуя такому положению геометрической нейтрали необходимо определять по специ-

альной отметке на диске сетки пикселей. Сигнал с этого датчика импульсный, то есть содержит ошибку дискретизации.

Принцип работы простых индуктивных датчиков основывается на взаимодействии индукционной катушки, смонтированной на статоре ДПТ, с магнитным полем, которое создаётся постоянным магнитом, смонтированным на роторе. В процессе вращения магнита в катушке индуцируется синусоидальная ЭДС. По её фазовой характеристике можно определить угловое положение ротора. Но эти датчики велики и основательно влияют на магнитные поля в магнитоэлектрической системе ДПТ.

Ёмкостные датчики выполняются с помощью минимум двух электродов, расположенных параллельно и полученных напылением металла на часть внутри статора и на поверхность ротора, выполненную в виде цилиндра (смотреть рисунок 2).

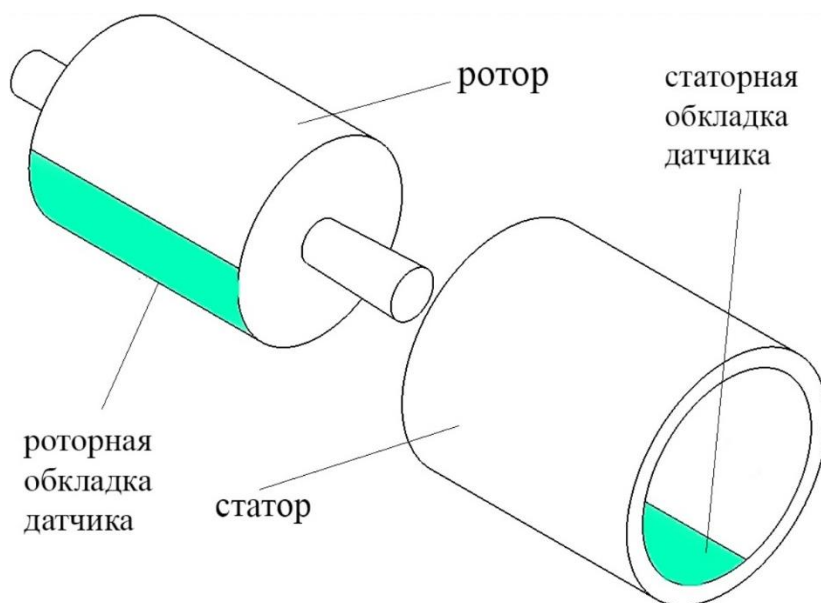


Рисунок 2 – Ёмкостной датчик угла поворота

В результате, в конструкции двигателя формируется вращающийся цилиндрический конденсатор. Его ёмкость пропорциональна углу поворота ротора.

Следуя сигналу датчика угла поворота ротора, во время прохождения обмотки якоря геометрической нейтрали переключается полярность напряжения на ней (изменяется направление тока якоря).

Блок-схема БДПТ отображена на рисунке 3.

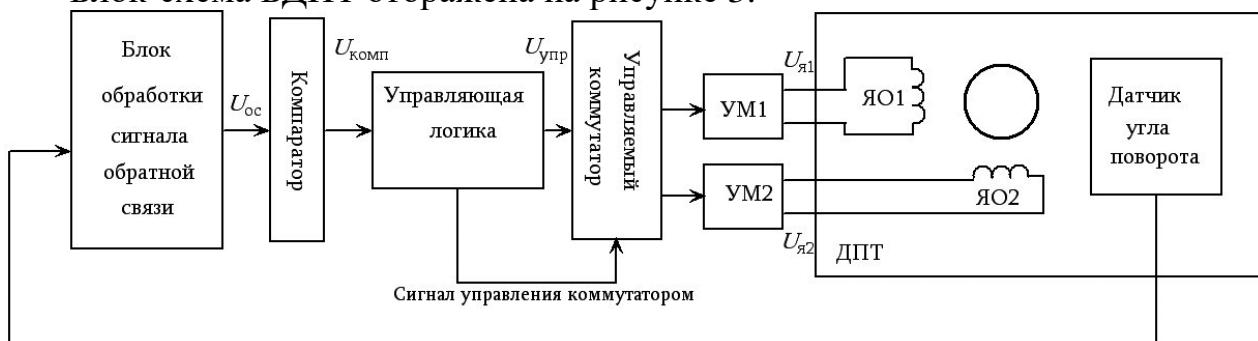


Рисунок 3 – Блок-схема БДПТ

Блок обработки сигнала обратной связи (БОСОС) реорганизует команду с ДПТ (датчика угла поворота ротора) в синусоидальное напряжение ( $U_{ос}$ ), частота которого равновелика угловой скорости вращения ротора, а фаза – угловому расположению ротора касательно геометрической нейтрали (смотреть рисунок 4).

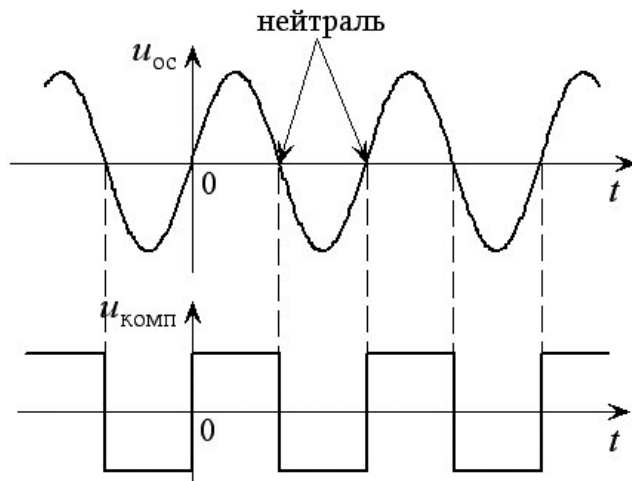


Рисунок 4 – Временные диаграммы напряжений

Компаратор (смотреть рисунок 3) реорганизовывает гармоничный сигнал, который поступает с БОСОС ( $U_{ос}$ ), в порядок импульсов ( $U_{комп}$ ), его передний и задний фронты отвечают моменту времени прохождения ротором расположения нейтрали (смотреть рис. 4).

Блок логики управления создает порядок импульсов  $U_{упр}$  (смотреть рисунок 3), распределяемых контролируемым коммутатором по входам усилителей мощности УМ1, УМ2. Напряжения на выходе усилителей мощности  $U_{я1}$ ,  $U_{я2}$  подаются на обмотки якоря ЯО1 и ЯО2 ДПТ.

Схема, реализующая включение обмоток к источнику постоянного напряжения, описана на рисунке 5.

Работа двигателя в заданном режиме обеспечивается управлением электронных ключей S1-S4.

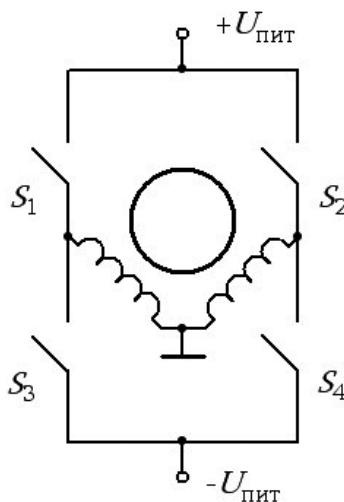


Рисунок 5 – Схема подключения якорных обмоток

Использование микропроцессора, который выполняет функции управляющей логики и управляет коммутатором, даёт возможность по широкому управлению БДПТ.

С помощью микропроцессорного блока, используя внешние датчики положения, освещенности, температуры и так далее, можно осуществлять управление скоростью вращения ротора, следуя заданному режиму работы.

Используя широтно-импульсную систему формирования напряжения обмоток якоря, можно стабилизировать угловую скорость ротора при перемене момента сопротивления на валу ДПТ.

На рисунке 6 представлена принципиальная схема микропроцессорной системы управления БДПТ.

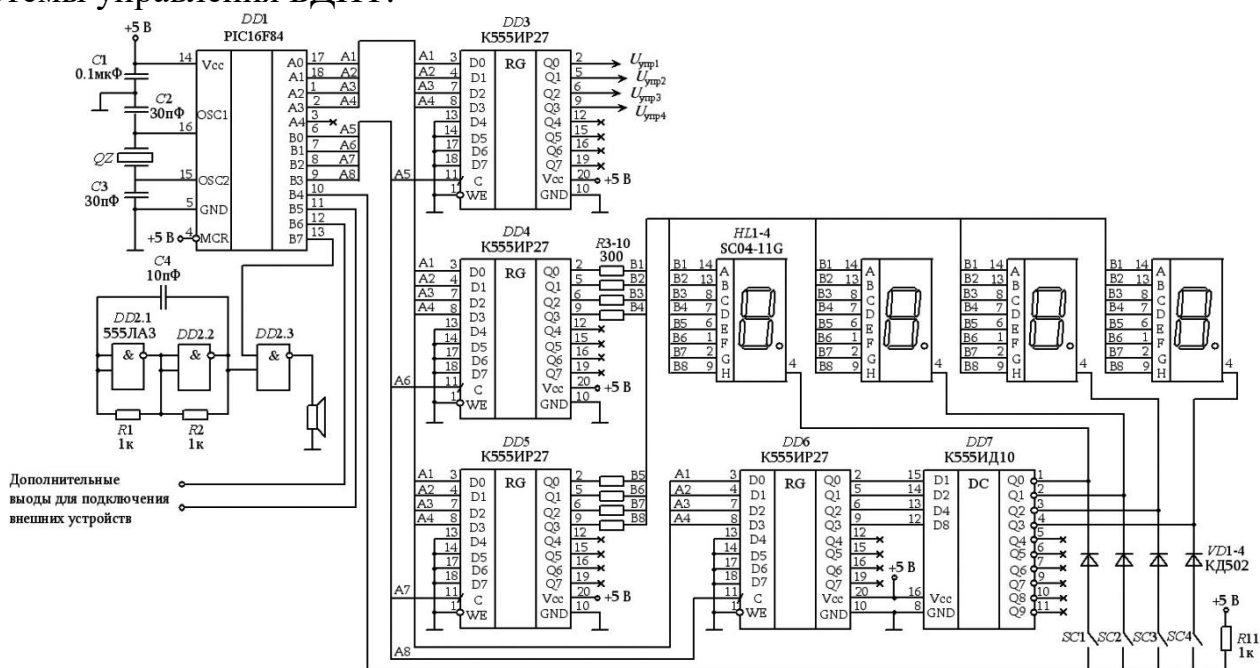


Рисунок 6 – Принципиальная схема микропроцессорной системы управления БДПТ

Микропроцессор PIC16F84 (DD1, рисунок 6) имеет два порта ввода/вывода, PORTA и PORTB, которые можно запрограммировать.

PORTA используется для формирования 4-битной шины данных (A1-4), а PORTB используется для формирования адресной шины (A5-8). Кроме того, на входы процессора через порт В подаются команды с клавиатуры SC1-SC4 (вход В4 PORTB) и обратные сигналы с ДПТ (B5, B6 PORTB).

Выход В7 PORTB управляет простым звуковым генератором, подключенным к трем вентилям микросхемы DD2.

Удобно подтверждать звуковым генератором кнопки клавиатуры и сигнал аварийной работы ДПТ.

Тактовая частота процессора определяется значением кварцевого резонатора QZ.

Регистры памяти DD4, DD5 и DD6 используются для управления системой отображения (четыре 7-ми сегментных светодиода индикатора HL1-4) и клавиатурой SC1-SC4.

Сигналы управления, формируемые микропроцессором, подаётся на обмотки двигателя через регистр DD3 и усилитель мощности (смотреть рисунок 7). Он регулируется по трехфазной схеме биполярных транзисторов, работающих в режиме ключа.

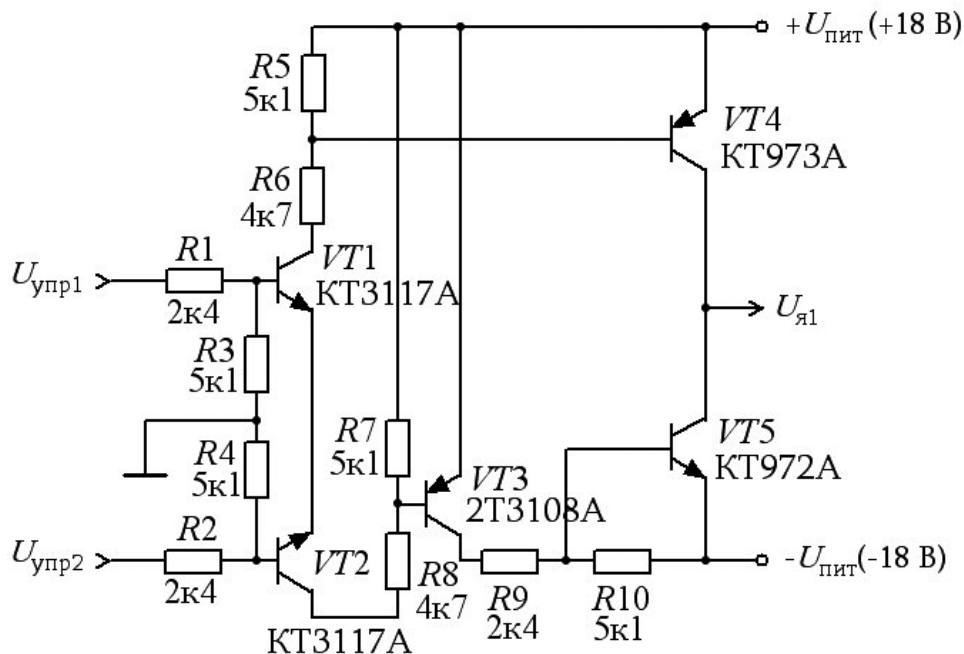


Рисунок 7 – Усилитель мощности

Выходной каскад выполнен в виде двухплечевого эмиттерного повторителя. Так как нагрузка каскада представляет собой низкоомную обмотку двигателя, и по ним протекает большой ток якоря, то на радиатор необходимо установить мощные транзисторы VT4 и VT5.

Рисунок 7 показывает усилитель мощности, который формирует напряжение  $U_{я1}$ . Усилитель также используется для управления второй обмоткой якоря двигателя, которая сдвинута на угол 90 градусов к первой.

На рисунке 8 показаны временные диаграммы напряжений, вырабатываемых системой управления двигателем.

Двухканальный емкостный датчик можно использовать для того, чтобы определить угла поворота ротора. На его выходе мы получаем два синусоидальных напряжения со сдвигом по фазе на 90°.

Данные напряжения преобразуются в последовательность биполярных прямоугольных импульсов с помощью компараторов (на рисунке 8 показано напряжение икомп1).

Период вращения ротора соответствует периоду этих импульсов. На входы микропроцессора В5, В6 ПОРТВ поступают эти сигналы (смотреть рисунок 6).

Микропроцессор создаёт серию импульсов управления  $U_{упр1}$ ,  $U_{упр2}$ ,  $U_{упр3}$ ,  $U_{упр4}$ , подаваемые на обмотки якоря двигателя через усилители мощности.

Соответственно, процессор создаёт условия для выполнения следующих функций:

- Синтез импульсов управления по заданному алгоритму и обработка сигналов обратной связи.

- Опрос клавиатуры и принятие решения об изменении алгоритма формирования управляющих импульсов по результатам исследования (перемена жесткости системы управления и заданной угловой скорости).

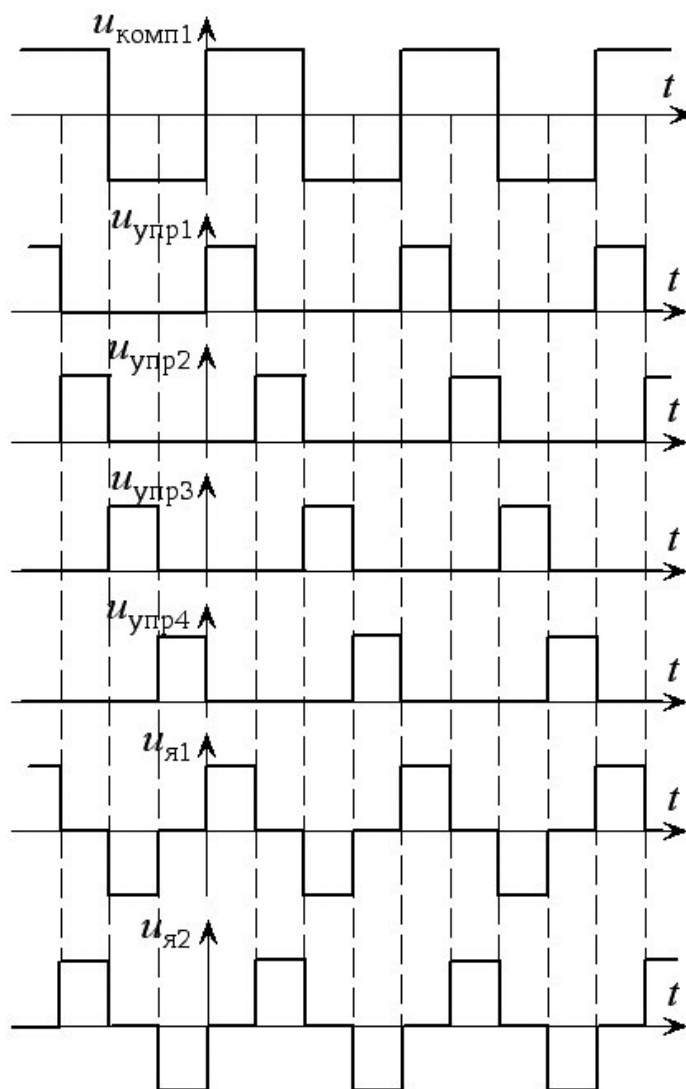


Рисунок 8 – Временная диаграмма напряжений

- 7-сегментный светодиодный дисплей со всей необходимой информацией (данная угловая скорость, фактическая угловая скорость, жесткость системы управления и т. д.).

- Управление звуком при нажатии клавиш на клавиатуре.

Рассмотрим систему стабилизации угловой скорости вращения ротора двигателя постоянного тока.

Схема управления бесколлекторным двигателем постоянного тока с использованием ПС процессора позволяет путем формирования по заданному алгоритму сигналов, подаваемых на обмотки якоря, осуществлять следующие режимы работы двигателя:

- разгон двигателя,
- торможение двигателя,
- стабилизация угловой скорости вращения якоря,

- стабилизация момента, развиваемого двигателем,
- управление скоростью вращения по заданной программе.

Самым популярный способ управлять скоростью вращения двигателя заключается в якорном управлении, то есть в изменении напряжения, подаваемого на якорную обмотку двигателя.

При применении цифровой системы управления достичь изменение напряжения на якорной обмотке можно либо через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), или при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжений.

Рассмотрим работу системы управления угловой скоростью двигателя с использованием широтно-импульсной модуляции напряжений, подаваемых на якорные обмотки, которая является более дешевой по сравнению с системой на цифроаналоговом преобразователе и которая не требует работы усилителя мощности в линейном режиме. Работа транзисторов в ключевом режиме проще и менее энергозатратна.

Напряжение, которое подается на якорную обмотку ДПТ ( $U_{я1}$ ), имеет вид прямоугольных импульсов (смотреть рисунок 9, диаграмма I).

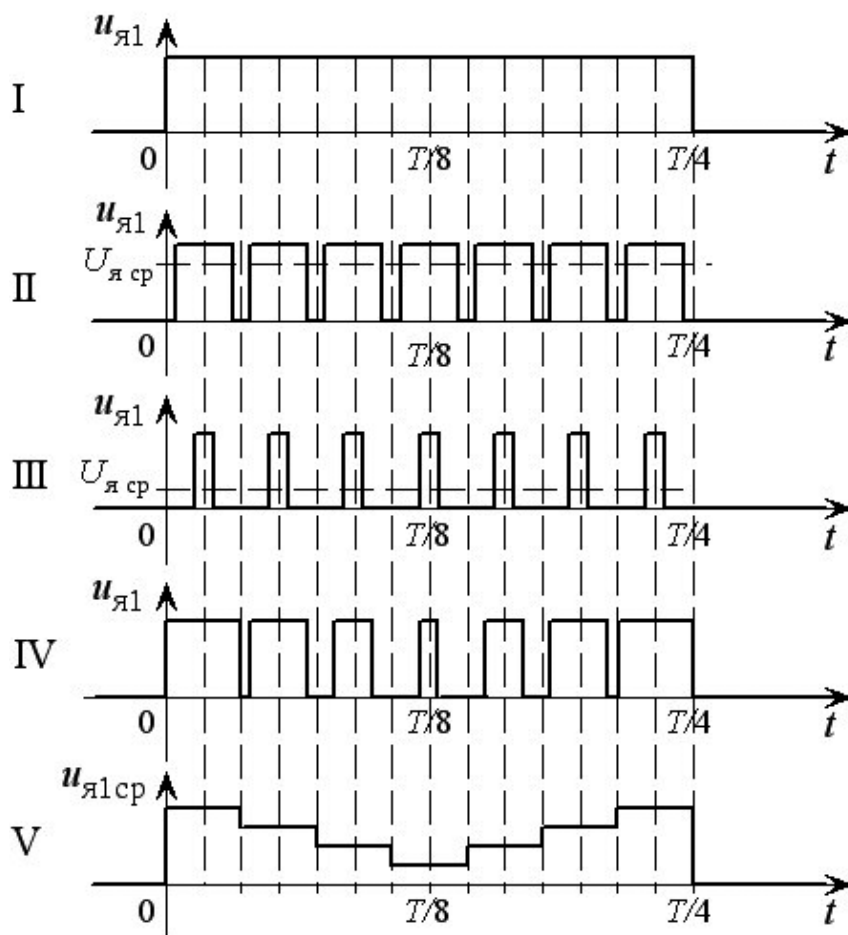


Рисунок 9 – Временные диаграммы напряжений и токов в режиме ШИМ

Разбивая четвертьпериодный интервал на какое-то число импульсов  $n$  (на рисунке 9  $n=7$ ) и формируя ширину импульса в соответствии с поставленной целью, можно добиться:

- понижения среднего значения напряжения  $U_{я1}$ . На рисунке 9 диаграмма II  $U_{ясп}=3,75U_m$ , на рис. 9 диаграмма III  $U_{ясп}=1,25U_m$ ;
- формирования среднего значения напряжения  $U_{я1}$  по заданному закону, например, на рисунке 9 диаграммы IV, V, среднее значение  $U_{я1сп}$  имеет «провал» в середине четвертьпериодного импульса управления.

Для электродвигателей постоянного тока свойственна неустойчивость электромагнитного момента в рамках одного оборота двигателя. Это возникает в связи с изменением плеча приложения электромагнитной силы к ротору. График изменения момента представлен на рис. 10.

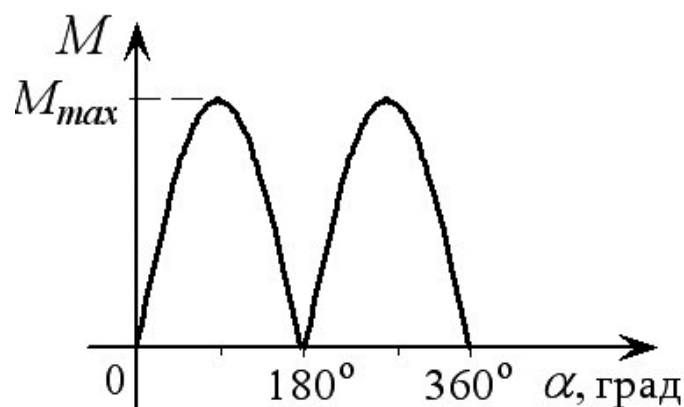


Рисунок 10 – График зависимости изменения момента ДПТ за период вращения

Когда якорь вращается с постоянной скоростью в момент времени прохождения положения геометрической нейтрали якорной обмоткой плечо приложения электромагнитной силы равняется нулю, а при повороте на угол  $90^\circ$  момент максимален.

Якорь ДПТ делают многообмоточным т.к. это необходимо для сглаживания пульсаций момента, которые, помимо этого, ослабляются и за счет инерции ротора. Тем не менее это только понижает, но полностью не исключает пульсации, что сильно ограничивает возможность использования ДПТ с малым моментом инерции в прецизионных электромеханических системах.

Данная система управления ДПТ с использованием ШИМ позволяет скомпенсировать пульсацию момента внутри одного оборота ротора при помощи формирования напряжения  $U_{я1}$  и  $U_{я2}$  по заданному алгоритму.

Для стабилизации угловой скорости вращения ротора была реализована система управления двигателем марки ДБМ-40 с емкостным двухканальным датчиком угла поворота ротора.

Как результат применения ШИМ при формировании напряжения, которое подается на якорную обмотку, была получена механическая характеристика, представленная на рисунке 11.



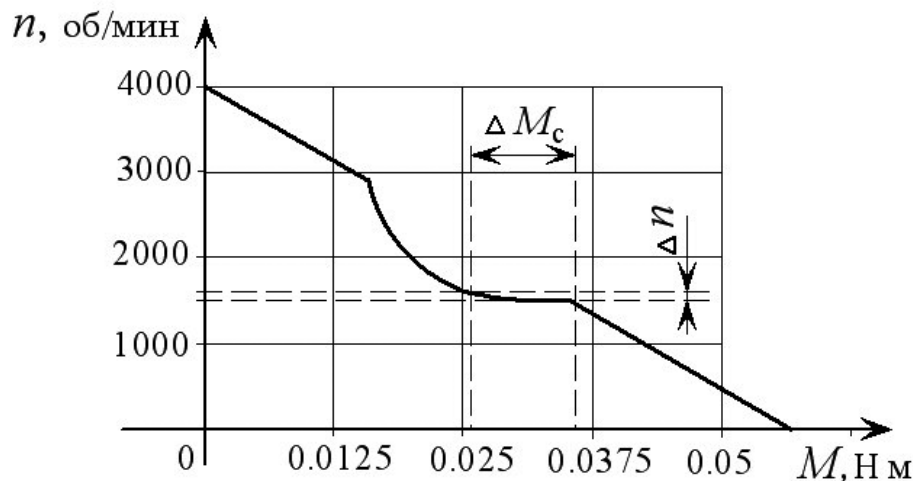


Рисунок 11 – Механическая характеристика бесколлекторного двигателя постоянного тока с широтно-импульсной системой стабилизации скорости вращения

Стабилизация угловой скорости реализуется при помощи широтно-импульсной модуляции напряжения, которое подается на якорные обмотки двигателя.

С увеличением момента сопротивления на валу двигателя и понижением угловой скорости вращения ротора микропроцессор формирует некоторую последовательность управляющих импульсов повышенной скважности  $Q=T_u/t_{ul}$  (смотреть рисунок 9), т.е. повышает среднее значение амплитуды напряжения, которое подается на якорную обмотку. С этим происходит увеличение якорного тока и, разумеется, электромагнитного момента, который может быть развит двигателем. Скорость вращения ротора, в связи с этим, тоже увеличивается.

Использование микропроцессора с табло и клавиатурой позволяет достичь дополнительных возможностей при работе системы управления без остановки и перепрограммирования процессора. Появляется возможность в реальном времени по заданным алгоритмам изменять угловую скорость вращения ротора, включать и отключать системы стабилизации скорости вращения и электромагнитного момента двигателя, на табло можно выводить реальное значение угловой скорости вращения ротора. Также на табло можно наблюдать режим работы двигателя, параметры, которые были заданы, и их отклонение от реальных.

Рассмотрим описание алгоритма работы системы стабилизации угловой скорости вращения ротора.

В алгоритм работы микропроцессора входит несколько этапов. На начальном этапе происходит программирование портов ввода-вывода, загрузка констант и исходных параметров режимов управления в регистры оперативной памяти микропроцессора.

Впоследствии чего по сигналам обратной связи, снимаемым с датчика угла поворота ротора (входы B5, B6 микропроцессора, см. рис. 6), микропроцессором формируются управляющие импульсы  $U_{ynp1}, U_{ynp2}, U_{ynp3}, U_{ynp4}$

(смотреть рисунок 8) таким образом, дабы гарантировать наибольшую скорость разгона двигателя (скважность  $Q=1$ ).

Очередность фронтов импульсов, поступающих на входы В4, В5, соответствует четвертьпериодным отметкам при вращении ротора.

В момент прихода фронта процессор осуществляет расчет периода вращения якоря по данным внутреннего таймера и соотносит его с заданным. При этом снимается информация с клавиатуры и при изменении начальных параметров, изменяются константы и режимы, которые были записаны в оперативной памяти.

В момент, когда период вращения якоря достигает заданных значений, запускается алгоритм стабилизации угловой скорости. Работа алгоритма производится следующим образом:

- значение периода вращения якоря, которое было измерено, соотносится с заданным (записанным в регистре оперативной памяти);
- в зависимости от величины рассогласования, знака и заданной жесткости системы управления меняется ширина импульсов управления ( $t_1$ , смотреть рисунок 9), подаваемых на обмотки возбуждения якоря так, чтобы привести значение рассогласования к нулю.

При появлении на входе процессора заднего фронта четвертьпериодного импульса обратной связи он выводит значения измеренного и/или заданного периода вращения якоря на индикаторы. Измерение периода осуществляется способом подсчета тактовых импульсов за каждые четверть периода вращения якоря двигателя.

Опрос клавиатуры производится при помощи системы прерывания по изменению сигнала на входе *В4 PORTB* процессора (смотреть рисунок 6).

### **Заключение:**

Предложенная схема системы управления двигателем постоянного тока имеет большой потенциал и широкие возможности. При помощи широтно-импульсной модуляции напряжения, которое подается на якорные обмотки, можно производить разгон двигателя, а также: торможение, управление угловой скоростью по предварительно заданной программе, производить стабилизацию угловой скорости при изменении момента сопротивления на валу двигателя и компенсацию пульсации электромагнитного момента внутри 1-го оборота вращения ротора двигателя.

Вспомогательное внедрение клавиатуры и индикаторного табло позволяет производить изменение режима работы двигателя, менять параметры вращения, жесткости системы управления в моменте его работы не перепрограммируя микропроцессор. Применение индикаторного табло делает наглядным и более комфортным контроль за работой двигателя.

## **Литература**

**список литературы**

УДК 621.356

**РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
REGULATORS TENSION VARIABLE AC**

В.В. Гарновский

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

jte@tut.by

V. Harnouski

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

***Аннотация:** Предложены структурные схемы, а также принципы работы следующих регуляторов напряжения переменного тока: а) регуляторы напряжения переменного тока на тиристорах; б) регуляторы напряжения переменного тока на транзисторах.*

***Abstract:** Block diagrams are proposed, as well as the principles of operation of the following AC voltage regulators: a) AC voltage regulators on thyristors; b) AC voltage regulators on transistors.*

***Ключевые слова:** регулятор, транзистор, тиристор, вентиль, источник напряжения, электродвигатель.*

***Keywords:** regulator, transistor, thyristor, valve, voltage source, electric motor.*

**Введение**

В электрических схемах для изменения уровня выходного сигнала используется регулятор напряжения. Основное его назначение - изменять подаваемую на нагрузку мощность. С помощью устройства управляют оборотами электродвигателей, уровнем освещённости, громкостью звука, нагревом приборов. Регулирование напряжения можно выполнять на первичной и вторичной сторонах регулятора с целью получения на нагрузке номинального напряжения при колебании напряжения сети от 175 вольт до 242 вольт.

Регулятором напряжения называется электронный прибор, служащий для повышения или понижения уровня выходного сигнала, в зависимости от величины разности потенциалов на его входе. То есть это устройство, с помощью которого можно управлять значением мощности, подводимой к нагрузке. При этом регулировать подаваемый уровень энергии можно как на реактивной, так и активной нагрузке. Регулировку можно выполнять как минимум тремя способами: а) установкой автотрансформатора перед первичной обмоткой регулятора; б) выполнением отводов от первичной обмотки трансформатора с интервалом напряжения 2-5 вольт в диапазоне колебания напряжения сети; в) применением тиристорных и транзисторных регуляторов.

**Регуляторы напряжения переменного тока на тиристорах**

В управляемых выпрямителях используются управляемые вентили – тиристоры. Регулирование осуществляется за счет задержки момента прохождения тока через вентиль по отношению к моменту его собственного отпирания.

На рис. 1, а приведена схема однофазного преобразователя переменного напряжения, а на рис. 2, а диаграмма её напряжения на нагрузке. Изменение действующего значения напряжения на нагрузке осуществляется изменением угла управления  $\alpha$ . Такое регулирование называется фазовым. При этом даже при активной нагрузке ухудшается  $\cos\phi$  и коэффициент мощности. Такая схема применяется для регулирования активных и активно-индуктивных нагрузок: ламп накаливания, а также однофазных двигателей тока.

В схеме рис. 1, б применены запираемые тиристоры, что позволяет получить на нагрузке напряжение в соответствии с рис.2, б или рис. 2, в. При этом  $\cos\phi$  может быть меньше или равен 1, но угол сдвига  $\phi$  получается опережающим или равным нулю. При таком регулировании печь сопротивления представляет для сети как бы емкостную нагрузку.

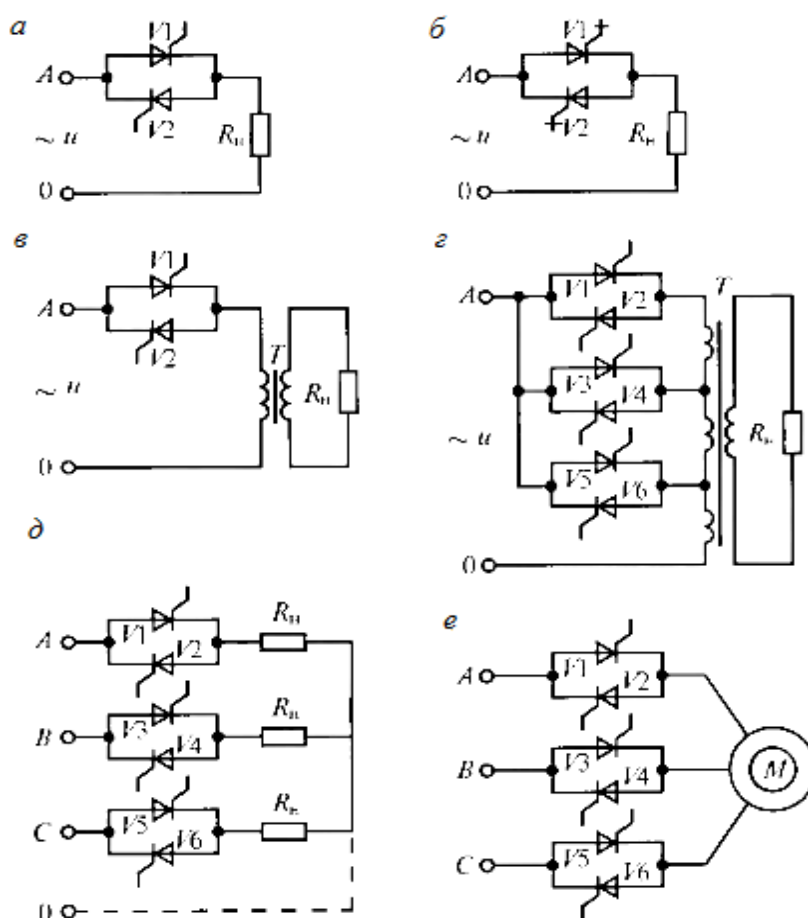


Рисунок 1 - Регуляторы переменного напряжения на тиристорах: а, б -однофазные; в, г –в первичной обмотке трансформатора и трансформатора с отпайками; д,е – трёхфазные с активной нагрузкой и двигателем

Импульсная модуляция на высокой частоте (ИМ-ВЧ) (см. Рис. 2, г) позволяет получать при небольшом фильтре синусоидальную гладкую составляющую тока, потребляемого из сети, и напряжения на нагрузке при  $\cos\phi=1$ . Импульсная модуляция на низкой частоте (ИМ-НЧ) иллюстрируется рис. 2, д. Ко-

Эффект мощности одиночного регулятора не зависит от способа импульсной модуляции, а определяется глубиной регулирования.

Диапазон номинальных значений напряжений и токов электрических нагрузок очень широк. Для согласования с напряжением сети применяются трансформаторы. При малых или очень больших напряжениях нагрузки для регулирования целесообразно включать тиристорные ключи на первичной стороне трансформатора, однако при этом возникает ряд проблем, связанных с насыщением трансформатора.

Фазовое регулирование может быть применено для регулирования скорости асинхронного двигателя (рис. 1, д). Такое регулирование получило очень широкое применение в устройствах для ограничения пусковых токов асинхронных двигателей. В устройствах для плавного пуска асинхронных двигателей угол управления плавно уменьшается от начального значения до полного включения тиристоров. При этом пусковые токи снижаются в 2...3 раза.

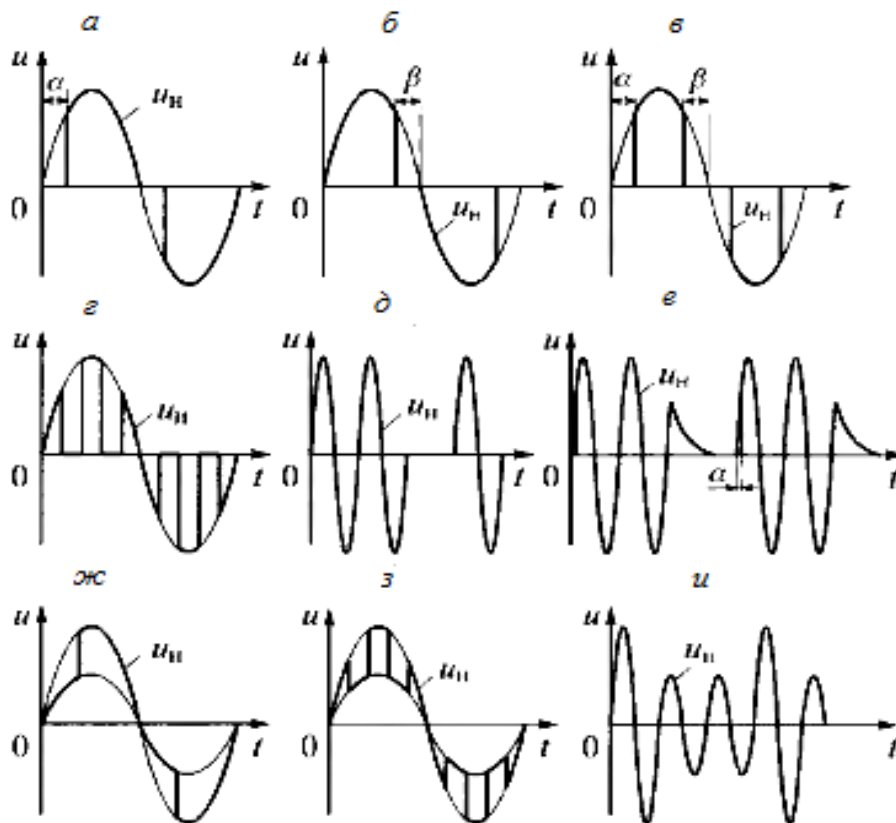


Рисунок 2 - Диаграммы напряжений при: (а,б,в - ИМ-ОЧс  $\alpha > 0, \beta > 0, \alpha = \beta$ ), г - ИМ-ВЧ, д - ИМ-НЧ; многозонные ИМ-ОЧ(ж), ИМ-ВЧ(з), ИМ-НЧ(и)

### Регуляторы напряжения переменного тока на транзисторах

В отличие от обычных тиристоров, полностью управляемые силовые электронные ключи позволяют обеспечить синусоидальность выходного напряжения регулятора методами импульсной модуляции. При этом обычно используются двунаправленные ключи, способные блокировать прямое и обратное напряжение, примеры схем которых даны на рис. 3. Условно регуляторы с учетом выполняемых функций можно разделить на две группы:

- регуляторы с непосредственным регулированием входного напряжения;
- регуляторы с добавлением (вычитанием) определенного значения напряжения к входному напряжению основного источника питания.

Регуляторы первой группы предназначены для регулирования выходного напряжения в диапазоне от нуля до максимального входного.

Регуляторы второй группы применяются для стабилизации выходного напряжения при относительно неглубоких отклонениях входного напряжения и других возмущающих факторах.

Пример схемы регулятора первого типа приведен на рис.3. Принцип работы схемы аналогичен принципу работы понижающего преобразователя (регулятора) постоянного тока в постоянный. Наличие ключа  $S2$  в данном случае необходимо, если нагрузка не является чисто активной. В большинстве случаев нагрузка носит активно-индуктивный характер, поэтому разрыв цепи нагрузки недопустим, так как необходимо создать условия корректной коммутации, исключающей скачки тока в индуктивности нагрузки. С этой целью параллельно нагрузке подключается ключ  $S2$ , шунтирующий ток нагрузки на интервалах выключенного состояния ключа  $S1$ . Таким образом ключи  $S1$  и  $S2$  включаются и выключаются в противофазе.

Система управления СУ, управляя ключами  $S1$  и  $S2$ , обеспечивает ШИМ (шиотно-импульсная модуляция) входного напряжения. Возможны различные законы модуляции. При значительных отклонениях формы входного напряжения от синусоидальной посредством соответствующего алгоритма ШИМ может быть обеспечена синусоидальность выходного напряжения. Даже при незначительных расхождениях в интервалах включенного и выключенного состояний ключей  $S1$  и  $S2$  на них возможно возникновение перенапряжений.

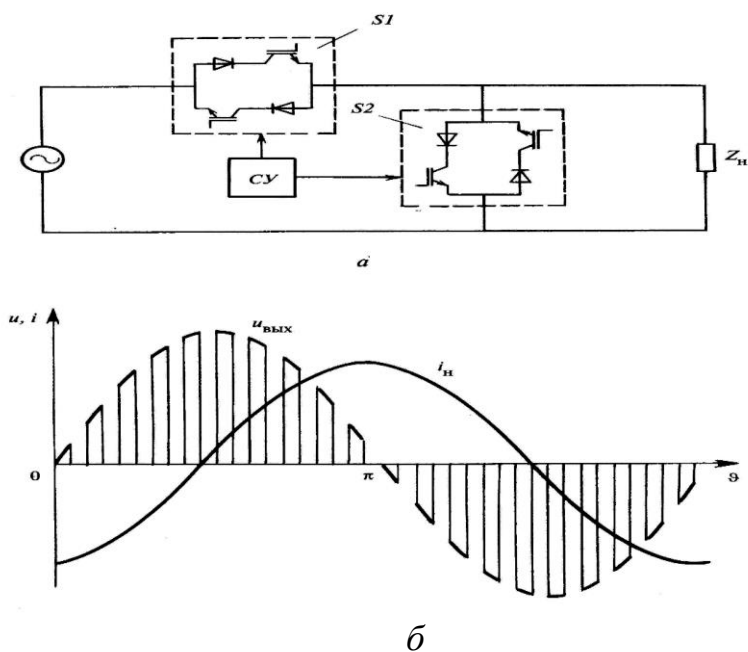


Рисунок 3 - Регулятор с непосредственным регулированием: а-схема; б - диаграммы выходного напряжения и тока

Варианты схем регуляторов второй группы представлены на рис. 4. В схеме на рис. 4, а выходное напряжение может изменяться в диапазоне напряжений входного автотрансформатора  $AT$  от  $U_1$  до  $U_2$ . Величина добавляемого напряжения определяется скважностью работы ключей  $S1, S2$ , переключающихся в противофазе (рис. 4, б). Пример схемы с последовательным включением источника напряжения приведен на рис. 4, в.

В качестве источника напряжения используется преобразователь напряжения с синусоидальной модуляцией, способный работать в общем случае в четырех квадрантах. На вход инвертора подается напряжение от выпрямителя  $B$ . Для уменьшения пульсаций выходного напряжения инвертора, создаваемых импульсной модуляцией, на выходе необходимо включать  $LC$ -фильтр.

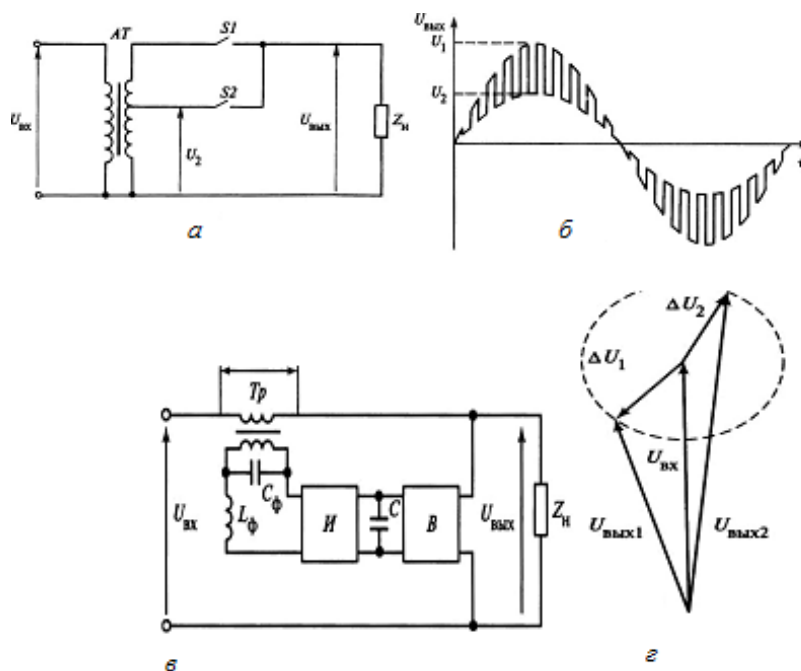


Рисунок 4 - Регулятор с добавлением напряжения к входному напряжению основного источника питания: а — схема регулятора; б — диаграмма выходного напряжения регулятора; в — структурная схема регулятора с последовательным включением источника напряжения; г — векторная диаграмма

Из векторной диаграммы (рис. 4, г) видно, что выходное напряжение может изменяться не только по величине, но и по фазе.

Очевидно, что в соответствии со структурой регулятора, представленного на рис. 4, в, могут создаваться сложные устройства с различными техническими характеристиками и функциональными возможностями. Наиболее простая схема представлена на рис. 5, а. Напряжение вторичной обмотки трансформатора  $Tr$  может формироваться в противофазе к основному напряжению посредством ключей  $S1—S4$ .

Повышение или понижение выходного напряжения регулятора относительно входного реализуется не только введением последовательно включенного источника напряжения, но также и посредством сдвига фаз входного и выходного напряжения, создаваемого включенным между ними реактивным элементом, например реактором индуктивностью  $L$  (рис. 5, б).

В зависимости от значения и характера тока, потребляемого из сети, равного сумме токов нагрузки  $I_H$  и компенсатора  $I_K$ , изменяется входное напряжение. Таким образом можно обеспечить стабильность напряжения на нагрузке при изменениях входного напряжения или нагрузки  $Z_H$ .

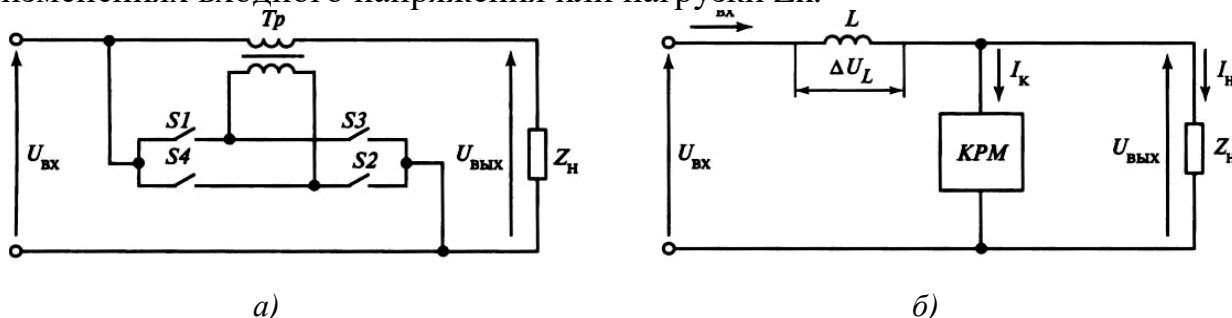


Рисунок 5 - Регуляторы переменного напряжения: а — схема с последовательным включением источника напряжения; б— схема регулятора с реактором

### Заключение

Регуляторы напряжения переменного тока относятся к устройствам, которые могут работать как прямой преобразователь напряжения переменного тока, а также как электронный прерыватель, выполняющий функции включения и выключения электрической цепи переменного тока. Они имеют широкую сферу применения на сегодняшний день.

### Литература

1. –Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6270824/page:65/>. –Дата доступа: 19.10.2022.
2. –Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6270824/page:66/>. –Дата доступа: 19.10.2022.
3. –Режим доступа: [https://studme.org/236013/tehnika/regulatory\\_peremennogo\\_toka](https://studme.org/236013/tehnika/regulatory_peremennogo_toka). – Дата доступа: 19.10.2022.



УДК 621.3.083.1

**ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛЫ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ  
И МОЩНОСТИ**  
**TRENDS IN CURRENT, VOLTAGE, AND POWER MEASUREMENTS**

В.В. Сенюта

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

jte@tut.by

V. Senyuta

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

***Аннотация:** В статье рассмотрены этапы развития приборов для измерения силы тока, напряжения, мощности, рассмотрены характеристики приведённых приборов, выдвинуто предположение о дальнейшем развитии измерения данных величин.*

***Abstract:** The article is devoted to the stages of development of instruments for measuring current, voltage, power, considered the characteristics of the given instruments, assumed the further development of measurement of these parameters.*

***Ключевые слова:** измерение, прибор, ток, напряжение, мощность, амперметр, вольтметр, ваттметр.*

***Key words:** measurement, instrument, current, voltage, power, ammeter, voltmeter, wattmeter.*

### **Введение**

«Измерение – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств».

Измерения – один из значительных путей изучения природы людьми. С помощью них можно количественно оценить окружающий мир и выявить действующие закономерности. Точные науки базируются на том, что измерения позволяют определить точные количественные соотношения, которые описывают объективные законы природы. Ток, напряжение и мощность являются основными характеристиками электричества и внесены в основные единицы измерения СИ.

### **Основная часть**

#### **История появления электроизмерительных приборов**

«Электроизмерительный прибор – прибор, предназначенный для измерения электрической или неэлектрической величины электрическими средствами».

Для измерения силы электрического тока используют амперметры; для измерения электрического напряжения – вольтметры и потенциометры; мощности электрического тока – ваттметры и варметры.

До открытия Кулоном закона о взаимодействии электрических зарядов, их величину оценивали визуально или через физические ощущения наблюдателя, получавшего разряд через прикосновение.

Это открытие Кулон смог осуществить благодаря изобретённому им электростатическому измерительному прибору – крутильным весам (рис. 1). В первоначальном варианте прибор состоял из упругого вертикального подвеса с лёгким уравновешенным стержнем. Под действием силы притяжения зарядов, стержень поворачивался в горизонтальной плоскости до момента уравновешения этих сил силой упругости подвеса.

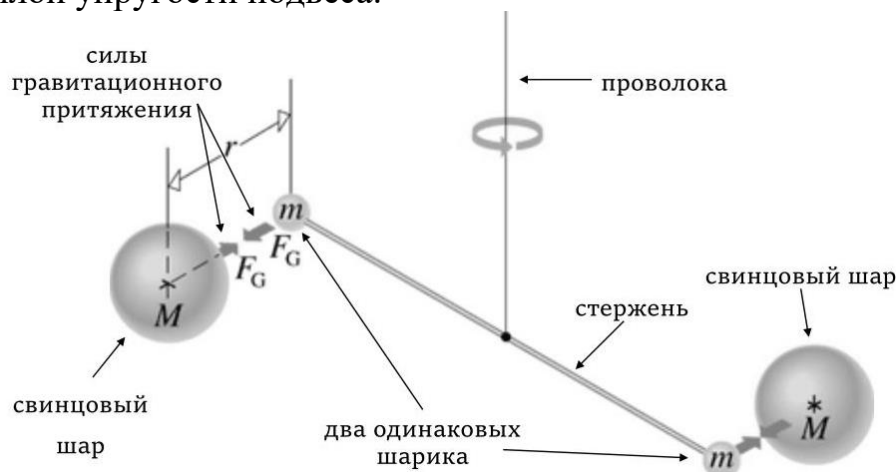


Рисунок 1 - Схема крутильных весов

В XIX исследования электричества набирают стремительные обороты. Большой вклад в развитие электроизмерительной техники внёс М.О. Доливо-Добровольский. Он является разработчиком электромагнитных амперметров, вольтметров, ваттметра и фазометра, представляющих собой индуктивные приборы на основе вращающихся магнитных полей, и ферримагнитного ваттметра.

Приборы для измерения тока, напряжения и мощности на современном этапе. Самый распространённый метод измерения тока – прямой. Это метод, при котором искомое значение находят из показаний приборов. Прибором для прямого метода измерений тока является амперметр.

Основное требование к амперметру, из-за его подключения в разрыв цепи – обеспечить наименьшее количество внутреннего сопротивления для минимизации вносимой погрешности измерения.

Типы амперметров:

1. Стрелочный (аналоговый) – тип прибора магнитоэлектрический. Основа прибора – магнитоэлектрический механизм, он обеспечивает необходимое перемещение указательной стрелки (рис.2).
2. Особенностью данного типа прибора является необходимость соблюдения полярности подключения, также прибор не может использоваться для измерений при изменении величины тока с частотой, большей нескольких десятков Гц. Данная особенность появляется из-за наличия собственного момента инерции, при наличии значительной амплитуды переменной составляющей тока, рамка может остаться неподвижной.



Рисунок 2 - Строение магнитоэлектрического механизма

3. Амперметр с датчиком на основе эффекта Холла (рис.3). По величине холловского напряжения можно судить о напряженности магнитного поля и, следовательно, о величине тока в проводнике.

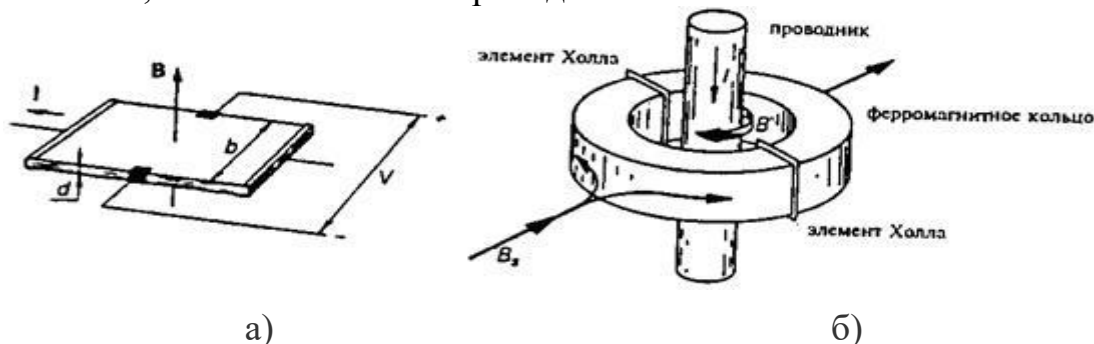


Рисунок 3 - Датчик Холла (а) и устройство для измерения постоянного тока (б)

4. Цифровой амперметр. Состоит из компаратора и преобразователя напряжения, а также резисторов, цифрового процессора и устройства вывода данных на дисплей (рис.4). Компаратор преобразует аналоговые данные о силе тока в цифровой сигнал. Далее данные выводятся на экране.

Преимущество цифрового амперметра заключается в том, что он выводит информацию без задержки, в то время как аналоговые амперметры показывают значение тока не сразу, а через некоторое время после включения в сеть. Также цифровые амперметры имеют высокую точность и помехоустойчивость.

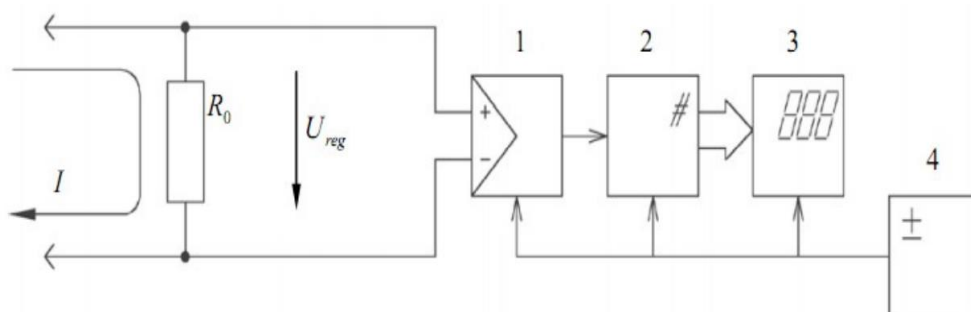


Рисунок 4 - Структурная схема цифрового амперметра: 1 – усилитель напряжения; 2 – АЦП; 3 – цифровой индикатор; 4 – источник питания

Измерение постоянного напряжения.

Под напряжением понимают разность потенциалов между двумя точками. Прибором для измерения является вольтметр. Вольтметры подключаются параллельно, между точками в которых нужно измерить напряжение (рис.5).

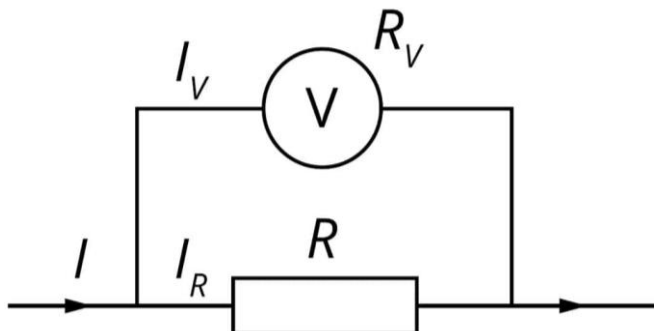


Рисунок 5 - Способ измерения напряжения на концах элемента R

При таком соединении часть тока будет протекать не только через проверяемый элемент, но и через вольтметр. Из этого следует, что измерение меняет значение искомой величины.

Типы вольтметров:

1. Электростатический вольтметр. На одном электроде накапливаются положительные заряды, на другом отрицательные (рис.6). Данные приборы не получили широкое распространение из-за невысокой чувствительности, однако с высокой точностью измеряют напряжение в высоковольтных цепях.

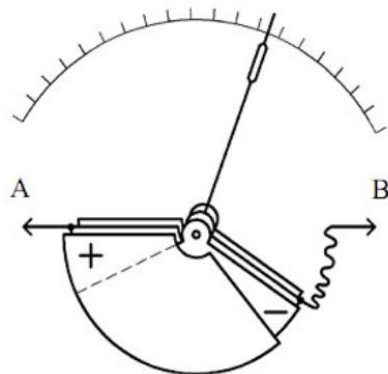


Рисунок 6 - Электростатический стрелочный вольтметр

2. Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа – основан на использовании закона Ома (рис.7). Простой и надёжный прибор, из-за этих качеств получил широкое распространение.

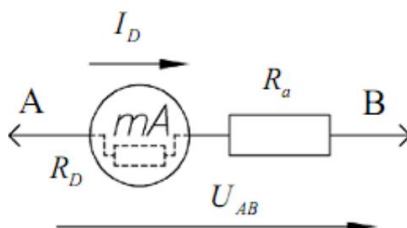


Рисунок 7 - Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа

3. Цифровой вольтметр. Требуется использование дополнительного источника энергии, он вызывает помехи, влияющие на сопротивление. Входное устройство обеспечивает точное масштабирование напряжения (рис.8).

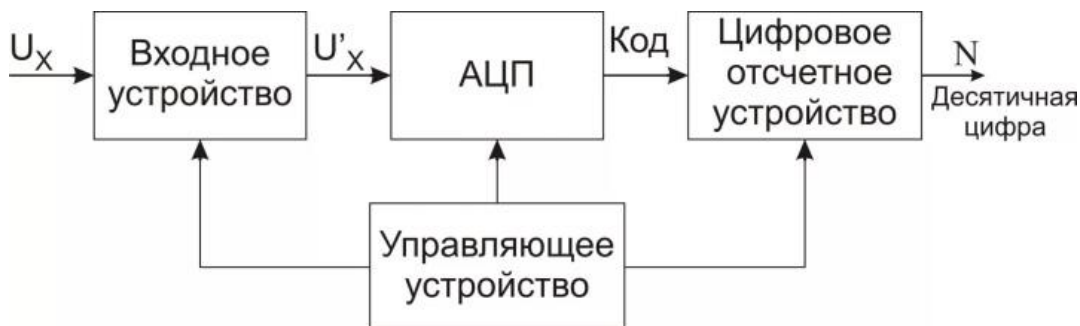


Рисунок 8 - Упрощённая структурная схема цифрового вольтметра

### Измерение мощности в цепях постоянного тока

Для измерения мощности используют зависимость мощности от тока и напряжения. Так как прямые колориметрические измерения нередко оказываются длительными и трудоёмкими. Прибором для измерения мощности служит ваттметр.

### Электродинамический стрелочный ваттметр

Особенностью данного типа прибора является возможность работы в цепях постоянного и переменного тока.

При протекании тока  $I_1$  через неподвижную катушку в ней создается магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий витки подвижной катушки. Если через подвижную катушку будет протекать ток  $I_2$ , то к каждой стороне рамки будет приложена сила Ампера, возникнет вращающий момент (рис.9).

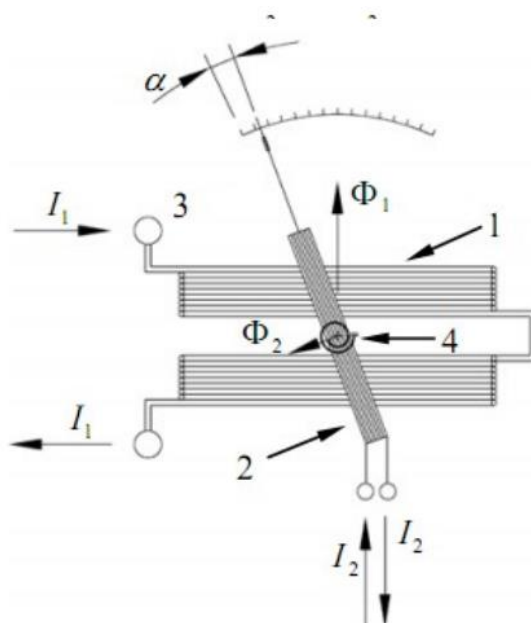



Рисунок 9 - Электродинамический стрелочный ваттметр

Условные графические обозначения типа измерительного механизма, наносимые на шкалу измерительного прибора

Тип измерительного элемента	Условное обозначение	Тип измерительного элемента	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой		Прибор электромагнитный	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем		Прибор электродинамический	
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой		Прибор электростатический	

### Перспективы развития

Существует проблема автоматизации управления технологическими, испытательными и другими процессами. С учётом данной проблемы и появляется разнообразие видов измерений, измерительной техники, повышается точность и быстродействие измерений.

Основной метод улучшения возможной средств измерений заключается во внедрении программируемых ЭВМ.

Переход от простейших к современным измерительным средствам происходил в данной последовательности:

- электромеханические измерительные механизмы (ИМ);
- измерительные механизмы с дополнительными устройствами;
- электронные измерительные приборы (ЭИП);
- цифровые измерительные приборы (ЦИП);
- информационно-измерительные системы (ИИС);
- измерительно-вычислительные комплексы (ИВК);
- процессорные измерительные средства (ПрИС)
- интеллектуальные информационно-измерительные системы (ИИИС).

### Заключение

В прошлом столетии упор был на повышении точности измерений электроэнергии и минимальном наборе показателей качества, то с начала XXI века приоритет – это обеспечение безопасности энергосистем, качество и надёжность электроэнергии.

### Литература

.Атамаян Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин : учеб, пособие для втузов / Э. Г. Атамаян. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Дрофа, 2005. — 415 с.

1. Панфилов В. А. Электрические измерения : учебник для студ. сред. проф.образования / В. А. Панфилов. — 5-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2008 — 288 с

2. Тараканов, В.П. Информационно-измерительная техника и электроника. Электрические измерения в системах электроснабжения : учеб. метод. пособие / В.П. Тараканов, М.С. Макеев. —: Изд-во ТГУ, 2013 – 88 с.

УДК 621.586

**ИЗМЕРИТЕЛИ – РЕГУЛЯТОРЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ  
MICROPROCESSOR THERMOSTAT**

К.А. Чабанова, И. Пряник

Научный руководитель – Т.Е. Жуковская, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
jte@tut.by

К.А. Chabanova, I. Pryanik  
Supervisor – T.E. Zhukovskaya, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются терморегуляторы микропроцессорные, возникновение, виды и назначения ТРМ, принцип работы и преимущества использования на производстве.*

***Abstract:** this article discusses microprocessor temperature controllers, the emergence, types and purpose of TRMs, the principle of operation and the advantages of using them in production.*

***Ключевые слова:** Терморегулятор микропроцессорный, термодатчик, контроллеры, ТРМ.*

***Keywords:** Thermostat microprocessor, temperature sensor, controllers, TRM.*

**Введение**

Терморегулятор – элемент автоматического регулирования отопительного или охлаждающего оборудования. Поддерживает температуру на уровне, заданном потребителем.

Используются в установках искусственного климата, в охлаждающих и морозильных установках, в системах обогрева помещений, в тепличном хозяйстве.

В 50-х годах 20 века, в эру развития систем автоматизации, появляются первые устройства для автоматического управления технологическими процессами и установками, осуществляющие поддержание технологических параметров на заданных значениях – регуляторы. Данные приборы принимают от первичного преобразователя текущие значения параметра, производят аналоговую обработку этого сигнала и выдают управляющий сигнал на исполнительный механизм.

**Основная часть**

Существуют два вида регуляторов прямого и непрямого действия.

1. Регуляторы прямого действия (управляют исполнительным механизмом за счет энергии, получаемой от регулируемой среды)

2. Регуляторы непрямого действия (управляют исполнительным механизмом за счет энергии, получаемой от постороннего источника).

Чуть позже, в конце 80-х годов, появляются более совершенные устройства, обрабатывающие информацию в цифровом виде при помощи процессоров



– контроллеры. Эти устройства обладают более широкими возможностями и не только выполняют функции регулирования, но и заменяют релейные схемы управления и сигнализации. Контроллеры могут отображать параметры на индикаторах и создавать архивы параметров, т.е. выполнять функции вторичных показывающих и регистрирующих приборов. Также они могут вести журналы событий (фиксация неисправностей оборудования, его включение и отключение, отклонения параметров от заданных значений и т.д.), которые, до появления контроллеров, заполнялись операторами технологических процессов вручную. [1]

#### Виды и принципы работы ТРМ

Измеритель-регулятор микропроцессорный одноканальный ТРМ1 совместно с первичным преобразователем (датчиком) предназначен для измерения и регулирования температуры и других физических параметров, значение которых внешним датчиком может быть преобразовано в сигналы постоянного тока или напряжения.

Прибор может быть использован для измерения и регулирования технологических процессов в различных отраслях промышленности, коммунального и сельского хозяйства и др.

Прибор позволяет осуществлять следующие функции:

- измерение температуры или других физических величин (давления, влажности, расхода, уровня и т.п.) в одной точке с помощью стандартных датчиков, подключаемых к универсальному входу прибора;
- регулирование измеряемой величины по двухпозиционному (релейному) закону;
- отображение текущего измерения на встроенном светодиодном цифровом индикаторе;
- формирование выходного тока 4...20 мА или напряжения 0...10 В для регистрации или управления исполнительными механизмами по П-закону (при использовании в качестве выходного устройства цифроаналогового преобразователя (ЦАП)).

Терморегулятор обладает встроенным или выносным термодатчиком, который устанавливается в свободной от прямого воздействия отопительных приборов зоне и снабжает терморегулятор информацией о температуре воздуха в зоне расположения самого термодатчика. На основе этих данных терморегулятор управляет отопительными приборами в помещении. [2]



Рисунок 1 – Терморегулятор микропроцессорный

### **Назначение популярных моделей терморегуляторов**

Назначение ПИД-регулятора ТРМ10.

Терморегулятор ОВЕН ТРМ10 предназначен для измерения температуры или другой физической величины (веса, давления, влажности и т. п.), импульсного или аналогового управления нагрузкой по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону, а также для формирования дополнительного сигнала, который может быть использован для сигнализации о выходе параметра за установленные границы или для двухпозиционного регулирования.

Назначение измерителя 2ТРМ0

Измеритель 2ТРМ0 предназначен для измерения температуры теплоносителей и различных сред в холодильной технике, сушильных шкафах, печах различного назначения и другом технологическом оборудовании, а также для измерения других физических параметров (веса, давления, влажности)

Назначение терморегулятора ТРМ12

Терморегулятор ОВЕН ТРМ12 предназначен для автоматизации подачи теплоносителя в системе ГВС, газового и парового отопления, в теплообменники пастеризаторов, для управления газовыми горелками, управления положением золотника в холодильных машинах, а также в другом технологическом оборудовании, где используются запорно-регулирующие или трехходовые клапаны и задвижки с электроприводом. [3]

Связь ТРМ и метрологии

Ни один из приборов, задействованных в производстве, не обходится без проверки метрологов. Будь это первичная или периодическая проверка, ТРМ не исключение.

Проверкой называется комплекс мероприятий, осуществляемых для определения соответствия прибора (средства измерения) заявленным метрологическим требованиям и нормам.

После процесса проведения проверки СИ в поверительном органе выписывается свидетельство о проверке или наносится поверительный знак (клеймо). На средстве измерений (приборе) должно предусматриваться место для нанесения поверочного клейма.

Проверка выполняется в целях подтверждения соответствия средства измерения установленным метрологическим требованиям.

Цель проверки — выяснить, соответствуют ли характеристики средства измерения регламентированным значениям и пригодно ли оно к применению по прямому назначению. Меж поверочный интервал у ТРМ 2 года. [4]

Как происходит проверка ТРМ

Средства проверки:

При проведении проверки приборов должны применяться средства измерений, указанные в таблице:

Наименование и тип СИ	Основные технические характеристики
Компаратор напряжений Р 3003	кл. т. 0,0005
Калибратор тока П 321	осн. погрешность $\pm 0,01\%$ в диапазоне от $10^{-9}$ до 10А
Калибратор напряжения П320	предел 100 мВ, $\delta = \pm 0,015 \%$
Магазин сопротивлений Р4831	кл. т. $0,02/2 \cdot 10^{-6}$
Магазин сопротивлений Р3026	кл. т. 0,005
Вольтметр универсальный В7-53/1	диапазоны измерений (0...300) В, (0...1) А
Частотомер ЧЗ-35А	диапазон измерения от 10 Гц до 50 МГц, с погрешностью измерения $2 \cdot 10^{-7}$ .
Мегомметр М4100/1 (U=100 В) Мегомметр М4100/3 (U= 500В)	кл. т. 1,0 диапазон измерений (0...500)МОм
Термометр ТЛ – 4	от 0 до 55°C, ц. д. 0,1°C
Термостат нулевой типа ТН-12.	Градиент температур не более 0,03 °С/м

Рисунок 2 – Средства измерений

При проведении поверки необходимо соблюдать следующие условия:

- температура окружающего воздуха  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха от 30 до 80 %;
- атмосферное давление 84,0...106,7 кПа (630...800 мм рт. ст.);
- напряжение питающей сети  $(220 \pm 11)$  в;
- частота питающей сети  $(50 \pm 1)$  Гц;
- время выдержки ТРМ во включенном состоянии, не менее 20 мин.

Проведения поверки

Внешний осмотр:

При проведении внешнего осмотра должно быть проверено соответствие прибора следующим требованиям:

- прибор должен быть представлен на поверку с эксплуатационной документацией, входящей в комплект поставки прибора (паспорт и руководство по эксплуатации);
- прибор должен быть чистым и не иметь механических повреждений на корпусе и лицевой панели
- прибор не должен иметь механических повреждений входных и выходных клеммных соединителей;
- на приборе должна быть маркировка, соответствующая РЭ. 8.1.2

### Заключение

Измеритель – регулятор микропроцессорный очень важный и незаменимый прибор на производстве. ТРМ обладает более широкими возможностями, которые заметно облегчают контроль функции регулирования, а также заменяют релейные схемы управления и сигнализации.

### Литература

1. История создания регуляторов температуры [Электронный ресурс]/ История создания регуляторов температуры. Режим доступа: <https://cyberpedia.su/3x7923.html> /. – Дата доступа: 01.11.2022
2. Описание и работа ТРМ [Электронный ресурс]/ Описание и работа ТРМ. Режим доступа: <https://www.axwap.com/kipia/instruktsii/trm1/trm1-opisanie-i-rabota.htm/> . – Дата доступа: 10.11.2022
3. Обзор регуляторов давления и температуры ОВЕН [Электронный ресурс]/ Обзор регуляторов давления и температуры ОВЕН. Режим доступа. <http://dis-rostov.ru/regulatory-davleniya-temperaturi-owen/> . – Дата доступа: 15.11.2022
4. Поверка средств измерений [Электронный ресурс]/ Поверка средств измерений. Режим доступа: <https://gcagro.by/klientam/poleznyestati/poverka-sredstv-izmerenij.html> /. – Дата доступа: 05.11.2022

УДК 631.27

**СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ  
НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ  
POWER SEMICONDUCTOR DEVICES USED IN ELECTRIC POWER FA-  
CILITIES**

К. Д. Сырцов

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

г. Минск, Республика Беларусь

jte@tut.by

K. Sirtsov

Supervisor – T. Zhukovskaya, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной работе рассматривается сферы применения полупроводников в энергетике и перспективы их развития.*

***Abstract:** this article examines the scope of application of semiconductors in the energy sector and the prospects for their development.*

***Ключевые слова:** силовое электрооборудование, полупроводники, передача постоянного тока, компенсация реактивной мощности, регулирование напряжения.*

***Key words:** power electrical equipment, semiconductors, direct current transmission, reactive power compensation, voltage regulation.*

**Введение.**

Полупроводниковые приборы с управляемыми ключами уже давно используются на объектах энергетики в таких устройствах, как статические системы возбуждения генераторов, серво-электроприводы клапанов паровых турбин и многих других. Стремительный рост силовых показателей полупроводниковых ключей позволяет все чаще их применять и в первичных цепях энергосистем для различных задач.

**Основная часть.**

В настоящее время, существуют три основные сферы применения силовых полупроводников, которые рассматриваются ниже.

1. Передачи (ППТ) и вставки постоянного тока (ВПТ).

Рассмотрим передачу постоянного тока, изображенную на рисунке 1.

Две электроэнергетические системы ЭЭС 1 и ЭЭС 2 могут быть связаны между собой передачей, состоящей из выпрямителя (В) и инвертора (И), преобразующих ток из постоянного в переменный и обратно. Роль преобразователей на схеме может меняться в зависимости от направления передачи электроэнергии. Электропередачи, в которых отсутствует связывающая системы линия с током  $I_d$  (электрические системы непосредственно примыкают друг к другу) называются вставками постоянного тока (ВПТ).

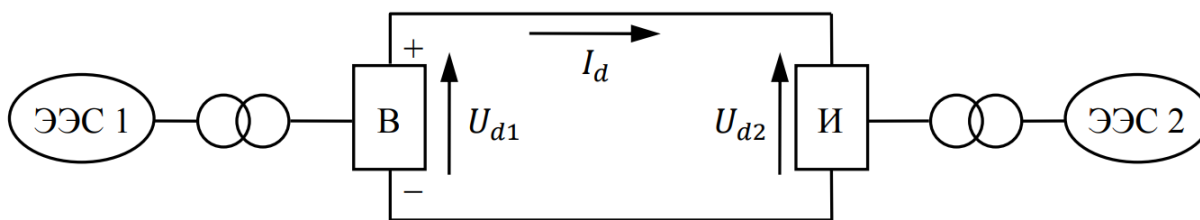


Рисунок 1 - Структурная схема передачи постоянного тока (ППТ)

В качестве преобразователей, используемых в ППТ и ВПТ, повсеместно применяют управляемые вентильные тиристорные преобразователи, которые соединяются по трехфазной мостовой схеме (рис. 2).

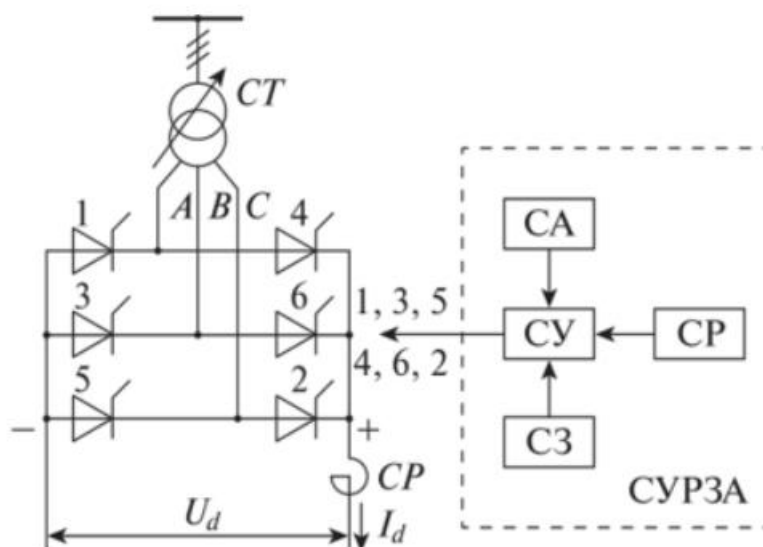


Рисунок 2 - Схема трехфазного мостового преобразователя на тиристорах

Основой такого преобразователя является трехфазный вентильный мост, составленный из высоковольтных тиристорных вентилей (ВТВ) 1, 2, 3, 4, 5 и 6, которые, в свою очередь, собираются из отдельных тиристорov, включенных последовательно. Нумерация ВТВ указывает на то, в каком порядке подаются отпирающие импульсы, формируемые системой управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА) на управляющие электроды ВТВ.

Функция силового трансформатора (СТ) заключается в создании необходимого выпрямленного напряжения, а также в электрическом отделении цепи выпрямленного тока от сети переменного тока, что важно для последовательного соединения вентильных мостов.

ВТВ открываются при подаче на управляющие электроды входящих в их состав тиристорov некоторого электрического импульса относительно небольшой мощности (например, светового импульса). Изменяя момент подачи этого импульса (т. е. изменяя сдвиг по фазе) относительно момента естественного отпирания вентилей, можно в широких пределах регулировать такие параметры режима работы моста, как мощность и напряжение, а также переводить мост из выпрямительного режима в инверторный и наоборот.

Управляющие импульсы генерируются системой управления (СУ). Помимо того, СУ отвечает за распределение данных импульсов по ВТВ согласно их нумерации и регулирует сдвиг управляющих импульсов по фазе относительно питающего напряжения.

Система автоматического регулирования (САР), система защиты (СЗ) и система автоматики (СА), изображенные на схеме, позволяют добиться слаженной работы элементов преобразователя. Так, функция САР заключается в поддержании неизменными параметров режима, функция СЗ и СА – прекращение подачи управляющих импульсов при аварийных ситуациях и ввод моста в работу после действия защиты соответственно.

Сглаживающий реактор (СР) обеспечивает работу линии в режиме непрерывного тока посредством сглаживания пульсаций выпрямленного тока и исключает проникновение переменных токов высших гармоник в линию. Кроме того, СР снижает скорость нарастания тока при авариях, что обеспечивает безопасную работу вентиля и защищает оборудование подстанции от волн перенапряжений, которые могут приходиться с линии.

Для передач постоянного тока существуют следующие приложения по основному назначению:

- 1) транзитная передача больших мощностей на большие расстояния (более 1000 км), что обусловлено более низкими потерями электроэнергии по сравнению с передачами переменного тока на тех же дистанциях;

- 2) межсистемная связь (взаимное согласование работы энергосистем переменного тока, имеющих разные технические параметры).

Максимальными техническими показателями, освоенными на сегодня, являются уровень напряжения 800 кВ, расстояние передачи порядка 2500 км и мощность электроэнергии 6400 МВт.

Для введения в эксплуатацию более высокого уровня напряжения необходимо выполнение повышенных требований к силовым устройствам. Повышение числа соединенных последовательно тиристорных устройств позволяет решить проблему построения мощных силовых преобразователей при условии обеспечения координации их работы. Современные тиристорные ключи имеют возможность коммутировать токи силой до 5 кА и обеспечивают передачу мощности до 10 МВт. Однако, тиристоры не являются ограничивающими компонентами в получении высоких показателей ЛЭП: главной проблемой является изоляция силовых компонентов высокого напряжения, таких как выключатели, конструктивные элементы и трансформаторы.

## 2. Устройства параллельной компенсации реактивной мощности.

Передача больших реактивных мощностей по ветвям электрической сети в общем случае является экономически нецелесообразной по нескольким причинам:

- 1) возникают дополнительные потери реактивной мощности в элементах цепи, обусловленные их загрузкой реактивной мощностью;

- 2) возникают дополнительные потери напряжения, особенно существенные в сетях районного значения;

3) Загрузка реактивной мощностью систем электроснабжения приводит к уменьшению их пропускной способности и, как следствие, требует увеличения сечений проводов линий, увеличения номинальной мощности оборудования, числа трансформаторов на подстанциях и т. д.

По данным причинам, в ряде случаев экономически выгодным является применение устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ).

К одному из таких устройств относится полупроводниковый компенсатор реактивной мощности (ПКРМ), который представляет собой включаемый параллельно сети полупроводниковый преобразователь, главное назначение которого – генерация реактивной мощности в сеть. Непосредственно генерация при этом осуществляется с помощью батарей статических конденсаторов (БСК).

До недавнего времени регуляция мощности, генерируемой БСК производилась ступенчато за счет переключения отдельных конденсаторных секций. С введением в эксплуатацию ПКРМ появилась возможность плавных переключений. Таким образом, их применение позволяет избежать колебаний напряжения сети в условиях частых скачков нагрузки.

Для коммутации секций конденсаторных батарей (КБ) применяются вентильные ключи, которые выполняются на включенных встречнопараллельно тиристорах  $VS1$  и  $VS2$  (рис. 3, а). Секция КБ присоединяется к цепи с помощью токоограничивающего реактора  $L_{тр}$ .

Принцип работы ПКРМ заключается в том, что, прекращая подачу на тиристоры отпирающих импульсов, достигается оперативное отключение конденсатора от сети, напряжение на котором оказывается максимально положительным или отрицательным в момент отключения и остается таковым до момента включения, так как конденсаторная батарея не разряжается. Такой порядок переключений позволяет добиться наиболее благоприятного течения переходного процесса в сети и завершения его в течение короткого времени (0,01-0,02 с.), за счет чего и получается плавность переключений.

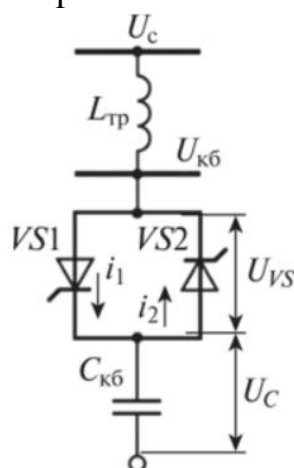


Рисунок 3 - Устройства компенсации реактивной мощности с применением тиристоров

По аналогичным методам (с использованием импульсно-фазового управления) происходит реализация других устройств компенсации реактивной мощности с тиристорным управлением: регулируемый реактор, комбинированные устройства и т. д.



### 3. Генераторы с меняющейся частотой вращения.

При грубом приближении, напряжение, вырабатываемое генератором, зависит от частоты вращения ротора ( $n$ ) и от магнитного потока генератора ( $\Phi$ ) по формуле:

$$E = c \cdot n \cdot \Phi,$$

Где  $c$  – некоторый постоянный коэффициент.

Следовательно, для обеспечения постоянства напряжения при меняющейся частоте вращения требуется изменять магнитный поток  $\Phi$  обратно пропорционально частоте. Так как магнитный поток зависит от тока возбуждения, то регулирование осуществляется при помощи периодического включения и отключения добавочного резистора определенного постоянного сопротивления в цепь возбуждения генератора. Для этой задачи могут применяться полупроводниковые регуляторы напряжения.

В общем случае, регулирование силы тока возбуждения в полупроводниковых регуляторах производится с помощью транзистора, эмиттерноколлекторная цепь которого подключается последовательно с обмоткой возбуждения генератора.

Когда напряжение генератора выше заданного уровня, транзистор переключается в закрытое состояние (контакты размыкаются и сопротивление транзистора имеет бесконечно большое значение). При понижении уровня регулируемого напряжения транзистор переключается в открытое состояние (контакты замыкаются и сопротивление составляет доли ома).

Таким образом, когда выдаваемое генератором напряжение достигает предельно допустимого, в цепь обмотки возбуждения включается резистор. В результате, резко уменьшается сила тока возбуждения и, как следствие падает напряжение на клеммах генератора. При предельно низком напряжении резистор отключается, сила тока возбуждения увеличивается и напряжение генератора вновь возрастает. Это происходит непрерывно, и тем самым на клеммах генератора поддерживается требуемое напряжение (рис. 4)

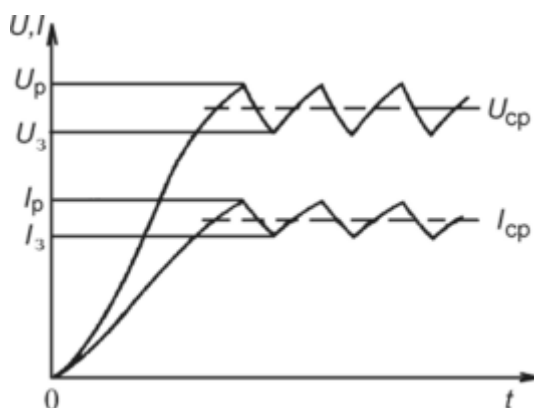


Рисунок 4 - Временные характеристики регулирования напряжения генератора

Данный тип регуляторов может выполняться контактно-транзисторными (для коммутаций в цепи применяется вибрационное реле) и бесконтактными (в функции контактов выполняет транзистор  $VT1$ , рис. 5).

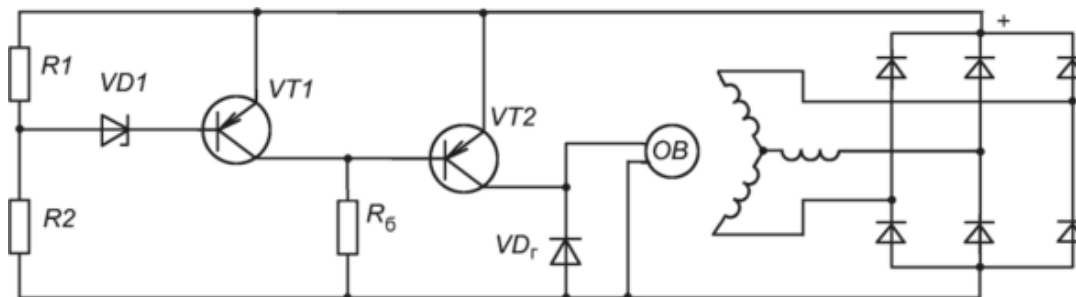


Рисунок 5 - Бесконтактный регулятор напряжения

Основными путями развития полупроводниковых ключей для более широкого их применения на объектах электроэнергетики являются следующие:

- снижение затрат на производства и цены устройств;
- увеличение быстродействия и мощности ключей;
- уменьшение габаритов;
- повышение надёжности;
- развитие изоляции преобразователей;
- развитие алгоритмов управления преобразователями;
- снижение влияния на преобразователи различного рода гармоник и помех;
- развитие испытательного оборудования.

### Заключение

Полупроводниковые силовые устройства играют большую роль в сфере энергетики и помогают экономически выгодно решать ряд поставленных задач, среди которых основными являются передача энергии на большие расстояния, согласование энергосистем с различными параметрами, создание устройств компенсации реактивной мощности и поддержание постоянного напряжения на генераторах с переменной частотой вращения. В связи с развитием производства и внедрения новых технологий, в настоящее время наблюдается тенденция роста характеристик полупроводниковых элементов, и, как следствие, более частое их применение в энергетике.

### Литература

1. Применение силовых устройств с управляемыми полупроводниковыми преобразователями на объектах электроэнергетики (электронный ресурс) / ENERГОSMI (ЭНЕРГОСМИ) –Режим доступа: <https://energosmi.ru/archives/9464>
2. Полупроводниковые компенсаторы реактивной мощности (электронный ресурс) / Studref:

УДК 621.313

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
MODERN METHODS FOR DIAGNOSING FAULTS IN ELECTRIC  
MOTORS**

Е.А. Шетик, И.В. Кулинич,

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

E. Shetik, I. Kulinich,

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** рассмотрены основные виды и причины поломок электродвигателей, современные методы обнаружения неисправностей электродвигателей, использование тепловизионного и акустического контроля, также основные контролируемые параметры электродвигателей.

**Abstract:** the main types and causes of electric motor breakdowns, modern methods of detecting problems with electric motors, the use of thermal and acoustic monitoring, as well as the main controlled parameters of electric motors were considered.

**Ключевые слова:** электродвигатель, изоляция, ротор, статор подшипник.

**Keywords:** electric motor, insulation, rotor, stator, bearing.

### **Введение**

Электродвигатели являются наиболее широко используемым электроприводным оборудованием в современном промышленном производстве. Воздействие многих факторов во время эксплуатации часто вызывает различные отказы двигателей, что не только приводит к повреждению самого двигателя, но и вызывает остановку производства. В связи с чем, огромное значение имеет ранняя диагностика состояния двигателя

### **Основная часть**

Перед тем, как в двигателе возникнут различные типы неполадок, как правило, появляются некоторые признаки износа, такие как акустические, механические или повреждения в изоляции. Есть рабочие параметры, которые могут отражать состояние неисправности двигателя, по которым можно отслеживать, и своевременно выявить неисправность, чтобы избежать серьезных экономических потерь из-за ненужного простоя и других условий.

Чтобы удовлетворить вышеуказанные требования, определяются характеристические параметры диагностики неисправности двигателя путем классификации и анализа характеристик последующих неисправностей двигателя и ненормальных рабочих состояний (рисунок 1). Эта система может идентифицировать приближающуюся неисправность двигателя на ранней стадии и автоматически генерировать сигнал раннего предупреждения путем сбора и обработки параметров состояния двигателя во время работы.



Рисунок 1. Методы контроля состояния изоляции АД

Ротор двигателя должен выдерживать большую нагрузку, при длительном воздействии которого очень легко вызвать поломку стержней (рисунок 2), открытую сварку торцевых колец, обрыв обмотки, дисбаланс и другие неисправности ротора, среди которых обрыв стержней ротора и дисбаланс ротора являются наиболее распространенными неисправностями роторов. Когда двигатель работает в состоянии сломанных стержней ротора, амплитуда радиальных колебаний двигателя больше, чем в нормальном состоянии. При работе двигателя в неуравновешенном состоянии ротора, амплитуда колебаний на основной частоте вибрации двигателя больше, чем в нормальном состоянии, а радиальная вибрация в неисправном состоянии больше, чем амплитуда осевой вибрации.

Неисправности статора двигателя обычно можно разделить на три типа неисправностей, а именно неисправности обмотки статора, неисправности сердечника статора и неисправности изоляции (рисунок 3).

Неисправности обмотки статора в основном представляют собой: межвитковые короткие замыкания, которые часто сопровождаются локальным повышением температуры, трехфазный электрический дисбаланс двигателя, электромагнитные причины вибрации двигателя и другие явления. Неисправность сердечника статора в основном заключается в коротком замыкании шихтованных пластин статора, что представляет собой соответствующий ток, генерируемый сердечником под действие электромагнитной индукции, и под действием тока генерируется определенный ток. Перегрев статора приведет к тому, что локальная температура будет слишком высокой, и изоляционный материал и даже железный сердечник будут повреждены.



Рисунок 2 Последствия обрыва стержня ротора

Подшипник является ключевой частью двигателя, его производительность и срок службы тесно связаны с рабочим состоянием двигателя. Основными причинами выхода из строя подшипника являются дисбаланс вала, эксцентриситет подшипника, повреждение радиального подшипника, прослабление подшипника и т. д. Основной характеристикой отказа подшипника является увеличение вибрации, будь то во внешней втулке, внутренней втулке, шарике или защитной раме (что характеризуется различными частотами вибрации). Кроме того, вибрация подшипника также вызывает изменение магнитного потока двигателя, что ведет к изменению тока статора (рисунок 4). Таким образом, величину номинального тока также можно использовать для обнаружения неисправностей подшипников двигателя.



Рисунок 3 Неисправность обмотки статора



Рисунок 4 Неисправность подшипника

Колебания напряжения двигателя в основном делятся на два типа: перенапряжение и пониженное напряжение. Перенапряжение приведет к увеличению тока двигателя, повышению температуры и даже повреждению изоляции обмотки, вызывая такие неисправности, как короткое замыкание обмотки.

Многообещающий метод диагностики изоляция двигателя - это метод, который использует звук акустической эмиссии (рисунок 5).

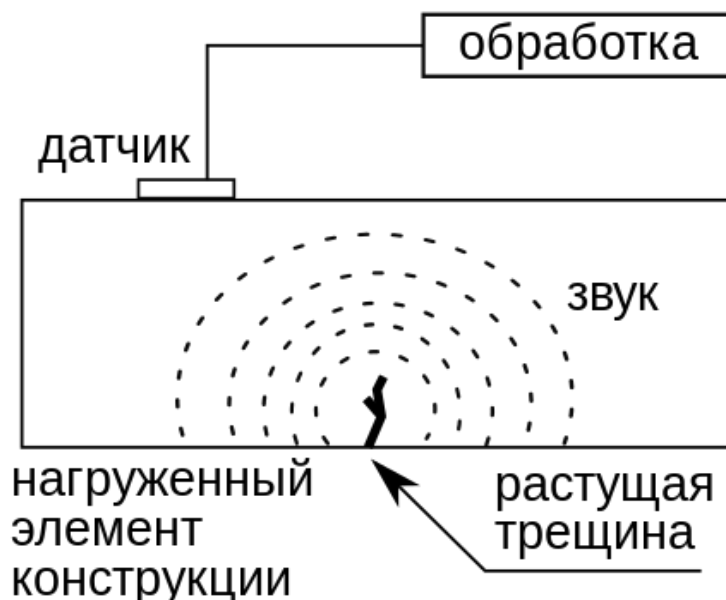


Рисунок 5. Принцип диагностики трещин с помощью акустической эмиссии

Суть этого явления заключается в возникновении звуковых волн при разрыве полимерного материала. Для этих эффектов характерны пластические деформации практически любых твердых материалов.

Метод контроля при помощи тепловизора для определения неисправности подшипника, состояние силовых вводов и обмотки статора (рисунок 6). Тепловизор используется для контроля инфракрасного излучения. Диапазон электромагнитного спектра (0,9-14 мкм) в обозначенной области тепловой карты. Преимущество этого метода заключается в том, что измерение осуществляется дистанционно.



Рисунок 6 Тепловизионная картина нагрева электродвигателя

Также перспективным направлением является разработка технических средств для мониторинга состояния и диагностики электродвигателей. Данная методика основана на сигнатурном анализе электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя (рисунок 7). Анализируемый электрический сигнал - это напряжение на клеммах, или ток в двигателе или проводах. Изменение поступающего сигнала может быть вызвано либо неисправностью в двигателе, либо неисправностью в электроприводе. Поэтому сигнатурный сигнал двигателя распространяется на оценку технического состояния приводного оборудования.

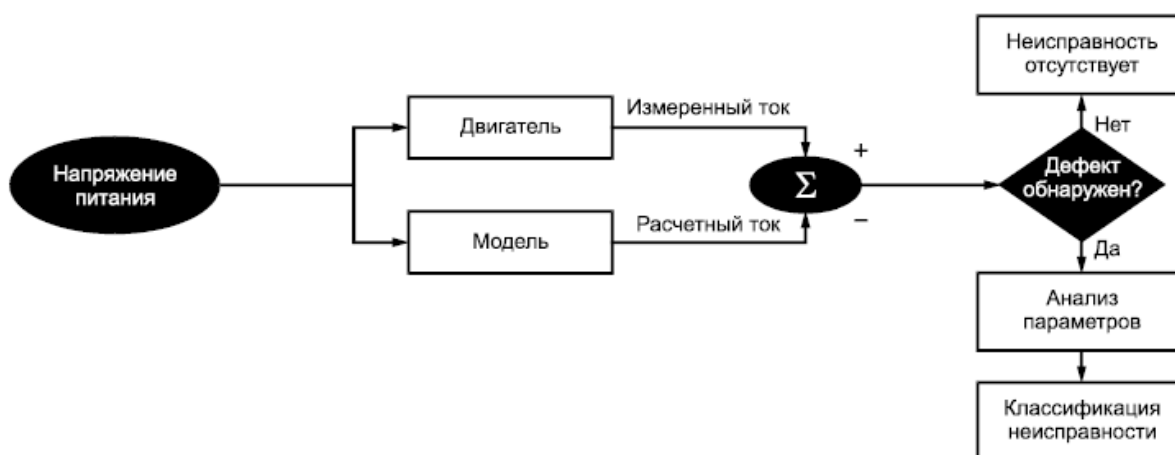


Рисунок 7 Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя

Характеристики неисправности различных категорий двигателя отличаются, но основные параметры характеристик могут быть отражены пятью параметрами: напряжение, ток, скорость вращения ротора, вибрация и температура. Поэтому проектирование системы диагностики неисправностей двигателя и раннего оповещения может быть выполнено на основе анализа, эффективно и своевременно отделяя информацию об аномальном состоянии с помощью различных методов обнаружения и сигналов теории анализа и диагностики неисправностей. Обнаружение скрытой опасности является важной мерой для достижения надежной работы, снижения частоты технического обслуживания и повышения эффективности производства. В настоящее время основные принципы диагностики неисправностей моторного оборудования заключаются в следующем:

1) Метод анализа тока определяет форму волны тока нагрузки с помощью методов анализа сигналов, таких как частотный спектр, для диагностики причины и степени отказа моторного оборудования;

2) В методе диагностики изоляции используются различные электрические испытательные устройства и методы диагностики, чтобы определить наличие дефектов в работе изоляционной конструкции электродвигателя и спрогнозировать срок службы изоляции;

3) Метод определения температуры. Различные методы измерения температуры используются для контроля повышения температуры различных частей моторного оборудования, а повышение температуры двигателя связано с различными неисправностями;

### **Заключение**

Вывод о состоянии двигателя можно сделать на основании анализа основных контролируемых параметров: напряжения, тока, частоты вращения ротора, вибрации и температуры электродвигателя. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к современным методам диагностирования электродвигателей, что дает возможность непрерывного контроля основных кинематических и электрических параметров в рабочем режиме;

Проведенный анализ существующих методов диагностики электродвигателей позволяет оценить перспективу их применения в производственных условиях.

### **Литература**

1. Методы диагностики неисправностей асинхронных электродвигателей [Электронный ресурс]/ методы диагностики неисправностей асинхронных электродвигателей. Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/electroremont/109-metody-diagnostiki-neispravnostejj.html/>.- Дата доступа: 25.02.2023

2. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя [Электронный ресурс]/ Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-diagnostiki-i-identifikatsii-neispravnostey-obmotok-asinhronnogo-dvigatelya-v-rezhime-ego-funktsionirovaniya> /.- Дата доступа: 25.02.2023

Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей [Электронный ресурс]/методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей. Режим до-



стуга:[https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2011\\_02\\_2/pdf/261vorobiev.pdf/](https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2011_02_2/pdf/261vorobiev.pdf/).- Дата дотуга:  
25.02.2023

УДК 621.316.1

## **ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

## **THE INFLUENCE OF THE TRANSFORMER WINDING CONNEC- TION CIRCUIT ON THE POWER QUALITY**

Р.С. Борисюк

Научный руководитель – В.П. Счастный, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический  
университет, Минск, Республика Беларусь

R. Borisyuk

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

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние трансформаторов с различными схемами соединения обмоток на несинусоидальность напряжения в низковольтных электрических сетях.

**Annotation.** The article considers the influence of transformers with different winding connection circuits on the non-sinusoidality of voltage in low-voltage electrical networks.

**Ключевые слова:** трансформаторная подстанция, трансформатор с шестержневой компенсирующей обмоткой, несинусоидальность напряжения.

**Key words:** transformer substation, transformer with a single compensating winding, voltage non-sinusoidality.

### **Введение**

На потребительских подстанциях промышленных предприятий широко используются трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-звезда ноль» (У/Ун). Они имеют ряд преимуществ и предназначены для питания трехфазных потребителей с преимущественно линейной нагрузкой. Однако с ростом потребителей с нелинейной нагрузкой, таких как сварочные аппараты, регулируемый электропривод с управляемыми тиристорными устройствами, современные аппараты дуговых электрических печей, установки индукционного нагрева, газоразрядные источники излучения и другие, приводят к изменению характера и баланса нагрузок в электрических сетях. Появляются в сети большие уровни высших гармонических составляющих тока и напряжения, уменьшается пропускная способность электрических сетей, все это ведет к ухудшению качества электроэнергии, надежности электроснабжения и дополнительным потерям.

Для обеспечения качества электроэнергии, обеспечения нормальных условий работы электроприемников, повышения надежности и экономичности системы электроснабжения предприятия необходимо проводить ряд технических мероприятий. Одним из них может быть замена трансформаторов с другими схемами соединения обмоток на потребительской трансформаторной подстанции.

### **Основная часть**

В качестве альтернативы можно использовать трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг ноль» (У/Зн). Обмотки низшего напряжения трансформатора разделены на две части, которые расположены на различных стержнях магнитопровода. Это позволяет компенсировать вынужденные намагничивания от токов нулевой последовательности, токов третьей и кратных трем гармонических составляющих. Данные трансформаторы имеют малое сопротивление нулевой последовательности, что обуславливает низкий уровень третьей и кратных трем высших гармоник. Однако, у него более высокое, чем у трансформатора У/Ун сопротивление короткого замыкания, от которого зависят уровни гармонических составляющих прямой и обратной последовательности, а значит и увеличение потерь электроэнергии. Кроме того, на изготовление обмоток трансформатора требуется повышенный расход цветного металла. Существует также ряд других трансформаторов с компенсирующими обмотками. Рассмотрим трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с общестержневой компенсирующей обмоткой» (У/Ук.о) [1, 2].

Трансформатор имеет компенсирующую обмотку, находящуюся на трех стержнях магнитопровода намотанную поверх всех обмоток встречно вторичной обмотке и имеющей число витков, равное  $1/3$  числа витков одной фазы этой обмотки. У данного трансформатора такие параметры как напряжение короткого замыкания, мощность холостого хода и короткого замыкания, сопротивление короткого замыкания аналогичны как у трансформатора У/Ун. Сопротивление нулевой последовательности близкое к значению как у трансформатора У/Зн, что существенно меньше, чем у трансформатора У/Ун.

Для проведения эксперимента и сопоставления результатов рассматриваемых трансформаторов возьмем стандартный трансформатор типа ТСЗ-2,5/0,38. Используем для всех трансформаторов один магнитопровод, меняя на нем обмотки. В качестве нелинейной нагрузки - однофазный выпрямитель. Будем производить загрузку трансформатора от 0,1 до 1,0 мощности трансформатора. На рисунке 1 представлены зависимости значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения ( $K_U\%$ ) от загрузки трансформаторов.

Анализ полученных результатов показывают, что трансформатор со схемой соединения У/Ун не обеспечивают требуемые уровни качества напряжения. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения у данного трансформатора выходят за допустимые пределы 8%, а уровень коэффициента третьей гармонической составляющей при номинальной загрузке трансформатора составляет более 7%, при предельно допустимых значениях для сети 0,38 кВ 5%. Девятой гармонической составляющей – 1,8%, при допустимых 1,5%. Если в качестве нелинейной нагрузки использовать управляемые выпрямители, сварочные агрегаты и ряд комбинаций нагрузок, то показатели увеличиваются в 2-3 раза (рисунок 1).

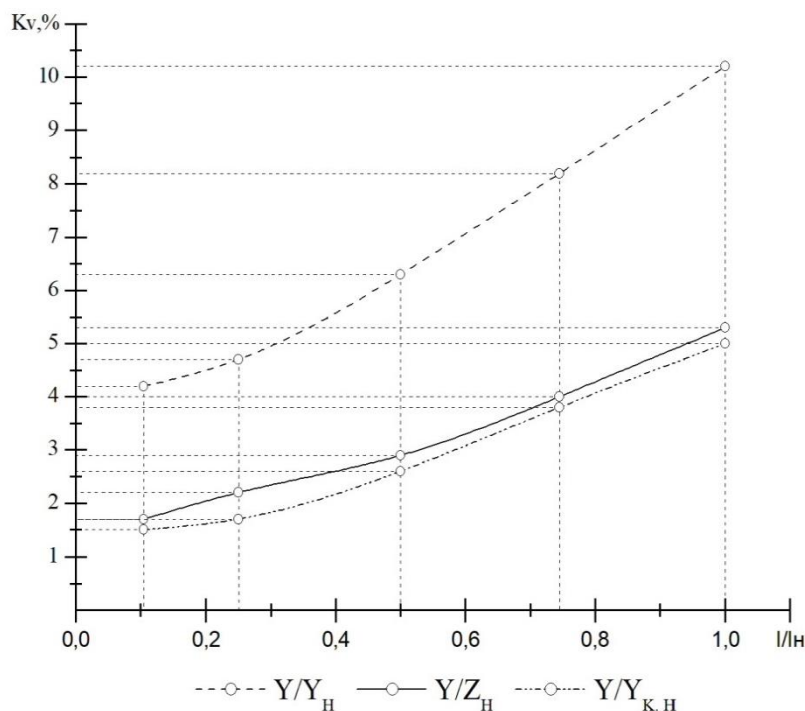


Рисунок 1. Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения для различных схем соединения обмоток трансформатора.

Две другие схемы соединения обмоток трансформатора обеспечивают требуемый уровень качества напряжения. При различных комбинациях за грузки трансформаторов, значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не выходит за допустимые пределы 8%. А уровень значения коэффициента третьей, девятой гармонической составляющей при номинальной загрузке трансформатора приблизительно одинаковы и находятся в допустимых значениях. Уровень значения коэффициента пятой, седьмой гармонической составляющей при номинальной загрузке трансформатора несколько выше у трансформатора  $Y/Z_H$ , хотя и находятся в допустимых пределах.

### Заключение

Использование трансформатора с компенсирующей обмоткой в электрических сетях 0,38 кВ позволяет обеспечить требуемый уровень качество электроэнергии у потребителей при различных характерах нагрузки, повысить надежность электроснабжения, а также улучшить экономичность работы системы электроснабжения предприятия.

### Литература

1. Готенко, О.Д. Адаптивная система управления двухтрансформаторной потребительской подстанцией с схемой соединения обмоток трансформаторов  $Y/Y_{к.о} / O.D.$  Готенко, Т.А. Санец; науч. рук. В.П. Счастный // Актуальные проблемы энергетики [Электронный ресурс]: материалы 78-й научно-техн. конференции студентов и аспирантов, апрель 2022 г. / редкол.: Е.Г. Пономаренко [и др.]; сост. Т.Е. Жуковская. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 47-51.

2. 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 629.423.31

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ  
ТРАНСПОРТЕ**  
**APPLICATION OF ELECTRIC MOTORS IN RAILWAY TRANSPORT**

Д.А. Русаков, А.А. Супрунюк

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

D. Rusakov, A. Suprunyuk,  
Supervisor - S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk , Belarus

**Аннотация:** рассмотрено применение электродвигателей различной конструкции в подвижном составе железнодорожного транспорта, особенности управления двигателями, а также приведены примеры двигателей, разрабатываемых в обозримом будущем.

**Abstract:** the application of electric motors of various designs in the rolling stock of railway transport, the features of engine control are considered, and examples of engines being developed in the foreseeable future are also given.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, тяговый трансформатор, контроллер машиниста, контактная сеть, регулировка частоты вращения.

**Keywords:** traction electric motor, traction transformer, driver controller, contact network, speed control.

### **Введение**

Первые электродвигатели появились в 20-е годы 19 века и были опытными образцами. К этому времени, железнодорожный транспорт существовал уже почти век и использовал для передвижения паровые и бензиновые двигатели. Самые первые прототипы железнодорожного транспорта на электротяге стали появляться в 80-е года 19 века (1875 - первый экспериментальный трамвай Пирожского; 1879 – первый экспериментальный электровоз Сименса). Обширно электродвигатели стали применяться уже с начала 20 века.

Первые электровозы в СССР появились в 1932 году на Коломенском машиностроительном заводе. Перед инженерами стояла задача создать электровоз мощностью, достаточной для преодоления уклонов при большой массе груза.

Основное преимущество электрических двигателей перед паровыми и ДВС заключается в практически неограниченной тяговой мощности, поскольку питание двигателя осуществляется по контактной сети.

### **Основная часть**

Основных требований к ТЭД два: они должны обеспечивать плавную регулировку частоты вращения в широких пределах и регулировку силы тяги (вращающего момента). Поэтому в дополнение к такому двигателю всегда идёт система управления.

Основной вид применяемых двигателей – тяговый двигатель постоянного тока. Намного реже используются трёхфазные электродвигатели, поскольку их

питание и управление осложнено. Однофазные двигатели не получили широкого распространения, т.к. для их питания необходимо напряжение пониженной частоты (50/3 и 25 Гц). Особенность двигателя постоянного тока – его стойкость к пульсациям после выпрямления переменного тока (у железных дорог постоянного тока такого недостатка нет). Двигатели пульсирующего тока делают многополюсными и снабжают дополнительными шихтованными полюсами, вставками в ярме и компенсационной обмоткой для уменьшения искажения основного потока от реакции якоря. Тип применяемого возбуждения – независимое либо последовательное.

Рассмотрим конструкцию ДПТ НБ-418К6 (рисунок 1, 2).



Рисунок 1 Внешний вид НБ-418К6

Потребляемая мощность – 790 кВт, напряжение коллектора – 950 В, номинальный ток якоря – 880 А.

Охлаждение двигателя происходит за счёт вентилятора, подключенного к внутренней электросети. Воздух проходит как в воздушном зазоре, так и по пустотелому коллектору. Остальная конструкция особо не отличается от обычных двигателей на постоянном токе:

- отлитый из стали остов (ярмо) с двумя смотровыми люками и дополнительными рёбрами жёсткости;
- главный полюс (в количестве 6 пар), сердечник которого выполнен из шихтованной стали, катушки имеют по 11 витков;

- добавочные полюса с такими же шихтованными сердечниками и 8 витками в катушке;
- компенсационные обмотки;
- щётки с трёхпальцевым щёткодержателем;
- шихтованный якорь, выполненный из электротехнической стали листами по 0,5мм;
- коллектор арочного типа, набранный из 348 медных пластин, изолированных миканитовыми пластинками;
- петлевая обмотка якоря (87 якорных катушек и 58 катушек уравнивателей);
- подшипники и подшипниковые щиты, а также траверса для крепления двигателя.

Основное питание двигателя получают от контактной сети. Электроснабжение железной дороги может выполняться как постоянным током (до 3 кВ), так и переменным (25-27,5 кВ)

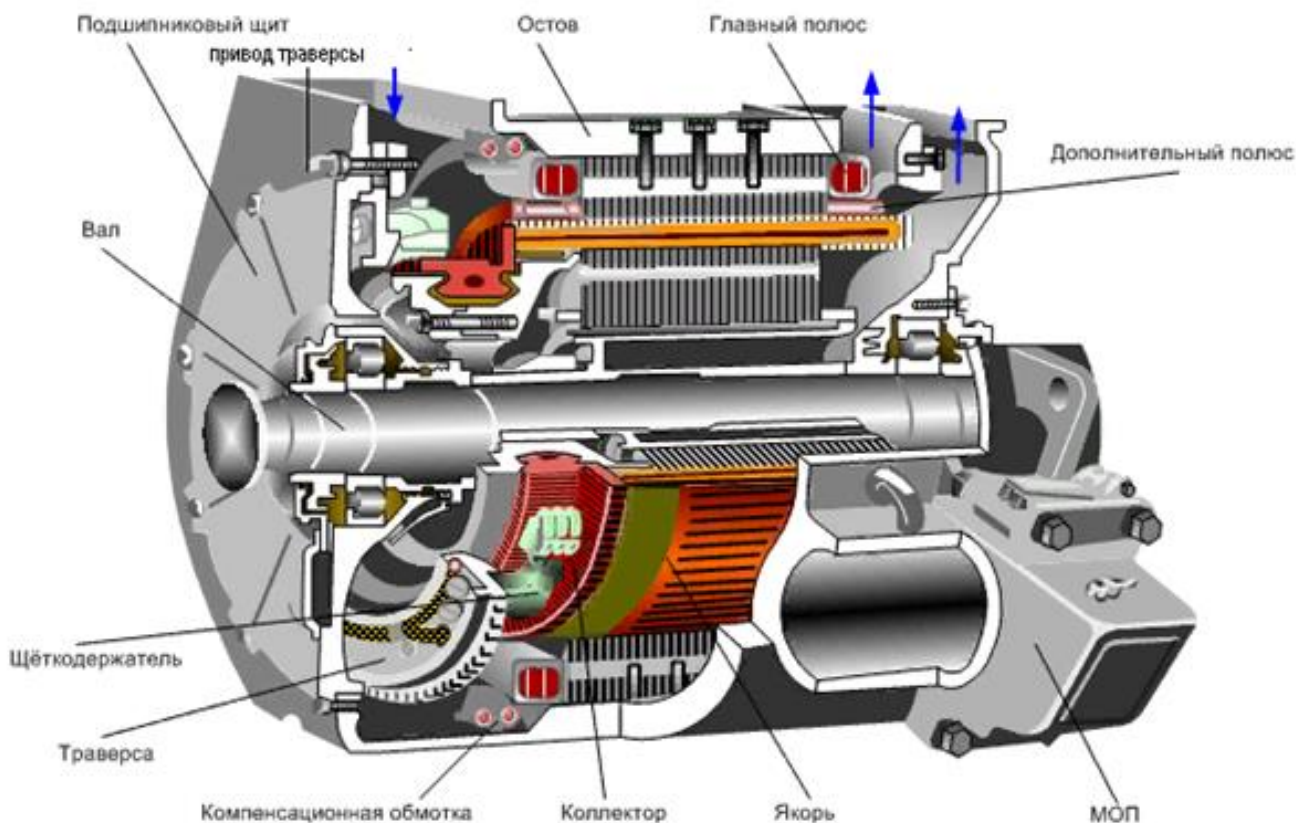


Рисунок 2 Конструктивные элементы НБ-418К6

Преимущества постоянного тока состоит в том, что сеть позволяет практически напрямую снабжать двигатель электроэнергией, не прибегая к использованию трансформаторов и выпрямительных устройств. Этот метод использовался в СССР ещё с 1930-х годов, а в странах Европы – ещё на несколько десятилетий раньше. Обусловлено это было невозможностью выпрямления тока на самих электровозах из-за отсутствия компактных выпрямителей.

Для питания подобных дорог используются тяговые подстанции постоянного тока. Такой выпрямленный ток (полученный из 3-хфазного) практически не имеет пульсаций, что хорошо сказывается на режиме работы двигателя (рисунок 3).

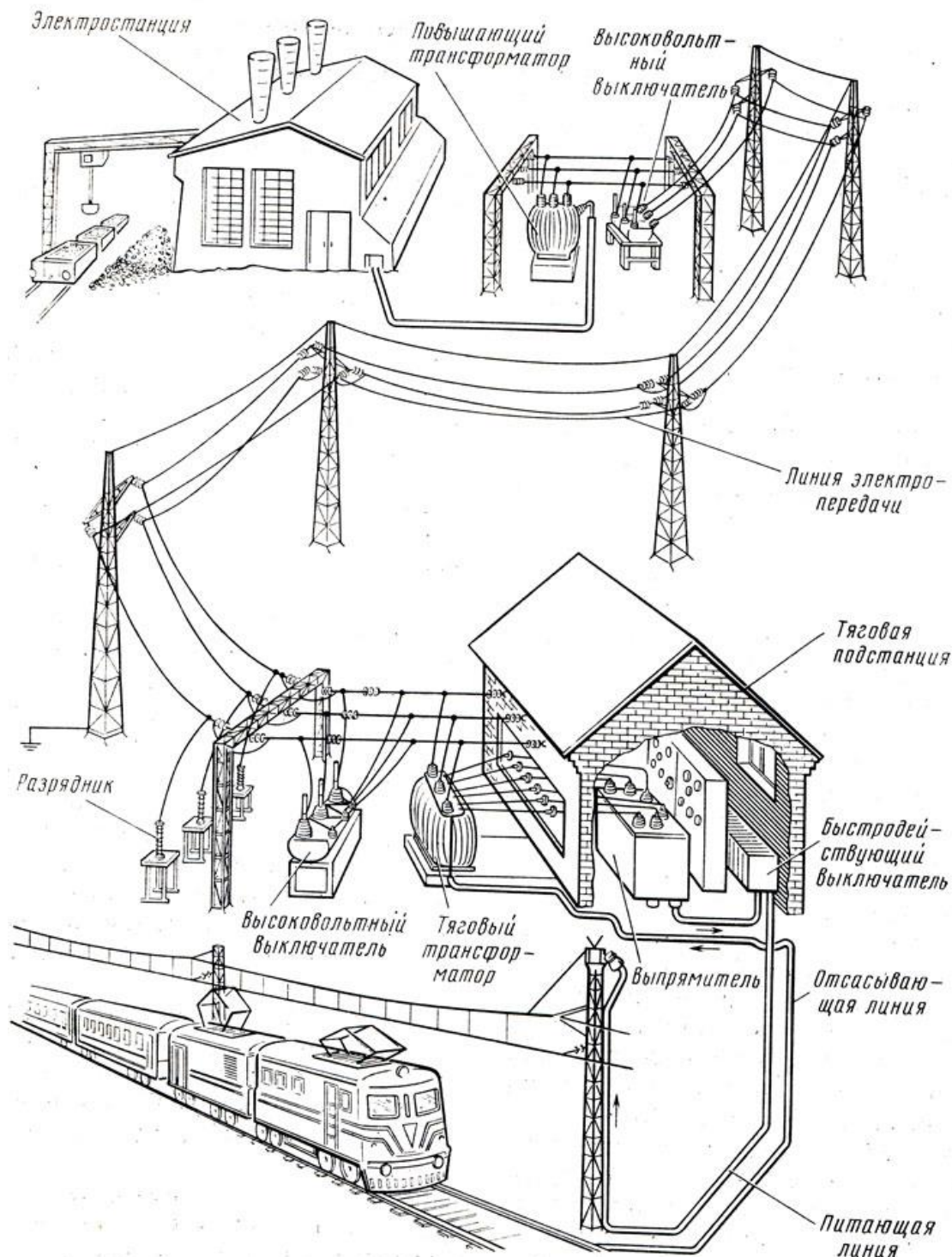


Рисунок 3 Система электроснабжения постоянного тока

Однако, передача электроэнергии на постоянном токе сопряжена с большими потерями, нежели на переменном.



С появлением полупроводниковых элементов, стало возможным конструирование выпрямителей на самих электровозах. Потери при передаче уменьшились, однако качество выпрямленного тока упало: появились несглаженные пульсации. Применение электрических фильтров позволило решить эту задачу. Теперь на электровоз подавалось переменное напряжение, которое затем трансформировалось в более низкое и выпрямлялось, после чего поступало на двигатель.

В современных поездах возможно осуществлять питание и асинхронных двигателей. На данный момент времени анализируется возможность применения для этого трёхфазной системы электроснабжения. Вопрос остается в сложности осуществления такой контактной сети (рисунок 4).



Рисунок 4 Гипотетическая трехфазная контактная сеть

Контактная сеть была бы очень сложной конструкции. Однако есть возможность снабжать электроэнергией двигатели через однофазную контактную сеть, используя асинхронные фазорасщепители, которые превратят ток в 3-фазный. Такая система применяется в новейших электровозах, а также для питания вспомогательных двигателей (вентиляторы и компрессоры).

Основное требование к двигателям – возможность плавной регулировки частоты вращения и регулировка силы тяги. Все управляющие действия производятся со специального многопозиционного коммутационного аппарата. Ча-

стоту вращения двигателя регулируют путём изменения либо магнитного потока возбуждения, либо подводимого напряжения.

В первом случае в двигателях с последовательным возбуждением применяется ослабление возбуждения с помощью подключения многосекционного резистора, включая и отключая секции которого, машинист регулирует ток обмотки возбуждения. Как правило, применяют 3-4 ступени ослабления.

Во втором случае применяется сразу несколько методов:

1) Изменение схемы соединения двигателей (рисунок 5). На транспорте всегда установлено кратное двум количество электродвигателей (по одному на колёсную пару). Их соединение может быть как последовательным, так и параллельным, так и смешанным. На схеме показан самый простой пример изменения подводимого напряжения.

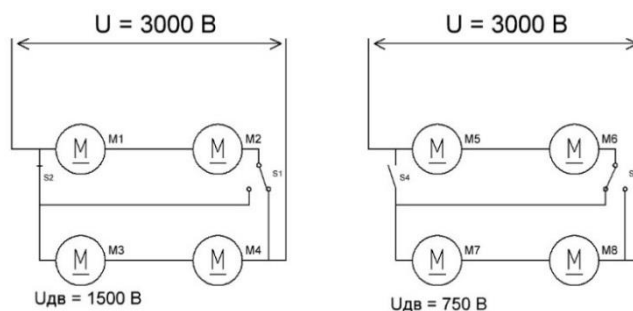


Рисунок 5 Схема соединения двигателей

2) Регулирование напряжения на стороне высшего напряжения тягового трансформатор, для чего используют дополнительную регулировочную обмотку, которая изменяет наводимый в магнитопроводе магнитный поток (рисунок б).

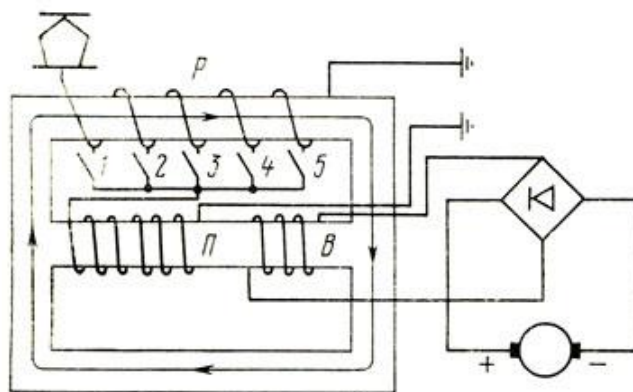


Рисунок 6 Схема регулировки высшего напряжения ТТ

Замыкая поочерёдно контакты с 5 по первый, увеличивают поток в центральном стержне, тем самым увеличивают напряжение на низшей стороне.

3) Регулирование напряжения на стороне высшего напряжения тягового трансформатора. Обмотка низшей стороны трансформатора (регулирующая) состоит из 30-35 отдельных секций. Эти секции переключают и соединяют с использованием переходных реакторов.

Пуск двигателя осуществляется посредством использования пусковых реостатов.

Среди особых режимов работы тяговых электродвигателей можно выделить реостатное и рекуперативное торможение, а также реверсивное движение.

1) При реостатном торможении ТЭД отключают от сети и включают на тормозные резисторы. Применяют две системы реостатного торможения: с независимым возбуждением и с последовательным самовозбуждением двигателей (рисунок 7).

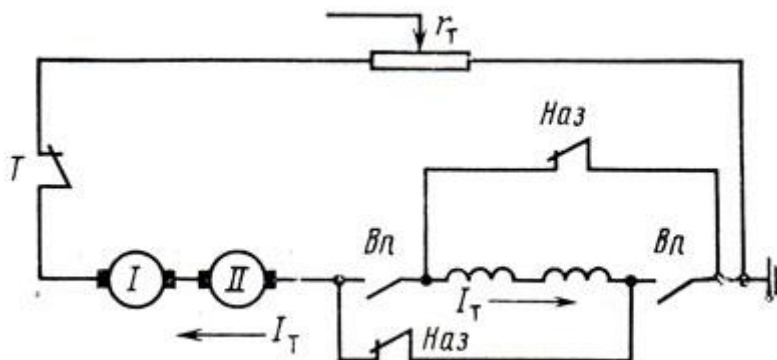


Рисунок 7 Схема реостатного торможения

Во время реостатного торможения каждую группу двигателей, соединенных последовательно, можно включить на отдельную секцию реостата. Тормозную силу регулируют, изменяя ток в обмотке возбуждения путем изменения сопротивления пускового реостата.

2) Рекуперативное торможение В случае рекуперативного торможения энергия, возвращаемая в сеть рекуперирующим электровозом, потребляется электровозами, находящимися с ним на одном участке и работающими в тяговом режиме. Это позволяет не перегружать сеть.

Если потребителей нет, то избыточная энергия направляется в энергосистему через устанавливаемые на тяговой подстанции инверторы, а если почти вся энергия расходуется на участке – то на поглощающие резисторы, установленные на той же подстанции. Применение рекуперации дает большой эффект: порой может быть сэкономлено до 20% электроэнергии, а также значительно уменьшается износ тормозных колодок и колес подвижного состава.

Для перехода двигателя из тягового в генераторный режим необходимо, чтобы ЭДС в обмотке якоря стала больше приложенного напряжения. Для этого сначала обмотки возбуждения отключают от обмоток якорей и запитывают от стороннего источника – генератора возбуждителя (это делается, поскольку двигатель с последовательным возбуждением не может перейти в режим генератора – при уменьшении нагрузки поток возбуждения резко падает и ЭДС не может стать выше напряжения в сети). В этом случае можно установить в обмотках возбуждения такой ток, при котором ЭДС в обмотках якорей тяговых двигателей станет больше подведенного напряжения.

3) Реверсирование – изменение направления вращения электродвигателей (необходимо для изменения направления движения) (рисунок 8)

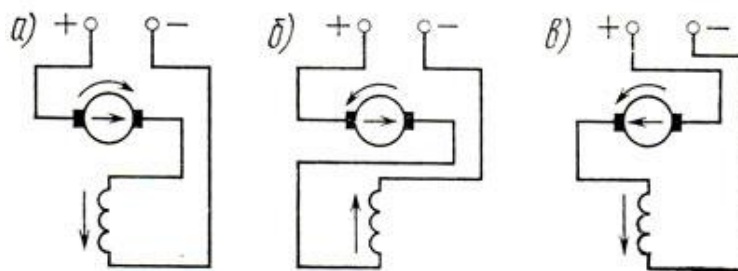


Рисунок 8 Схема реверсивного торможения

### Перспективы развития тяговых двигателей

*Система импульсного регулирования напряжения.* Регулировка, производимая путём изменения тока возбуждения, и регулировка на низшей стороне трансформатора имеют недостаток – ступенчатость. Достигнуть плавного изменения скорости работы двигателя стало возможным, внедрив в эксплуатацию импульсные преобразователи на базе тиристоров.

*Применение асинхронных двигателей.* Недостатки коллекторных двигателей постоянного тока инженеры предложили решить путем введения в эксплуатацию асинхронных двигателей. Недостатком является сложности их питания, так как трёхфазная контактная сеть трудноосуществима). Появление мощных компактных инверторов и фазоразщепителей позволяет решить эту проблему. А комбинация таких устройств с импульсными регуляторами позволила решить и вопрос со ступенчатой регулировкой частоты вращения асинхронных электродвигателей.

*Комбинированное питание.* Поскольку железные дороги снабжаются токами двух родов, было бы логично сконструировать такой электровоз, который смог бы беспрепятственно менять род питания прямо «на ходу». Такое достигается, внедрением в силовую цепь питания асинхронного двигателя одновременно фазоразщепителей для контактных сетей переменного тока и инверторов для сетей постоянного тока. Снабдив подвижной состав специальным переключателем, можно решить вышеуказанную проблему.

### Заключение

На сегодняшний день эксплуатируются два поколения подвижного состава (ЖД, метро). Старое поколение использует уже зарекомендовавшие себя на практике двигатели постоянного (импульсного) тока, новое – асинхронные двигатели с импульсным регулированием и комбинированным питанием. Новые двигатели, безусловно, обладают как рядом преимуществ, так и рядом недостатков – ремонт современных двигателей сложнее, а выйти из строя они могут в самый неподходящий момент (этому способствует большое количество силовой электроники, которая, к тому же, находится в сильных магнитных полях).

Ещё в 2000 году в России разрабатывался электропоезд со всеми перечисленными нововведениями, однако в серию проект так и не был запущен. Сегодня подобные “новинки” уже используются на поездах фирм Stadler, Siemens, Трансмашхолдинг. Однако большая часть подвижного состава до сих пор используют ДПТ со ступенчатым регулированием обмоткой возбуждения как более надёжные.

### Литература

1. Как устроен и работает электровоз / Н. И. Сидоров, Н. Н. Сидорова; Под редакцией И. К. Петушкова – М.: Издательство “Транспорт”, 1988. – 223 с.
2. Электровоз ВЛ80с: руководство по эксплуатации / Н. М. Васько, А. С. Девятков, А. Ф. Кучеров и др.; – М.: Издательство “Транспорт”, 1990. – 454 с.
3. Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь. – М.: Энергопресс, 2022, 762 с.

УДК 620.9

**ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЕТА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
ORGANIZATION OF AN AUTOMATED ELECTRICITY METERING SYS-  
TEM FOR AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

М.Г. Лысюк, П.Ч. Запасник,  
Руководитель – А.Ю. Капустинский, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь  
A.Kapustsinski@yandex.by  
M Lysyuk, P. Zapasnik.

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

***Аннотация:** Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) является важным инструментом для эффективного управления энергоснабжением и снижения энергозатрат в различных секторах промышленности и бытовой сфере. АСКУЭ включает в себя современные технологии, такие как средства измерения энергопотребления, средства контроля и управления электроэнергией, системы автоматического управления и мониторинга, аналитические инструменты и др.*

***Abstract:** The automated system for commercial electricity metering (ASKUE) is an important tool for efficient energy management and reducing energy costs in various sectors of industry and the domestic sphere. ASKUE includes modern technologies such as energy consumption measurement tools, power control and management tools, automatic control and monitoring systems, analytical tools, etc.*

***Ключевые слова:** АСКУЭ, энергоресурсы, энергоснабжение, энергозатраты, измерение, контроль, управление, автоматизация, мониторинг.*

***Keywords:** ASKUE, energy resources, energy supply, energy consumption, measurement, control, management, automation, monitoring.*

### **Введение**

Электроэнергетика является базовой отраслью экономики Республики Беларусь, так как производит и поставляет электрическую и тепловую энергию для всех других отраслей и населения страны. Надежное и эффективное функционирование электроэнергетики, бесперебойное энергоснабжение потребителей - основа поступательного развития экономики страны и неотъемлемый фактор обеспечения цивилизованных условий жизни ее граждан. Однако энергия, наряду с потребительской стоимостью, обладает одновременно и индивидуальной стоимостью, которая отражает затраты энергосистемы на производство, передачу, распределение и сбыт энергии. В эти затраты входит как стоимость приобретаемых энергосистемой первичных и вторичных энергоресурсов, так и стоимость эксплуатации и совершенствования энергетической инфраструктуры, которую образуют электростанции, подстанции, электрические сети и другие энергетические объекты.

Для обеспечения жизнеспособности энергосистемы и индустриального общества, которое зависит от поставок энергии, необходимо гарантированное заключение между поставщиками и потребителями о поставке энергии соответствующего качества и объема. При этом важно исключить возможности безучетного использования энергии любыми потребителями, независимо от их социального статуса.

Электроэнергия отличается от других товаров тем, что она не может быть сохранена на складе и продана позднее. Её необходимо производить на момент потребления, что требует дополнительных затрат на генерацию мощности в периоды пикового потребления. В то же время, в периоды низкой нагрузки генерирующие источники отключаются, что приводит к повышенному износу оборудования и удорожанию электроэнергии.

Существующий приборный учет электроэнергии, который основан на локальных счетчиках с ручной обработкой их показаний, не позволяет получать точные, достоверные и оперативные данные учета, что затрудняет расчеты между поставщиками и потребителями электроэнергии. Концепция нового приборного учета основывается на принципах автоматизированного энергоучета и на понятии АСКУЭ (автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии), элементами которой становятся электронные электросчетчики.

Системы АСКУЭ предназначены для эффективного решения задач, связанных с расчетами между участниками рынка электроэнергии (коммерческие функции), а также для контроля движения электроэнергии в системе энергоснабжения и учета ее потребления в целях определения неэффективного расхода и безучетного потребления. [1]

#### **Основная часть.**

**АСКУЭ промышленного субъекта учета (промышленная АСКУЭ):** – это система учета, применяемая для расчетного учета электроэнергии промышленных и приравненных к ним потребителей.

Автоматизация учета электроэнергии на промышленных предприятиях приобретает все большее значение в современном энергоемком мире. Эффективная система управления энергопотреблением может помочь компаниям не только экономить энергию и затраты, но и уменьшить выбросы углекислого газа, способствуя сохранению окружающей среды.

Структура АСКУЭ может быть различной в зависимости от ее назначения и конфигурации. Однако, в общем случае, она включает в себя следующие компоненты:

1. Контроллеры - компьютеры или специализированные контроллеры, которые осуществляют сбор и обработку информации о состоянии системы, ее параметрах и процессах.

2. Датчики и измерительные приборы - устройства, которые измеряют и передают информацию о различных параметрах энергоснабжения, таких как напряжение, ток, мощность, температура, давление и т.д.

3. Актуаторы - устройства, которые управляют состоянием системы, например, открывают и закрывают клапаны, запускают и останавливают насосы, переключают подстанции и т.д.

4. Системы связи - каналы связи, которые обеспечивают передачу информации между различными компонентами АСКУЭ.

5. Программное обеспечение - программы, которые управляют работой АСКУЭ и обеспечивают анализ и представление информации о состоянии системы.

6. Пользовательский интерфейс - средства взаимодействия операторов системы с АСКУЭ, позволяющие им просматривать и контролировать состояние системы, проводить диагностику и выполнить необходимые операции.

7. Архивы данных - базы данных, в которых хранится история работы системы, данные о нарушениях и авариях, аналитические отчеты и т.д.

Обычно, АСКУЭ имеет три уровня(рис.1).

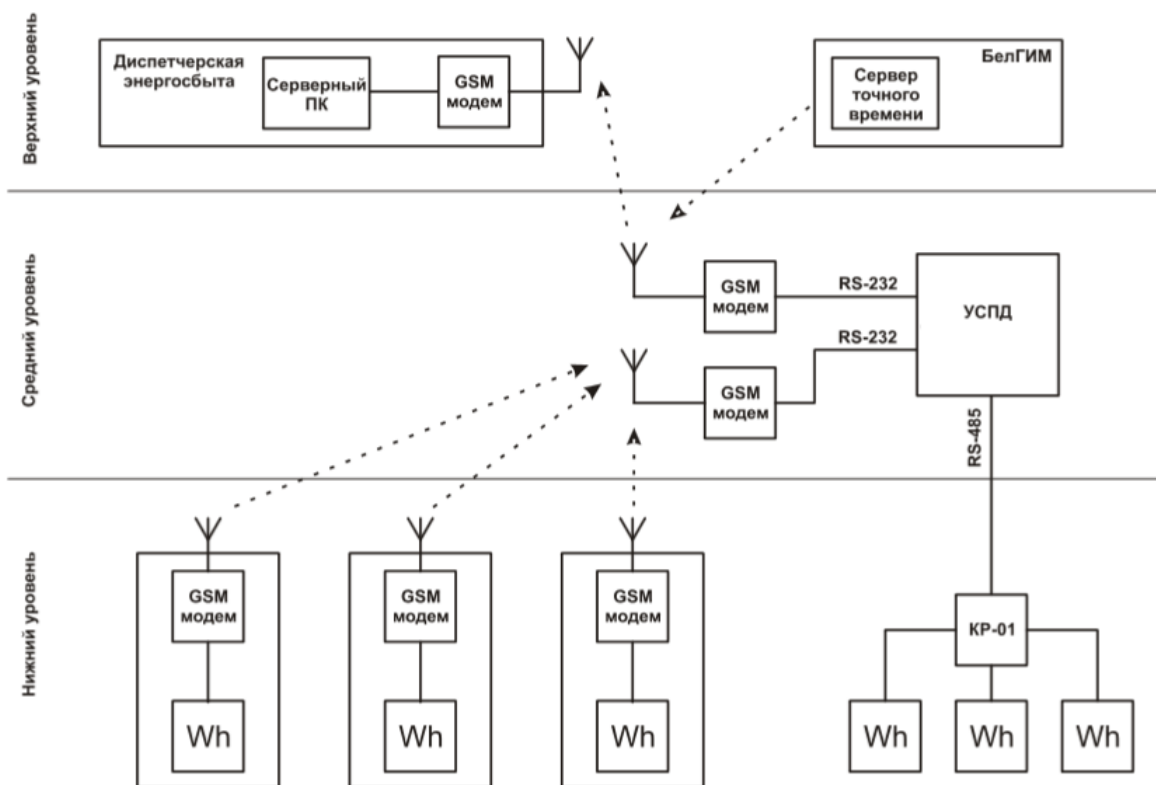


Рис. 1 – Типовая структурная схема АСКУЭ.

Нижний уровень включает многозадачные счетчики электроэнергии, измерительные трансформаторы тока и напряжения, а также вторичные измерительные цепи. Этот уровень отвечает за измерение электропотребления в точке учета, учет и хранение информации о событиях в электронной памяти счетчика и передачу цифровой информации на средний уровень через каналы связи.

Счетчики электроэнергии - это приборы, которые измеряют количество потребляемой электроэнергии. Существуют счетчики непосредственного включения и трансформаторного. Первые напрямую подсоединяются в сеть, а вторые нуждаются в подключении со специальным трансформатором, который включается в цепь перед самим счетчиком.



Требования к счетчикам зависят от специфики здания и нагрузки. Они должны соответствовать стандартам безопасности и точности измерений. Кроме того, они должны иметь возможность работы в широком диапазоне токов и напряжений, иметь встроенные защитные механизмы от перегрузок и коротких замыканий, а также возможность связи с системами управления и мониторинга.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения (ИТТ и ИТН) – это устройства, используемые для преобразования значений тока и напряжения в измеряемые величины, которые могут быть использованы для мониторинга, контроля и управления электрооборудованием.

ИТТ используются для измерения силы тока в электрических цепях высокого напряжения, например, в распределительных сетях, где ток может достигать очень высоких значений. Они также могут использоваться для снятия показаний силы тока в оборудовании, которое находится под напряжением.

ИТН, в свою очередь, используются для измерения напряжения в электрических цепях. Они используются для измерения напряжения в высоковольтных трехфазных системах, стабилизации напряжения в инверторных системах, и контроля за качеством электрической энергии.

Оба типа трансформаторов являются измерительными устройствами, которые преобразуют физические величины (ток или напряжение) в электрические сигналы, которые могут быть использованы для дальнейшей обработки и контроля. Они очень важны для контроля и управления электрооборудованием, так как предоставляют точную информацию о состоянии системы и могут сигнализировать о возможных проблемах.

Требования к трансформаторам тока:

1. Класс точности: измерительные обмотки трансформаторов тока, к которым подключаются расчетные счетчики электрической энергии, должны иметь класс точности не ниже 0,5S.
2. Коэффициент безопасности трансформатора тока (показатель, при превышении которого подключенные приборы выйдут из строя) не должен превышать коэффициент безопасности приборов.
3. Диапазон тока: как правило, метрологические характеристики ТТ обеспечены в диапазоне первичного тока от 20% до 120 % от номинального.
4. Нагрузка вторичных цепей не должна превышать номинальную мощность трансформатора тока.

Требования к трансформаторам напряжения:

1. Класс точности: Трансформаторы напряжения, применяемые для расчетного учета электроэнергии, должны иметь класс точности основной (измерительной) вторичной обмотки не ниже 0,5.
2. Нагрузка вторичных цепей не должна превышать номинальную мощность трансформатора тока.
3. Допустимое падение напряжения на участке от трансформаторов напряжения до счетчиков учета электроэнергии должно составлять не более 0,25% от номинального напряжения.

Счетчик трансформаторного включения измеряет высокое напряжение, а затем его преобразовывает в низкое с помощью трансформатора. Он обеспечи-

вает надежное измерение потребления энергии даже при высоких токах и напряжениях.

Счетчик непосредственного включения работает на основе прямого измерения тока и напряжения в электрической сети. Это более простой и дешевый способ измерения потребления энергии, но он менее точный при больших токах.

Средний уровень включает устройства сбора и передачи данных (УСПД) и каналобразующую аппаратуру. Данный уровень обеспечивает сбор и передачу информации на верхний уровень. При помощи УСПД можно не только производить учет потребленных ресурсов, но и мониторить состояние оборудования и выявлять возможные проблемы в работе системы управления ресурсами. Это позволяет предотвратить аварии и сократить затраты на ремонт и обслуживание оборудования.

Верхний уровень включает технические средства приема-передачи данных, программное обеспечение (ПО), серверы АСКУЭ, технические средства для организации локальной вычислительной сети и средства информационной безопасности. Этот уровень обеспечивает автоматический сбор и хранение результатов измерений, диагностику состояния, подготовку отчетов, а также импорт-экспорт данных.

Все уровни АСКУЭ связаны между собой каналами связи.

По назначению АСКУЭ промышленных предприятий принято подразделять на системы коммерческого и технического АСКУЭ.

- Коммерческий (расчетный) учет (АСКУЭ) – это учет электроэнергии между Энергоснабжающей организацией и абонентом. Точки учета (как правило) расположены на границе балансового разграничения полномочий абонента и Энергоснабжающей организации. Средства измерений (счетчики) должны быть внесены в Госреестр СИ РФ.

- Технический учет (АСКУЭ) – это учет внутри абонента (цех, участок, АБК, котельная и т.д.) - служит для оценки энергопотребления подразделений предприятия.

На практике, как правило, используется смешанный коммерческий и технический учеты (АСКУЭ) предприятия. [2]

Рассмотрим организацию системы автоматизированного учёта электроэнергии на промышленном предприятии.

1. Анализ потребления электроэнергии на промышленном предприятии.

Первым шагом в организации системы автоматизированного учёта электроэнергии на промышленном предприятии является анализ потребления электроэнергии. Для этого необходимо провести обзор существующих систем учёта электроэнергии и проанализировать данные о потреблении электроэнергии за последние несколько лет.

2. Выбор системы автоматизированного учёта электроэнергии.

На основе анализа данных о потреблении электроэнергии необходимо выбрать систему автоматизированного учёта электроэнергии, которая наиболее подходит для конкретного промышленного предприятия. При выборе системы учитываются следующие факторы:

- точность измерения потребления электроэнергии;
- возможность интеграции с другими системами управления;
- стоимость системы и её эксплуатации.

### 3. Установка системы автоматизированного учёта электроэнергии.

После выбора системы автоматизированного учёта электроэнергии необходимо провести установку и настройку системы. Это может включать в себя установку датчиков потребления электроэнергии, подключение системы к существующей сети управления и настройку программного обеспечения.

### 4. Обучение персонала.

После установки системы автоматизированного учёта электроэнергии необходимо обучить персонал её использованию. Это может включать в себя обучение работе с программным обеспечением, обучение правилам эксплуатации системы и обучение техническому обслуживанию системы.

### 5. Мониторинг и анализ данных.

После установки и обучения персонала система автоматизированного учёта электроэнергии должна быть использована для мониторинга и анализа данных о потреблении электроэнергии. Это позволит оптимизировать потребление электроэнергии и снизить затраты на энергетику.

## **Заключение**

Промышленные предприятия потребляют значительное количество энергии, а традиционные системы учета энергии неэффективны для точного контроля и управления потреблением энергии. Предлагаемое решение по учету электроэнергии, основанное на использовании современных программно-аппаратных средств могло бы помочь промышленным предприятиям лучше управлять своим энергопотреблением. Система обеспечивает возможности мониторинга в режиме реального времени, точный сбор данных и анализ, позволяя управленческому персоналу принимать обоснованные решения, повышающие энергоэффективность, снижающие затраты и повышающие производительность системы. Такая система приведет к рациональному использованию энергии, способствующее сокращению выбросов углерода и обеспечивающее сохранение природных ресурсов.

## **Литература**

1. Постановление Министерства энергетики РБ № 28 от 30.08.2005. О Концепции приборного учета электрической энергии в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://belzakon.net/Законодательство/Постановление\\_Министерства\\_энергетики\\_РБ/2005/77348/](https://belzakon.net/Законодательство/Постановление_Министерства_энергетики_РБ/2005/77348/). – Дата доступа: 20.04.2023.

2. Автоматическая система контроля и учета электроэнергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/3583794/>. – Дата доступа: 19.04.2023.

УДК 621.313

**ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И КОНТРОЛЯ В  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ**  
**APPLICATION OF AUTOMATION AND CONTROL DEVICES IN ELEC-  
TRIC MACHINES**

А.П. Буйвол, И.М. Гаращенко, Е.С.Халецкий  
Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск  
A. Bujvol, I. Garashchenya, E. Khaletski  
Supervisor - S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk

**Аннотация:** рассмотрели основные направления в автоматизации, способы её использования, недостатки и преимущества её использования, а также перспективы развития в ближайшем будущем.

**Abstract:** considered the main directions in automation, ways to use it, the disadvantages and advantages of its use, as well as development prospects in the near future.

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

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

### **Введение**

В наше время с целью повышения надёжности и эффективности работы электросети, сокращения затрат на её обслуживание и исключения человеческого фактора, большинство процессов, таких как изменение и регулировка напряжений, режимов и управление, полностью или частично автоматизированы. Это позволяет уменьшить время, необходимое для получения сведений о необходимом устройстве, а также оперативно выполнять действия по результатам полученных данных.

### **Основная часть**

Автоматизированная система предлагает следующие функции:

- сбор, обработка и хранение дискретной, аналоговой информации;
- управление устройствами регулирования под нагрузкой силовых трансформаторов;
- управление коммутационной аппаратурой;
- контроль работы релейной защиты и автоматики, фиксация и реагирование на не предусмотренные аварийные и переходные процессы;
- учет и контроль качества электрической энергии;
- контроль эксплуатируемых каналов связи и устройств;
- мониторинг параметров и вывод их в удобной форме для обслуживающего персонала;
- повышенная безопасность работы с оборудованием комплекса.
- снижение затраты на обслуживание устройств;
- диагностика технических параметров установки;
- повышенная эффективность работы оборудования;

- сокращение потерь электроэнергии и расходов на обслуживание.

На сегодняшний день достаточно активно ведётся внедрение цифровых технологий в электrorаспределительный комплекс. Конечный результат данных улучшений представляет собой интеллектуальные электрические сети, которые позволяют решить две основные задачи:

- 1) объединение абсолютно всех источников энергии в единую энергосистему, совершенно независимо от типов источников либо же их удаленности;
- 2) круглосуточный мониторинг состояния всего оборудования;

Контроль состояния электрооборудования, как один из обязательных пунктов для обеспечения бесперебойности работы, прописан в ПУЭ и, как правило, предполагает применение ряда различных техник для определения характеристик электрических машин:

- численно-аналоговые измерения,
- периодические зрительные измерения (уровень масла, например),
- визуальный и акустический контроль (посторонние звуки под нагрузкой и загрязненность).

Регулируемые параметры и их контроль. Цифровизация мониторинга.

Контроль параметров, а также их обработка и учёт в настоящее время ведётся именно в цифровом виде.

Цифровизация контроля — непрерывное получение цифровых данных, исчерпывающе отображающих состояние интересующего нас устройства. В процессе последующей работы с данными они анализируются и преобразуются в конкретные решения относительно распределительной системы. Логично, что в процессе внедрения цифровизации контроля состояния трансформатора, следует предусмотреть совместимость контролирующих приборов с глобальной цифровой энергетической системой. Разумнее всего использовать именно те приборы, что при проведении первичных основных замеров характеристик образуют массивы цифровых данных, доставляющийся по оптоволокну в систему управления.

Как правило, мониторинг и регулирование осуществляется над следующими параметрами:

- токи и напряжения высшей и низшей обмоток;
- различные виды мощностей (активная, реактивная, полная);
- превышения нагрузки и напряжения в трансформаторе;
- температура в конкретных точках электрической машины;
- управление системой охлаждения и отслеживание её состояния;
- наличие определённых газов и их соединений в масле машины;
- содержание влаги в масле;
- механические характеристики электрической машины;
- условия окружающей среды;
- положения и состояния РПН;
- состояние системы аварийной сигнализации.

Отсортированные данные следует разделить на две группы и организовать самодиагностику системы мониторинга состояния электрической машины.

- **Первая группа** — это результаты анализа технических параметров трансформатора и расчет его состояния в будущем.
- **Вторая группа** — это создание информационной базы результатов.

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

Например, главным способом регулирования в трансформаторах является устройство РПН (регулирование под нагрузкой). На трансформаторах связи РПН реализует поддержку напряжения в питающих электрических сетях в определённых диапазонах, а также, позволяет добиться определённой независимости уровней напряжения в питающих и распределительных сетях и даёт возможность оптимизировать режим напряжения в электроэнергетической системе.

Для реализации функций регулирования напряжения, устройства РПН (рис.1) должны снабжаться аппаратами автоматического мониторинга и регулирования напряжения.

Напряжение и ток на выходе регулируемого трансформатора через измерительный трансформатор напряжения и трансформатор тока отправляются на входы регулятора. Устройства токовой компенсации выдают напряжение, эквивалентное току нагрузки, и как итог интегрируемое с напряжением, пришедшим со входа измерительного органа. В измерительном органе реализуется сравнение итогового сигнала с напряжениями уставки. Эти напряжения задаются с помощью регулятора уставок. Если напряжение на входе измерительного органа будет меньше напряжения уставки, то будет подан управляющий сигнал на первом выходе измерительного. В том случае когда значение превысит максимальное, будет подан управляющий сигнал на второй выход измерительного органа. Диапазон между напряжениями уставки именуется мёртвой зоной регулятора и выражен в процентах от одной из уставок.

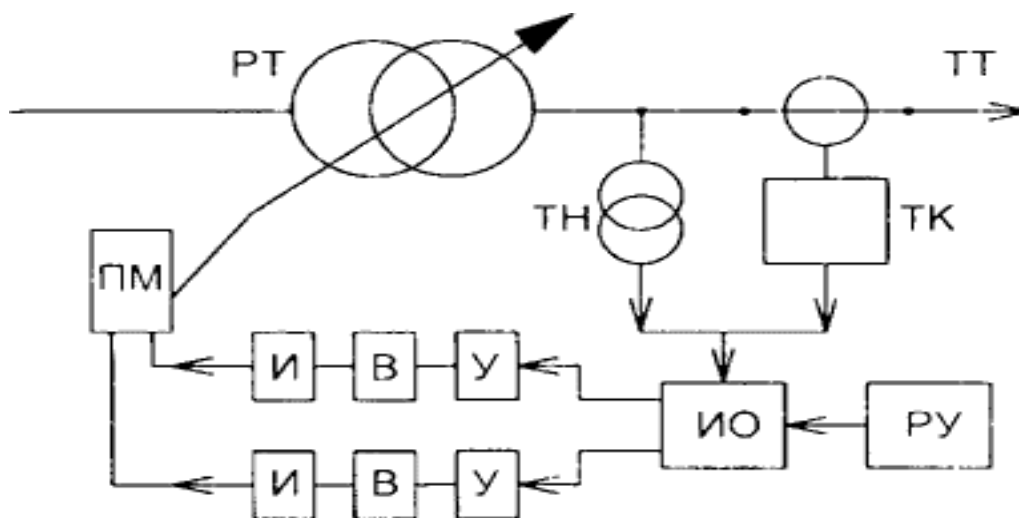


Рис. 1 Схема устройства автономного управления напряжением.

Импульсы управления усиливаются при помощи специальных органов и через реле времени приходят на исполнительные органы. Далее привод РПН переключает контакты для увеличения или снижения напряжения.

Метод компенсации токов помимо стабилизации выходного напряжения дает возможность изменять его в зависимости от переключений нагрузки, иными словами можно осуществлять встречное регулирование. Наличие мёртвой зоны и временной уставки не позволяет устройству постоянно переключаться. Для обеспечения устойчивости регуляции мёртвая зона должна быть не меньше чем ступень регулирования и в большинстве случаев будет равна 1,2 – 1,4 ступени. При увеличении мертвой зоны будет снижаться частота переключений устройства. Уставка времени обычно лежит в пределах от 1 до 5 минут и находится по расчетам или экспериментально.

Активная разработка методов контроля параметров трансформаторов началась в конце шестидесятых годов прошлого века. Эти методы основываются на многообразии разных физических принципов. Доступные в данный момент времени способы контроля имеют множество применений. Всё многообразие этих методик можно разбить на 4 группы (табл.1).

Таблица 1 Методы мониторинга силовых трансформаторов

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	Первая группа	различные методы с эксплуатацией стационарных датчиков, способных измерять наличие и содержание газов в объёме масл
	Вторая группа	методы с портативным контрольно-измерительным оборудованием
	третья группа	методы, задействующие лаборатории. Основное их преимущество — высокая точность измерений
	четвертая группа	состоит из методов, объединяющих системы постоянного контроля и диагностики. Отличительной чертой данной группы от остальных трёх является отсутствие встроенных датчиков и наличие внешних устройств, контролирующих те или иные параметры

**Заключение**

Основной перспективой развития ЭЭС является полная её автоматизация. Уже в наше время делаются шаги в данном направлении. Основой автоматизации на данном этапе развития является работа с имеющимися параметрами и по достижению определённых значений, включения определённых устройств или выведения из работы других. Перспективным развитием автоматизации работы ЭЭС может стать внедрение искусственного интеллекта или его упрощённой версии в качестве системы обработки данных и на основе анализа данных, по уже внесённым алгоритмам, принимается решение о дальнейших изменениях в работе системы

### Литература

1. Непрерывный контроль состояния трансформаторов. Электрооборудование электрических станций, подстанций и сетей. ОИР № 2, 2002г. Новости электроэнергетики мира.
2. Новая система онлайн-мониторинга газов/влаги в трансформаторах и РПН. [Электронный ресурс]/ Новая система онлайн-мониторинга газов/влаги в трансформаторах и РПН. Режим доступа: [https://www.pergam.by/catalog/electrical\\_equipment/monitoring\\_transformers/](https://www.pergam.by/catalog/electrical_equipment/monitoring_transformers/) Дата доступа: 25.02.2023



УДК 621.31

**ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
FEATURES OF COMPENSATION CONVERTERS**

Е.А. Шетик, С.П. Клопов

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

Viachaslaukn@gmail.com

E. Shetik, S. Klopov

Supervisor – V.Kalechyts, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация:* данная статья посвящена анализу принципиальных схем компенсационных преобразователей.

*Abstract:* in this article the attention is drawn to analysis of the schematic diagrams of compensation converters.

*Ключевые слова:* двенадцатифазный преобразователь, преобразователь с двойной частотой, мостовой преобразователь, реактивная мощность, уравнительный реактор.

*Keywords:* twelve-phase converter, double frequency converter, bridge converter, reactive power, equalizing reactor.

**Введение**

Передача по линиям больших значений реактивной мощности  $Q$  приводит к возрастанию потерь мощности в энергосистемах и снижению напряжения на приемной стороне линий электропередачи. Из-за большой реактивной мощности может наблюдаться уменьшение пропускной способности.

Источниками реактивной мощности помимо конденсаторов, синхронных генераторов, синхронных компенсаторов, синхронных двигателей, тиристорных источников в сочетании с реактивными элементами (реакторами или конденсаторными батареями) могут быть компенсационные преобразователи. Компенсационные преобразователи могут работать в сочетании с компенсационными выпрямителями. Выбор типа устройства и мощность производится по техническим и экономическим соображениям.

**Основная часть**

Компенсационные преобразователи целесообразно использовать в электрических сетях с преобладанием потребителей электроэнергии, имеющих резко-переменный характер нагрузки. Основными элементами компенсационных преобразователей являются управляемые тиристоры в сочетании с реакторами и батареями конденсаторов. Регулируемый диапазон реактивной мощности определяется схемными решениями таких источников реактивной мощности (применительно к конкретному типу потребителей электроэнергии). В зависимости от схемных решений компенсационные преобразователи могут не только выдавать реактивную мощность, но и потреблять ее.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема компенсационного преобразователя с двойной частотой («схема КПИ»). В данной схеме со стороны катодов вентилей имеется уравнивательный реактор, к которому подключаются соединённый в треугольник конденсаторы.

При разряде и заряде этих конденсаторов происходит переход тока на очередную фазу, что воспринимается сетью как дополнительная выработка реактивной мощности [1].

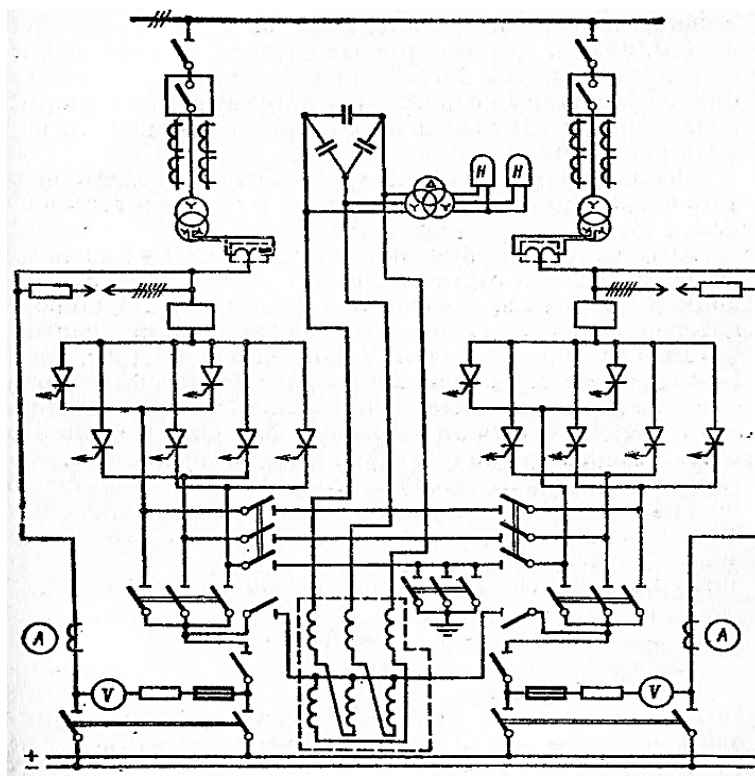


Рисунок 1 – Принципиальная схема компенсационного преобразователя с двойной частотой

Схема мостового преобразователя на силовых транзисторах изображена на рисунке 2. Дополнительно данный преобразователь оснащен устройством, состоящим из маломощного неуправляемого выпрямителя на диодах, катодного и анодного фильтров, вспомогательных транзисторов и диодов. Для начала разряда конденсатора необходимо подать управляющий импульс на включение силового транзистора этой фазы и одновременно на вспомогательный транзистор VT7. Заряд конденсатора осуществляется путём одновременного отключения силового транзистора в этой фазе и вспомогательного транзистора VT7 [2].

На рисунке 3 представлен условно-двенадцатифазный каскадный компенсационный преобразователь. Ток первичной обмотки 1 трансформатора определяется суммой токов вторичных обмоток 2, 3, 4 и 5. Токи каждой вторичной обмотки замыкаются поочередно через управляемые вентили 6, двухфазные уравнивательные катушки 7 и 8 и через коммутирующие конденсаторы 9. Группа конденсаторов 9 обеспечивает коммутацию токов в вентиле компенсационной части преобразователя при опережающем угле регулирования (напряжение на аноде вступающего в работу вентиле меньше, чем на аноде вентиле, заверша-

ющего работу). В результате реактивная составляющая анодного тока опережает анодное напряжение [3].

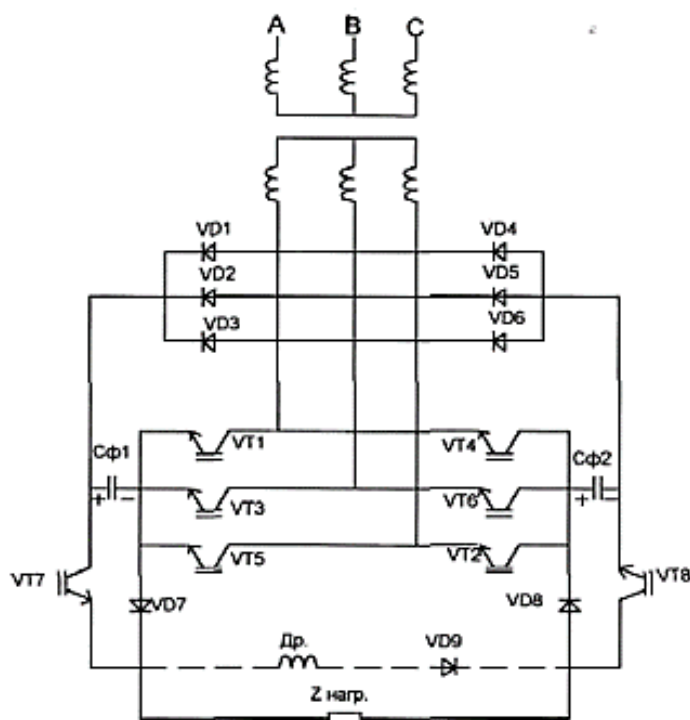


Рисунок 2 – Принципиальная схема мостового преобразователя на силовых транзисторах

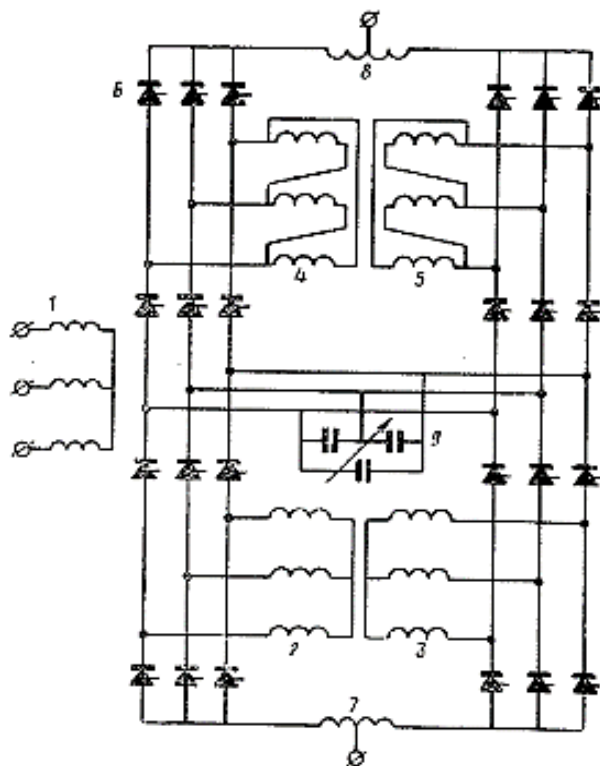


Рисунок 3 – Упрощенная принципиальная схема условно-двенадцатифазного каскадного компенсационного преобразователя

Рассмотрев принципиальные схемы компенсационных преобразователей, представленных на рисунках 1-3, был осуществлен сравнительный анализ, результаты которого сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнение схем компенсационных преобразователей

	Особенности	Достоинства	Недостатки	Применение
Компенсационный преобразователь с двойной частотой	Наличие уравнительного реактора, который увеличивает установленную мощность на 25-30%. Большое количество вентилях, трансформаторов и прочих элементов	Схема даёт компенсирующую мощность, в 2,5-3 раза превышающую номинальную мощность конденсаторов	Генерирование высших гармоник тока в сеть; Необходима повышенная изоляция вентилях от рамы, трехфазный уравнительный реактор и другое оборудование, требующее для размещения дополнительные площади	Крановые двигатели, вентиляционные системы, транспортное оборудование (лифты, конвейеры) и т.д.
Мостовой преобразователь на силовых транзисторах	Небольшое число элементов по сравнению с двумя другими схемами, отсутствие уравнительного реактора	Небольшой размер трансформатора и меньшие пульсации; высокая скорость нарастания напряжения на транзисторах	Низкая способность генерации реактивной мощности; невысокое быстродействие; высокие коммутационные потери	Асинхронные двигатели, трансформаторы, сварочные установки, реакторы и т.д.
Условно-двенадцатифазный каскадный компенсационный преобразователь	Отсутствие уравнительного реактора, из-за чего установленная мощность меньше, чем у компенсационного преобразователя с двойной частотой. Большое кол-во вентилях, наличие уравнительных катушек	Высокая отдача регулируемой реактивной мощности по отношению к полной; преобразует энергию переменного тока в энергию постоянного или наоборот	Сложность конструкции; низкая отдача регулируемой реактивной мощности по отношению к полной; перегрузка коммутирующих конденсаторов	Цветная металлургия, электрофицированный транспорт, химическая промышленность, устройства для передачи энергии на постоянном токе

### Заключение

Рассмотренные три схемы имеют хорошие технические характеристики на сегодняшний день. Однако не следует забывать о том, что каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому поиск наилучшего ре-

шения, максимально соответствующего поставленному техническому заданию, будет оставаться задачей разработчика.

Можно выделить принципиальную схему компенсационного преобразователя с двойной частотой. Наличие уравнительного реактора позволяет увеличить установленную мощность преобразователя до 30%. Несмотря на наличие большого числа коммутационных элементов, экономических затрат и затрудненностью обслуживания по сравнению с другими двумя схемами, принципиальная схема компенсационного преобразователя с двойной частотой не теряет своей актуальности на сегодняшний день.

### Литература

1. Мукосеев, Ю. Л. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов по специальности "Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства" / Ю. Л. Мукосеев. – Москва: Энергия 1973. – 583 с.

2. Энергосберегающая технология преобразования переменного тока в постоянный ток [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ispu.ru/files/2007-02-19.pdf>. – Дата доступа: 26.04.2023

3. Условно-двенадцатифазный каскадный компенсационный преобразователь: пат. SU 410523 / Рябчий В. П., Чиженко И. М. – Опубл. 05.01.1974.

УДК 628.9

## УПРАВЛЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЕМ LIGHTING CONTROLS

Д.В. Лагунов, Д.А. Козловская  
Научный руководитель – Ю.И. Богданов, преподаватель-стажер  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
D. Lagunov, D. Kozlovskaya  
Supervisor – Y. Bogdanov, Trainee Teacher  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** автоматическое управление освещением стало стандартной функцией в новом строительстве из-за преобладающих энергетических норм. Достижения в области технологий в настоящее время позволяют использовать широкий спектр глобальных и локальных стратегий автоматического и ручного управления для обеспечения экономии энергии и удовлетворения визуальных потребностей.*

***Abstract:** automatic lighting controls have become a standard feature in new construction due to prevailing energy codes. Advancements in technology now enable a broad range of globalized and local, automatic and manual control strategies to generate energy savings and support visual needs.*

***Ключевые слова:** освещение, автоматизация, управление, приборы, источники.*

***Keywords:** lighting, automation, control, devices, sources.*

### Введение

Автоматическое управление освещением стало стандартной функцией в новом строительстве из-за преобладающих энергетических норм. Достижения в области технологий в настоящее время позволяют использовать широкий спектр глобальных и локальных стратегий автоматического и ручного управления для обеспечения экономии энергии и удовлетворения визуальных потребностей.

### Основная часть

Элементы управления освещением являются неотъемлемой частью любой системы освещения. Самым простым примером управления освещением является обычный выключатель. Когда выключатель включен, цепь замыкается, позволяя протекать току для приведения в действие подключенной системы освещения.

Для управления системами освещения в коммерческих и промышленных зданиях используется широкий спектр устройств и систем. Особый интерес представляет автоматизация освещения, которая в настоящее время представляет собой важный рубеж в области управления зданиями и энергопотреблением. Автоматическое управление освещением автоматически переключает или приглушает системы освещения на основе заданного входного сигнала. Авто-

матизация этой функциональности может обеспечить значительные преимущества.

В некоторых отраслях промышленности на освещение приходится более 60% расходов предприятия на электроэнергию и 40% от общего счета за электроэнергию. Автоматическое управление освещением может значительно снизить эксплуатационные расходы за счет переключения или приглушения освещения в зависимости от времени суток, занятости помещения, количества доступного дневного света, текущего уровня светоотдачи лампы и других факторов. Автоматическое управление освещением может снизить потребление энергии на освещение на 50% в существующих зданиях и по крайней мере на 35% в новом строительстве. К снижению энергопотребления относятся снижение нагрузки и пикового спроса, что может снизить плату за потребление, взимаемую коммунальными службами. Кроме того, автоматизация освещения может обеспечить настройку благодаря возможности изменять пространство с помощью затемнения или изменения цвета; гибкость, позволяя пользователям мгновенно адаптировать пространство для различных целей; возможность создания адаптивной системы освещения, которой можно управлять глобально и локально с помощью автоматического управления; возможность адаптации систем электрического освещения к стратегиям дневного освещения; повышенная безопасность; снижение “светового загрязнения” (свечение неба, проникновение света и блики) путем приглушения или переключения наружного освещения в зависимости от времени суток или заполняемость; расширение рабочих пространств с помощью технологии, дающей видимый эффект; и потенциальное повышение удовлетворенности работников за счет предоставления пользователям возможности самостоятельно регулировать уровень освещенности. Список можно продолжать.

Автоматизация освещения может быть полностью автоматизированной или содержать элементы ручного управления; она может быть локализованной, глобальной или и той, и другой; она может быть проводной или беспроводной; и ее можно использовать для переключения или затемнения. В настоящее время доступно большое разнообразие проверенных и развивающихся технологий для достижения широкого спектра целей в области управления зданиями и энергопотреблением.

Элементы управления освещением могут выполнять одну или несколько из семи основных функций: включение / выключение, распознавание присутствия, планирование, настройка задач, сбор дневного света, компенсация снижения яркости и управление спросом.

Включение / выключение - это основная функция управления, достигаемая путем переключения.

Распознавание присутствия используется в периодически занятых помещениях, как правило, для автоматического включения света, когда помещение становится занятым, и выключения, когда оно становится незанятым. Некоторые устройства распознавания присутствия включаются вручную и автоматически выключаются. Технология датчика присутствия, как правило, ультразвуковая (улавливает изменения в передаваемых звуковых волнах, возвращающихся-

ся к устройству), пассивная инфракрасная (улавливает изменения температуры в помещении) или комбинация того и другого.

Планирование используется для зон с предсказуемой занятостью, в которых система управления приглушает, активирует или выключает систему освещения по заранее установленному расписанию. Обычно предоставляются локальные переопределения вручную.

Настройка подразумевает настройку светоотдачи системы освещения до желаемого уровня, необходимого для выполнения задачи или других целей, таких как эстетика или настройка настроения. Это может быть достигнуто либо путем затемнения, либо путем переключения уровней освещения (например, двухуровневое переключение, при котором половина системы освещения в помещении отключается, в то время как другая половина продолжает работать).

После того как общий тип системы управления определен, следующим шагом является определение конкретных устройств управления. Для того чтобы сделать это, важно установить критерии для оценки вариантов. Ниже приведены некоторые из ключевых критериев, которые следует учитывать.

Типичные элементы управления:

**Экономическая эффективность:** средства управления освещением, снижающие потребление энергии и / или снижающие спрос, являются инвестицией в прибыльность. Варианты управления должны оцениваться на основе первоначальной стоимости установки в сравнении с экономией эксплуатационных расходов, чтобы определить окупаемость инвестиций и период окупаемости. Более желательны варианты, которые приносят наибольшую отдачу от инвестиций и отвечают другим критериям отбора.

**Адаптивность:** для проектов на существующих объектах средства управления освещением следует оценивать на основе того, насколько хорошо они могут быть адаптированы к объекту и насколько выгодными они будут. Например, может ли новая система управления быть сопряжена с существующими локальными элементами управления, или элементы управления должны быть заменены? Если сбор урожая в дневное время представляет интерес, достаточно ли для этого дневного света? Адаптивность относится не только к применению средств управления в существующих помещениях, но и к обеспечению того, чтобы как в существующих помещениях, так и в новом строительстве система управления была масштабируемой с учетом будущего использования помещений и потенциальных достижений в области технологий.

**Гибкость:** элементы управления могут быть оценены на основе степени гибкости, требуемой от системы освещения, которая, в свою очередь, зависит от того, как используется пространство. В спортивном зале, например, могут проводиться самые разнообразные мероприятия, от спортивных мероприятий до собраний и спектаклей. Гибкая система освещения, включаемая соответствующими элементами управления, может отвечать всем этим требованиям.

**Интеллектуальные локальные устройства включения/выключения:** интеллектуальные локальные устройства включения/выключения состоят по меньшей мере из двух элементов: логического или интеллектуального модуля и устройства переключения питания. Логические или интеллектуальные элемен-



ты варьируются в зависимости от потребностей конкретных приложений. Интеллектуальный ввод в своей простейшей форме может быть регулятором времени или датчиком присутствия. Каждый из них обычно используется для управления одной нагрузкой и подключается непосредственно к ней.

### **Заключение**

Управление освещением - это захватывающая область в области освещения, поскольку технологии автоматизации освещения быстро развиваются, а зрелость повышает надежность и возможности при одновременном снижении сложности и стоимости. Доказано, что автоматизация освещения позволяет экономить энергию при одновременном потенциальном повышении гибкости, безопасности, товарности помещения, удовлетворенности работников и эстетичности. Доступно большое количество технологий и стратегий для достижения желаемых результатов и производительности практически для любого популярного приложения.

### **Литература**

1. Автоматизация освещения [Электронный ресурс]/ автоматизация освещения. -Режим доступа:<https://wirenboard.com/ru/pages/lighting/>– Дата доступа: 26.02.2023.
2. Автоматизация освещения [Электронный ресурс]/ автоматизация освещения. -Режим доступа: <https://ap-n.com/avtomatizacija-osveshhenija/>– Дата доступа: 28.02.2023.
3. Схема управления освещением[Электронный ресурс] -Режим доступа: [Электронный ресурс]:<https://ddecad.ru/osnovnye-vidy-shem-upravleniya-osvescheniem/>– Дата доступа: 27.02.2023.

УДК 621.3

**ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРОВ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН  
MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGES IN THE INSULATION OF  
STATORS OF HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL MACHINES**

Д.В. Лагунов, Д.А. Козловская

Научный руководитель – С.В. Константинова, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

D. Lagunov, D. Kozlovskaya

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** *Онлайн - мониторинг частичного разряда во вращающейся электрической машине - это полезный инструмент для машинного прогнозирования, потому что он позволяет сократить расходы на проверку и связан с соответствующими проблемами. Чтобы проанализировать текущий контекст мониторинга частичных разрядов, в этой статье мы представили обзор литературы, основанный на концепциях частичных разрядов во вращающихся машинах, методах сбора данных, современном коммерческом оборудовании и последних методологиях обнаружения и распознавания образов частичных разрядов.*

**Abstract:** *Online monitoring of partial discharge in a rotating electric machine is a useful tool for machine forecasting, because it reduces the cost of verification and is associated with related problems. In order to analyze the current context of partial discharge monitoring, in this article we have presented a literature review based on the concepts of partial discharges in rotating machines, data collection methods, modern commercial equipment and the latest methodologies for detecting and recognizing partial discharge patterns.*

**Ключевые слова:** *частичный разряд (ЧР); вращающаяся машина; мониторинг; двигатель; генератор; машина;*

**Keywords:** *partial discharge; rotating machine; monitoring; motor; generator; machine.*

### **Введение**

В связи с широким распространением электрических машин, предъявляемым к ним высоким требованиям и эксплуатационной надежности, возникает вопрос возможности ранней диагностики неисправностей электрических машин.

### **Основная часть**

Область исследований, которая связана с разработкой методов диагностики неисправностей вращающихся электрических машин, очень широка. Это привлекает большое внимание исследователей и организаций, при всем этом диагностика проводится из данных, которые собраны при разных условиях работы машины в разных областях анализа.

Основным фактором износа является электрический ЧР в обмотке статора, так как он связан с высокой интенсивностью, ЧР — это небольшие кратковременные разряды электрического тока, которые вызваны диэлектрическим пробоем небольшой области системы изоляции обмоток.

Постоянная активность ЧР вносит значимый вклад в разрушение изоляции обмотки статора и чаще всего приводит к отказам. Ранняя диагностика возникновения ЧР необходима для того, чтобы можно было определить качество системы изоляции обмоток, в частности для блоков среднего и высокого напряжения, из-за высоких затрат, которые связаны с данными активами. В результате наблюдение активов с помощью анализа ЧР играет важную роль для осуществления надлежащего планирования технического обслуживания.

О возникновении ЧР говорят электрические импульсы, радиочастотные импульсы, акустическая эмиссия и оптическая эмиссия. В литературе большое значение имеют онлайн - методы анализа электрических импульсов из-за возможности обнаружения ЧР внутри и снаружи изоляции, а также из-за возможности использования методов шумоподавления. В разных случаях методы, анализирующие другие доказательства, могут использоваться только как дополнительные средства обнаружения, так как анализ радиочастотных импульсов и акустических излучений может находиться под действием сильных внешних помех, что приводит к низкому отношению сигнал/шум. Для оптического излучения можно распознать только внешний разряд, так как внутренний разряд не виден.

Емкостные датчики и трансформаторы тока используются в нормативно-технической литературе для измерения ЧР. Конфигурация с датчиками используется для обнаружения ЧР в режиме онлайн.

Можно проводить в автономном режиме и в режиме онлайн измерение ЧР обмоток статора. Для того, что проводить измерения в автономном режиме требуется помощь внешнего источника напряжения, когда машина отключена от системы питания, в то время как онлайн-измерение может быть выполнено, когда машина работает нормально и подключена к системе питания:

- Самостоятельные измерения частичных разрядов выполняются через подачу внешнего источника с высоким напряжением во время каких-либо испытаний. МЭК 60034-27 рекомендует, чтобы определения ЧР при независимых испытаниях обмотки статора происходило в низкочастотном диапазоне, ниже трех МГц, из-за емкостной и индуктивной природы обмотки. Прочая первопричина выполнения теста на низкой частоте находится в том, что в зависимости от нахождения данного датчика относительно расположения источника ЧР высокочастотные составляющие сигнала ЧР, которые вызываются внешними источниками высокого напряжения, чаще всего ослаблены. Исходя из этого, точность обнаружения ЧР выше из-за большого диапазона частот обнаружения.

- При вводе в эксплуатацию и при нормальной эксплуатации проводят Онлайн - измерения ЧР для определения качества изоляции обмоток и ее соответствия стандартам эксплуатационной надежности. Для таких измерений ИЕС 60034-27-2 обращает внимание на то, что для нахождения ЧР разрешается использовать разный частотный диапазон: низкий (<3 МГц), высокий (3-30 МГц),

очень высокий (30-300 МГц) или сверхвысокий (300-3000 МГц). При измерениях ЧР на высоких частотах имеется больше преимуществ из-за того, что на этих частотах присутствует меньше шума в этой полосе. Однако, высокочастотные сигналы, намного легче ослабляются, и следовательно они значительно эффективны при нахождении ЧР вблизи клемм возбуждения.

Основная проблема онлайн -измерений заключается в том, что необходимо проанализировать характеристики и характер импульсов ЧР, обнаружить их наличие, а затем определить типы источников ЧР. В литературе сигналы ЧР рассматриваются по форме импульса во времени и по шаблонам ЧР с фазовым разрешением, которые представляют собой шаблоны, сложившиеся путем подсчетом импульсов в заданном временном промежутке исходя от амплитуды напряжения и фазовый угол импульсной активности ЧР.

Наблюдение фактического состояния изоляции обмотки электрической машины требует определения совместимых уровней ЧР для каждого вида электрической машины, чтобы можно было уверенно определить источники ЧР. Главная причина этого состоит в том, что расчет происходит по-разному на каждой машине, и невозможно надежно найти заранее определенный порог без заранее проведенного анализа особенностей машины. В литературе пороги обычно определяются в вольтах и основаны на нормах, где обстоятельства, при которых были получены измерения, не являются явными.

#### *Емкостные датчики.*

В источнике описывается про несколько конфигураций установки емкостных датчиков на терминалах электрических машин, которые определяются как простые, направленные и дифференциальные, как показано на рисунке 1, 2. В простой конфигурации используется только один датчик на фазу, который установлен на фазных клеммах машин, это делает эту конфигурацию наиболее чувствительной к шуму, так как она не допускает приглушения синфазного шума. В направленной конфигурации используются два датчика на фазу, один из них находится ближе к клемме фазы, а второй — на выходной шине машины, который находится на расстоянии не менее 2 м. В таком виде внешний шум отделяется от сигнала ЧР на основе анализа времени прихода импульса ЧР. Дифференциальная конфигурация указывается для конструкций машин с несколькими цепями на фазу и кольцевыми цепями, которые используются в гидротурбинах, где муфты прикреплены на кольца цепей статора. Когда шум исходит из внешней среды, он войдет в кольца цепи, разделится и пойдет в обоих направлениях. Если длина кольца цепи одинакова как слева, так и справа от выводов, то импульс придет на ответвители одновременно, а если проводники, которые соединяют ответвители с анализатором, имеют одинаковую длину, то сигналы придут одновременно. В таком случае анализатор будет трактовать сигнал как шум, а не ЧР. В случае асимметричных колец схемы можно градуировать длину кабеля емкостных соединителей, для того, чтобы возместить разное время прохождения в разных кольцах цепи. Время прихода импульса можно использовать для отделения шума от сигнала ЧР, используя эту методику.

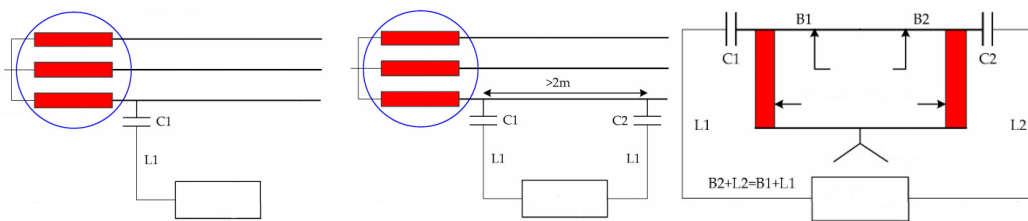


Рисунок 1 конфигураций установки емкостных датчиков на терминалах электрических машин



Рисунок 2 - емкостный датчик

*Датчики высоковольтные (трансформаторы тока).*

Данные датчики чаще всего устанавливают на каждой фазе внутри клеммной коробки для того, чтобы перехватывать ток частичного разряда от вращающихся электрических машин. Но в некоторых методиках ТТ применяются в системе заземления электрических машин при подключении к земле нейтрали. На рисунке 3 представлены схемы соединения датчиков. На рисунке 4 представлен датчик.

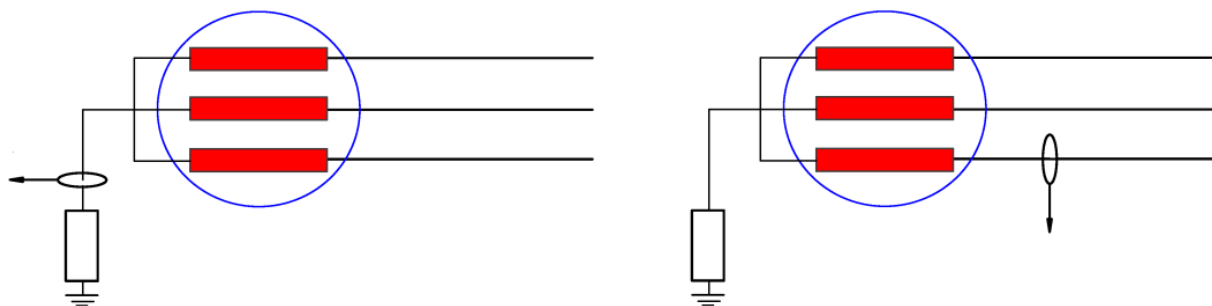


Рисунок 3 схемы соединения датчиков.



Рисунок 4 – датчик ТТ

Измерение ЧР может выполняться используя любой из упомянутых датчиков. Но, рекомендуется следовать международным советам для выполнения согласованных измерений ЧР. МЭК 60034-27 чаще всего используется в качестве эталона при измерении ЧР, где указывается только использование емкостных датчиков для сбора данных о ЧР.

#### **Заключение**

В ходе анализа методологий мониторинга ЧР во вращающихся электрических машинах было замечено, что много методологий рассматривают данные без присвоения критерия для того, чтобы определить уровень показателей ЧР. Это происходит из-за того, что подавляющее большинство работ основывается на стандартах без учета характеристик электрических машин и операционных сред. Таким образом, чтобы найти критерий приемлемости машины на основе анализа измерений ЧР, нужно получить большой объем тестовых данных из машины, для использования статистических методов или методов машинного обучения для нахождения порога и классификации состояния обмотки.

Другим фактором, который обширно не анализируется в литературе, является влияние системы привода на нахождение ЧР, так как они мешают обнаружению либо из-за добавления фоновых шума, либо из-за усиления импульса, в дополнение к необходимости иметь эталон частоты для анализа данных. Добавление шума можно уменьшить, используя аппаратные и программные фильтры. Чтобы уменьшить усиления импульса, нужно откалибровать приборы, которые используют для обнаружения ЧР.

В дополнение к этим проблемам, система технического обслуживания, которая основывается на методах прогнозирования, таких как алгоритмы реализации временных рядов, не была учтена в литературе. Данная система может помочь определить срок службы изоляции обмоток, что позволит нам принимать правильные решения до того, как будут происходить отказы.

Желательно использовать систему онлайн-мониторинга, которая не использует внедренные методы сбора данных, которая самостоятельно определяет ЧР в любой электрической машине и операционной среде, а также используется система определения срока службы изоляции обмоток.

### Литература

1. Ritchie, H.; Roser, M.; Rosado, P. Energy. OurWorldinData 2020 [Электронный ресурс]. Дата доступа: <https://ourworldindata.org/energy> - Дата доступа: 21.02.2023
2. OMICRON. Diagnostic Testing and Monitoring of Rotating Machines [Электронный доступ]. - Режим доступа: <https://www.omicronenergy.com/> - Дата доступа: 22.02.2023
4. Кацман М.М. «Электрические машины. Учебник», М., 2003 г.
5. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1987.
6. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности. – М.: Высшая школа, 1961. – 503 с

УДК 621.039.009

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
STRATEGIC DIRECTIONS OF THE REPUBLIC OF BELARUS IN THE  
FIELD OF ENERGY-SAVING LIGHTING**

Барановский В.Д.

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

*savkova@bntu.by*

V.Baranovsky

Supervisor – Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация:* Рассмотрены основные положения и цели концепции развития атомной энергетики в РБ и ЕАЭС, а также в мире.

*Abstract:* The main provisions and goals of the concept of nuclear energy development in the Republic of Belarus and the EAEU, as well as in the world, are considered.

*Ключевые слова:* атомная энергетика, Концепции развития атомной энергетики, источники топлива, ядерный реактор

*Keywords:* Atomic power station, nuclear energy industry, Concepts of nuclear energy development, fuel sources.

### **Введение**

По данным официального сайта [1], В настоящее время в 32 странах мира эксплуатируется 440 ядерных реакторов (энергоблоков) общей мощностью 394 ГВт, из которых 54 находятся в стадии строительства, 201 закрыт. В России 11 действующих атомных электростанций, на которых работают 37 электростанций. Около 17% мировой выработки электроэнергии приходится на атомные электростанции.

Эта отрасль также занимает третье место после угольной и гидроэнергетики. Рейтинг возглавляют Соединенные Штаты, за ними следуют Франция и Китай.

По доле электроэнергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, Франция лидирует примерно на 80%, например, в США ее доля в общем энергетическом балансе страны составляет около 20%, а в Китае - 4%. Атомная энергетика в этой стране (Франция) развивается систематически и неуклонно. Здесь эксплуатируются 59 атомных электростанций общей электрической мощностью около 70 ГВт, которые вырабатывают 78% от общего объема электроэнергии в стране.

Крупнейшей атомной электростанцией в мире в настоящее время является Южнокорейская атомная электростанция "Кори" (с учетом новых блоков "Шин-Кори"); ранее это была временно закрытая японская атомная электростанция "Касивадзаки-Карива" [1].



## **Основная часть**

### **Развитие ядерной энергетики в ЕАЭС**

Ядерная энергетика имеет большое будущее в ЕАЭС. Для этого есть необходимые предпосылки. Таким образом, запасы урана в Казахстане и России составляют почти четверть мировых запасов. По данным Всемирной ядерной ассоциации, доля производства урана в этих странах достигает почти половины мирового производства. А по установленной мощности атомных электростанций страны ЕАЭС занимают второе место в мире.

Пресс-конференция с главой Росатома Алексеем Лихачевым состоялась 3 февраля 2023 года. В котором он рассказал о своем желании помочь своим соседям по ЕАЭС, внедрив в них передовые технологии. "Атом в целом и в двусторонних отношениях с каждой из стран-участниц - Беларусью, Арменией, Казахстаном, Киргизией - прочно стоит на повестке дня ЕВРАЗЭС - все они напрямую связывают свои планы развития с ядерной энергетикой, с ядерными компетенциями, каждая из этих стран является нашим хорошим партнером", - сказал Лихачев журналистам в Алматы.

Он говорит, что их объединяет плодотворное прошлое, и надеется на хорошие перспективы на будущее. "И мы планируем внедрить все технологии, которые есть сейчас у "Росатома", в первую очередь в домашних условиях, но параллельно мы будем предлагать их и нашим соседям", - сказал Лихачев. Он добавил, что "ведутся переговоры практически со всеми странами о создании атомных электростанций на основе нашего нынешнего бестселлера ВВЭР-1200 как малой, так и средней мощности".

Он отметил, что Росатом связан с Казахстаном как серьезными проектами, так и сотрудничеством, основанным на доверии, в области добычи урана. "В целом есть большие планы на весь топливный цикл, в том числе в интересах поставок в третьи страны. Поэтому мы проводим наши переговоры на полях Евразийского межправительственного саммита и активно участвуем в двусторонних контактах", - сказал Лихачев.[2]

### **Немного информации о Беларуси**

Официальный запуск первой энергоблока Белорусской АЭС состоялся 7 ноября 2020 года при участии Александра Лукашенко. Строительство второй электростанции планируется завершить в 2023 году. Основным партнером Беларуси в проекте атомной электростанции является российская компания "Атомстройэкспорт"; Россия предоставила Беларуси кредит на строительство в размере 10 миллиардов долларов сроком на 25 лет. По состоянию на 1 марта 2021 года было использовано кредитное финансирование на сумму 4,7 миллиарда долларов. Общая сметная стоимость строительства составила около 6 миллиардов долларов. [3]

Беларусь также является членом МАГАТЭ с момента его основания в 1957 году. Наша страна является членом подавляющего большинства международных конвенций, заключенных под эгидой МАГАТЭ, в том числе Конвенции о ядерной безопасности, Конвенции о немедленном уведомлении о ядерной аварии, Конвенции о помощи в случае ядерной аварии или радиационной аварии, Объединенной конвенции о безопасности отработавшего ядерного топлива.

Обращение с топливом и безопасность при обращении с радиоактивными отходами, Венская конвенция об ответственности гражданской авиации за ядерный ущерб, Конвенция о физической защите ядерных материалов.

Беларусь и МАГАТЭ подписали соглашение о применении гарантий, связанных с Договором о нераспространении ядерного оружия, в соответствии с которым регулярные инспекции МАГАТЭ будут проводиться на территории Беларуси.

Делегация Беларуси традиционно принимает участие в ежегодных заседаниях Генеральной конференции агентства. [4]

### **Торий**

В последнее время решили рассмотреть торий, в качестве источника топлива, для ядерных реакторов. Поскольку может быть более доступной и эффективной заменой урану, однако также есть свои минусы. Торий примерно в три-четыре раза более распространен в природе, чем уран, но исторически не нашел широкого применения в промышленности и энергетике. Отчасти это объясняется тем, что торий как таковой не является ядерным топливом, но может быть использован для его создания. Торий-232 — единственный встречающийся в природе изотоп тория — является расщепляющимся, но не делящимся материалом. Это означает, что для расщепления атомных ядер тория и выделения энергии, используемой для производства электричества, необходимы высокоэнергетические нейтроны. Однако облучение тория-232 вызывает в нем ряд ядерных реакций, в результате которых образуется уран-233 — делящийся материал, который можно использовать в качестве топлива для ядерных реакторов.

В августе 2021 года Китай объявил о завершении строительства своего первого экспериментального ядерного реактора на основе тория. Реактор, расположенный на севере страны посреди пустыни Гоби, будет проходить испытания в течение нескольких последующих лет. Если эксперимент окажется успешным, Пекин планирует построить еще один реактор, для обеспечения 100к хозяйств.

### **Преимущества**

Количество делящегося материала (урана-233), образующегося во время работы реактора с водяным охлаждением или реактора на расплаве соли, может превышать количество израсходованного.

Плюс, безусловно, плюс в том, что его в три раза больше, чем урана, в природе. "Благодаря своей доступности и способности производить делящийся материал, торий может стать долгосрочным решением энергетических проблем человечества", — говорит Кайлаш Агарвал, эксперт МАГАТЭ по ядерному топливному циклу.

Следующим плюсом является его экологичность. Ядерные топливные реакторы обычно не выделяют парниковых газов, но они более экологичны с точки зрения отходов, поскольку производят меньше отходов.

### **Недостатки**

Однако существует ряд экономических и технических препятствий, которые затрудняют использование тория. Несмотря на его изобилие, добыча этого металла в настоящее время довольно дорога.

"Минерал монацит, который является основным источником различных редкоземельных элементов, также является основным источником тория", — говорит Марк Михаласки, эксперт МАГАТЭ по урановым ресурсам. - Монацит не был бы получен только из-за содержания в нем тория, если бы не текущий спрос на редкоземельные элементы. Торий является побочным продуктом, и добыча тория требует использования более дорогих методов, чем добыча урана. Следовательно, количество тория, которое можно извлечь из Земли экономически эффективным способом, в настоящее время меньше, чем количество урана. Однако ситуация может измениться, если спрос на торий и его использование в ядерной энергетике возрастет".

"Проблема с использованием тория заключается в том, что его трудно перерабатывать", - говорит Анжелика Хапера, технический директор МАГАТЭ по разработке ядерного топлива и установкам топливного цикла. "Торий, как воспроизводимый, но неделимый материал, нуждается в вспомогательных материалах, таких как уран или плутоний, для запуска и поддержания цепной реакции".

"Чтобы удовлетворить растущий спрос на энергию и достичь глобальных климатических целей, мир ищет альтернативные, устойчивые и надежные способы производства энергии. Использование тория может быть одним из них, отмечает Клемент Хилл, руководитель секции МАГАТЭ. "Мы продолжим наши исследования, чтобы предоставить надежные и научно обоснованные результаты тем, кто заинтересован в работе с торием".[5]

### **Создание замкнутого ядерного цикла**

В настоящее время развитые страны ядерной энергетике отдают предпочтение замкнутому ядерному топливному циклу (IAC) из-за интенсивного совершенствования существующих конструкций ядерных реакторов (эволюционных систем) и разработки реакторов четвертого поколения с критическими и сверхкритическими параметрами. Создание замкнутого ядерного топливного цикла предполагает переработку отработавшего ядерного топлива (ЭАТ) с извлечением из него урана и трансурановых элементов (плутоний, Нептун, Кюри, америций) и их повторной подачей в топливный цикл атомных электростанций после соответствующей подготовки топливной смеси для тепловыделяющих элементов (топливных стержней) ядерных реакторов. Для этого необходимо создать экономически осуществимую технологию радиохимической переработки отработавшего ядерного топлива, конкурентоспособную с добычей природного урана для будущих атомных электростанций. При разработке такой технологии необходимо учитывать радиационную безопасность обслуживающего персонала, поскольку в состав радиационной токсичности входят элементы с высокой степенью радиотоксичности.[6]

### Радиационная обработка отработавшего топлива

Радикальным выходом из чрезмерного накопления отработавшего ядерного топлива с реальным снижением радиотоксичности и количества утилизируемых отходов является переработка путем извлечения из него урана и плутония и использования последнего во вновь производимом топливе (переработка топлива). В этом сценарии основная фракция урана и плутония (99,9%) извлекается из ОИ, и лишь небольшая ее часть остается в отходах с высокой активностью, которые отправляются на геологическое хранилище для окончательного хранения.

С 1985 года переработка плутония, полученного в результате операций по переработке малиновок, стала промышленной практикой. Использование смешанного МОКС-топлива из оксида урана и плутония в легководных реакторах в топливном цикле с переработкой отработавшего топлива приобретает все большее промышленное значение в странах Западной Европы. Увеличенное количество РиО было преобразовано в МОКС-топливо и использовано в лицензированных реакторах во Франции, Германии, Швейцарии и Бельгии. В России строится завод по производству МОКС-топлива.[6]

### Заключение

За последние 2 века роль энергетики в жизни человека значительно возросла. В основном энергетические ресурсы (нефть газ уголь) уходят на топливный сектор. Если люди не сократят использование естественных ресурсов - то это может привести к истощению недр земли и исчезновения озонового слоя. Поэтому в прошлом веке люди задумали о получении ее другими способами, как ядерная энергетика. Существенным плюсом которой является отсутствие выбросов парниковых газов при деления ядерных элементов. А ключевым минусом - утилизация отходов, но над этим уже работают, в частности в России. И является безопасной, если не нарушать условия эксплуатации.

В следствии развития ядерной энергетики а также появления новых типов реакторов и различных усовершенствований при проектировании аэс. Можно говорить о решении ряда действующих проблем связанных с ядерной энергетикой.

### Литература:

1. Ядерная энергетика по старам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 07.04.2022. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_%D0%BF%D0%BE\\_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BC](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D0%BE_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BC). - Дата доступа: 15.04.2023.

2. "Росатом" готов предлагать соседям по ЕАЭС передовые технологии – Лихачев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.armeniasputnik.am/20230203/rosatom-gotov-vnedryat-predlagat-sosedyam-po-eaes-peredovye-tekhnologii--likhachev-54751469.html> Дата доступа: 17.04.2023.

3.Беларусская АЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа:[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\\_%D0%90%D0%AD%D0%A1](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D1%80%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%90%D0%AD%D0%A1). – Дата доступа: 17.04.2022.

4. Международное агентство по атомной энергии [Электронный ресурс].- Режим доступа:<https://mfa.gov.by/multilateral/organization/list/b5fbc389e3244621.html>. - Дата доступа: 17.04.2023.

5.Долгосрочный потенциал использования тория в ядерной энергетике: анализ МАГАТЭ [Электронный ресурс].- Режим доступа : <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/dolgosrochnyy-potencial-ispolzovaniya-toriya-v-yadernoy-energetike-analiz-magate.-> Дата доступа:09.04.2023.

6. Плачкова И. В.Развитие атомной энергетики и объединенных энергосистем 301с

УДК 620.97

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
**PERSPECTIVE DIRECTIONS IN THE FIELD OF ENERGY SAVING IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

Чибисова П.А.

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

Student – P. Chibisova

Supervisor – Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Основные положения и направления Республики Беларусь в области энергосбережения на основе анализа нормативных документов.*

***Abstract:** In this article the main provisions and directions of the Republic of Belarus in the field of energy conservation are considered.*

***Ключевые слова:** Энергосбережение, направление, энергоэффективность.*

***Keywords:** Energy saving, direction, energy efficiency.*

**Введение**

Энергосбережение - один из приоритетных ориентиров национального уровня, что подкрепляется развитием природоохранных программ и интегрированием инновационных технологий в сфере продуктивного потребления энергии.

**Основная часть**

Основополагающие документы в области энергосбережения:

1) закон Республики Беларусь «Об энергосбережении» (от 24.05.2021 №111-3), определяющий целевые показатели в области энергосбережения, а также источников альтернативной энергии и иные показатели в области энергосбережения в соотношении с законодательством об снижении потребления энергии и обозначает мероприятия по их доведению, утверждает муниципальные программы в сфере энергосбережения и принимает меры по их интеграции.

2) закон Республики Беларусь «О возобновляемых источниках энергии» (от 27 декабря 2010 г. № 204-3).

3) Директива Президента Республики Беларусь от 14.06.2007 № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства» (с учетом изменений, внесенных Указом от 14.01.2016 №26).

4) Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы (в редакции Постановления СМ РБ от 09.02.2023 №116), для обеспечения снижения роста валового потребления ТЭР Республики Беларусь, привлечения в топливный баланс страны национальных ТЭР.

Показатели Целей устойчивого развития (далее – ЦУР), определяют нормы энергоэффективности, а именно ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех». 17 Целей устойчивого развития (ЦУР) и 169 подвластных им задач, которые нужно достичь к 2030 году. Прогресс в достижении ЦУР будет подвергаться контролю и слежке с помощью ряда глобальных характеристик (индикаторов).

### **Мероприятия в области энергосбережения**

Мероприятия, реализуемые на национальном уровне в области энергосбережения, с целью экономии топливно-энергетических ресурсов, сокращение ввозимых из зарубежья ТЭР, развитие альтернативной энергетики и др.

1. Пропаганда экономного применения ТЭР при помощи организации республиканских конкурсов на тему энергосбережения, например республиканский конкурс школьных проектов по экономии и бережливости «Энергомарафон», выпуска ежемесячного специализированного научно-практического журнала «Энергоэффективность».

2. Увеличение эффективности потребления тепла, с ликвидацией неиспользуемых теплоисточников, вероятного интегрирования модернизированных автоматизированных электрических источников тепловой энергии, например тепловых насосов, для нужд отопления и потребления горячей воды.

3. Усовершенствование систем освещения мест общественного пользования жилых домов с интеграцией энергоэффективных, световых устройств, например светодиодных, и автоматических систем управления освещением.

4. Ввод в эксплуатацию только энергоэффективных котельных установок, работающих на природном газе.

5. Изготовлению электромобилей, гибридных автомобилей и зарядной сети, электрификация городского общественного транспорта в целях снижения применения или полного отказа от углеводородного топлива.

6. Электрификация участков железной дороги и т.д.

В ноябре 2017 года был разработан «Национальный план действий по энергоэффективности до 2030 года». Основополагающие мероприятия, прописанные в протоколе: «термореновация зданий в жилом секторе, модернизация уличного освещения, энергетическое использование твердых коммунальных отходов, совершенствования систем энергоменеджмента, модернизация зданий органов государственного управления и др.

### **Перспективные направления в области энергосбережения**

1. Одним из перспективных направлений в области энергосбережения в Беларуси является повышение энергоэффективности в производстве. Для этого нужно разработать и интегрировать модернизированные технологии, понижающие расход электроэнергии и топлива. Также под главным аспектом понимается изучение персоналом крупных промышленных предприятий методов энергосбережения.

2. Применение источников альтернативной энергии, таких как солнечная и ветровая, рассматривается как еще одно многообещающее течение в области энергосбережения в Беларуси. В частности, создание солнечных ферм и ветрогенераторов поможет значительно понизить взаимосвязь государства и ввозимых энергоресурсов, а также снизить неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

К настоящему времени были произведены эксперименты, показавшие потенциал Республики Беларусь в производстве ветровой энергии на побережье Балтийского моря, где наблюдается высокая скорость ветра.

В настоящий момент действуют несколько солнечных электростанций на территории нашего государства, которые производят энергию из солнечных батарей (солнечная электростанция мощностью 55 МВт находится возле Речицы)

Альтернативная энергия имеет потенциал для формирования в Беларуси и становится более популярной из-за растущей экологической осведомленности в мире.

3. Еще одной новой и выгодной тенденцией в отрасли энергосбережения в Беларуси является формирование умного города.

Главными устройствами системы умного дома считаются датчики, контроллеры, процессные приложения. Системы могут быть открытыми или закрытыми, то есть могут функционировать только с устройствами от производителя или быть многофункциональными и поддерживать устройства от разного рода производителей.

Установка умного дома может проводиться по-разному, как в собственном доме, так и в больших жилых комплексах или коммерческих объектах. Под более известными функциями, реализованными в умном доме, понимаются управление световыми приборами, климат-контроль, безопасностью, энергоэффективностью и мультимедиа.

Координация различных систем удаленно через мобильные приложения, могут привести к уменьшению расходов на электроэнергию, повышению уровня комфорта жизни и обеспечению безопасности.

### **Заключение**

Таким образом, в области энергосбережения у нашего государства есть ряд перспективных направлений, которые помогут уменьшить потребление энергоресурсов и сократить неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Рекомендуется не останавливать работу над разработкой и интегрированием современных технологий, формированием источников альтернативной энергии и созданием умных городов.

### **Литература**

1. Концепция "Умного города" на белорусской платформе // elibrary.ru: сайт. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27478066> Дата доступа: 16.04.2023.
2. Самая большая в Беларуси солнечная электростанция открыта возле Речицы // БелТА URL: <https://www.belta.by/regions/view/samaja-bolshaja-v->



belarusi-solnechnaja-elektrostantsija-otkryta-voze-rechitsy-271281-2017/  
Дата доступа: 16.04.2023.

3. В Беларуси разработан Национальный план действий по энергоэффективности до 2030 года // Департамент по энергоэффективности URL: [https://energoeffect.gov.by/news/news\\_2020/20200827\\_news1](https://energoeffect.gov.by/news/news_2020/20200827_news1) Дата доступа: 16.04.2023.
4. О достижении Целей устойчивого развития в Республике Беларусь // minenergo.gov.by URL: <https://www.minenergo.gov.by/press/novosti/odostizhenii-tseley-ustoychivogo-razvitiya-v-respublike-belarus/> Дата доступа: 16.04.2023.
5. Использование возобновляемых источников энергии как фактор энергетической безопасности Республики Беларусь // cyberleninka.ru URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-kak-faktor-energeticheskoy-bezopasnosti-respubliki-belarus/viewer>
6. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ // rep.bntu.by URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/122070/12-15.pdf?sequence=1>
7. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ // rep.polessu.by URL: <https://rep.polessu.by/bitstream/123456789/1628/1/36.pdf>

УДК 621.3

## НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭНЕРГИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕТИ

### ENERGY STORAGE DEVICES AND SMART GRIDS

А.Ю. Кирикович

Научный руководитель - Е.А. Дерюгина, к.т.н., доцент

E-mail: [derugina@bntu.by](mailto:derugina@bntu.by)

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

A. Kirikovich

Supervisor – Deryugina E.A., Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация.** В настоящее время проблема хранения электроэнергии стала значительной для роста использования ВИЭ. Накопители могут накапливать электроэнергию в моменты дефицита нагрузок потребителей и поддерживать статические и динамические нагрузки сети.

**Ключевые слова:** накопители энергии, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), батарея, хранение энергии, интеллектуальная сеть

**Annotation:** The problem of electricity storage will be significant for the growth in the use of renewable energy. Accumulators can accumulate electricity in moments of shortage of consumer loads and support static and dynamic network loads.

**Key words:** energy storage, renewable energy sources (RES), battery, energy storage, smart grid.

#### Введение

С каждым годом возобновляемые источники энергии становятся все более конкурентоспособными. В настоящее время под влиянием цифровизации и автоматизации все более активно развивается новая модель энергетики и возрастает необходимость в системах накопления энергии (СНЭ) – устройствах, которые применяются для обеспечения бесперебойного электроснабжения либо в качестве эффективного инструмента поддержки энергосистемы в моменты краткосрочной нестабильности.

Способность накапливать (или хранить) электроэнергию является ключевой технологией, она имеет весомое значение для изменения способа потребления электроэнергии.

#### Основная часть

Системы накопления энергии могут одновременно управлять как активной, так и реактивной мощностью, компенсировать асимметричные напряжения и выполнять роль фильтра высших гармоник. На сегодняшний день стоимость СНЭ очень высока. Их эффективность можно повысить за счёт совмещения нескольких функций в одном устройстве: регулирование частоты и перетоков активной мощности в автоматическом режиме, выравнивание суточных графиков нагрузки, предотвращение снижения напряжения, увеличение пропускной способности линии электропередач, повышение надежности электрообеспечения

наиболее важных потребителей, замещение «вращающегося» резерва, сглаживание резко переменной нагрузки, противоаварийное управление и др.[8]

Основой для технологий накопления энергии является гибкость и избирательное обеспечение электроэнергией потребителей. Важную роль в обеспечении такой гибкости будут играть интеллектуальные сети (SmartGrid – интеллектуальная электрическая сеть, направленная на предоставление энергетических услуг, с помощью которой осуществляется связь между всеми участниками энергетического рынка, обеспечивающая повышение эффективности и снижение затрат (рисунок 1)) [4], за счет возможности интеграции управления спросом. Пока этот термин является новинкой в области энергетики.

На данный момент существует множество определений интеллектуальной сети электроснабжения, но определены требования к данной системе электрификации: [4]:

1. Оптимальное использование крупных традиционных источников и накопителей энергии вместе с возможностью управления небольшими распределенными ресурсами.
2. Уменьшение воздействия производства и распределения энергии на окружающую среду за счет более точного планирования производства
3. Устойчивость к стихийным бедствиям и катаклизмам
4. Обеспечение параметров качества электроэнергии
5. Тесное сотрудничество с рынком электроэнергии

Отслеживание важных элементов распределительной сети, снижающий вероятность перебоев с поставками электроэнергии

Появление ВИЭ изменило потоки электроэнергии в сети. У потребителей появилась возможность производить электроэнергию, таким образом, поток энергии становится двунаправленным.

Интеллектуальная сеть использует двунаправленную цифровую технологию для регулирования потребностями потребителей, что уменьшает затраты и повышает удобство использования электроэнергии. Существует проблема уязвимости этой технологии, она может быть использована мошенниками, а синхронизация потребителей с ценой может дестабилизировать сеть.

На сегодняшний день развитие таких сетей в Беларуси находится пока только на самой начальной стадии. Но для нашей страны не должен встать вопрос о разработке основных концепций, т.к. уже сейчас мы можем усовершенствовать опыт других стран и внедрить его у нас, учитывая все особенности экономико-географического положения Республики Беларусь.

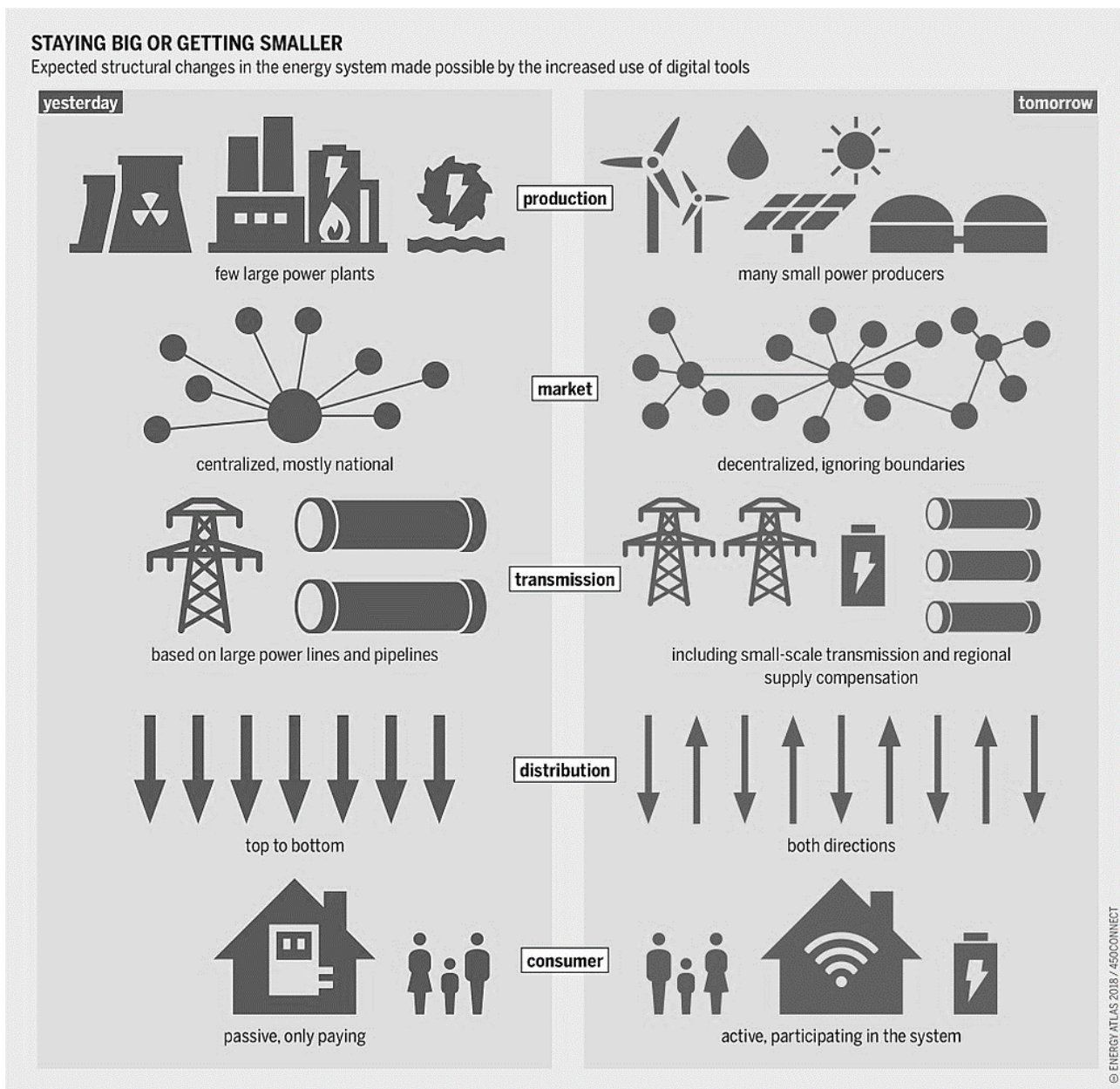


Рисунок 1 Концепция SmartGrid[6]

**Заключение**

Анализ показывает, что для создания новой энергетической системы, состоящей практически целиком из возобновляемых источников энергии, требуется новая объединённая энергосистема. Но мировой опыт пилотных проектов показывает экономическую оправданность и перспективность применения таких систем. Внедрение интеллектуальных электрических

сетей предоставит возможность уменьшить капиталовложения и топливные затраты за счет сокращения строительства генерирующих мощностей. А также сможет упростить внедрение Белорусской АЭС в энергосистему Республики Беларусь. Уже сейчас наблюдается большое расширение сферы использования накопителей энергии: электрический транспорт городов и населенных пунктов, автомобильный транспорт, системы электроснабжения нетрадиционной энергетики и др.

### Литература

1. Короткевич, А.М., Колик, В.Р., Кулаковская, Е.В. Умные распределительные электрические сети 0,4–10(6) кВ в Белорусской энергосистеме – первый шаг // Энергетическая стратегия, 2011.–№ 5. – С. 27 – 29.
2. Левченко, С.А. Интеллектуальные энергетические сети (SmartGrids) в Беларуси: проблемы в построении «умных» сетей и варианты их решения [Электронный ресурс] /С.А. Левченко// Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Режим доступа: <http://www.scienceportal.org.by/upload/Levchenko> 27.06.2012.
3. Разработка энергетического баланса энергосистемы Беларуси с учетом развития возобновляемой энергетики, в том числе ветроэнергетики: научно-технический отчет/ А. Ф. Молочко [и др.].– Минск : ООО «Альфа-книга», 2019. – 238 с.
4. URL: <https://electricalschool.info/main/elsnabg/2483-smart-grid-umnaya-set.html>
5. URL: [https://www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid/smart\\_grid.html](https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html)
6. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_grid](https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid)
7. URL: <https://www.power-eng.com/renewables/hydroelectric/22-million-gwh-of-pumped-hydro-energy-storage-potential-identified-worldwide/?topic=58733>
8. URL: <https://marketelectro.ru/node/nakopiteli-energii-tekhnologii-i-trendy>

УДК 621.311

**КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  
ЭНЕРГЕТИКИ****QUANTUM MEASUREMENTS AS A PERSPECTIVE DIRECTION  
OF ENERGY**

Кречко А.А.

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

*savkova@bntu.by*

A. Krechko

Supervisor – Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** Рассмотрены сущность и принципы квантовых измерений, их особенности и применение в энергетике. Описаны комбинаторные задачи, которые возникают в энергетическом секторе экономики и проблемы их решения. Показано, как квантовые измерения могут помочь в решении данных задач, приведены конкретные примеры их применения в энергетике РБ.

**Abstract:** In this paper, quantum measurements are considered as an effective way to solve problems in the energy sector.

**Ключевые слова:** Квантовые измерения, квантовые технологии, оптимизация энергетических систем.

**Keywords:** Quantum measurements, quantum technologies, optimization of energy systems.

**Введение**

Люди всегда использовали природные ресурсы земли для производства продуктов и услуг, удовлетворяющих их основные потребности, экспериментировали с формой, размером и производительностью изобретений.

Метрологические стандарты определяют критерии качества измерений и устанавливают требования к точности, надежности, повторяемости и воспроизводимости измерений. Они также определяют требования к эталонам, используемым для проведения измерений, к процедурам и методам измерений.

**Основная часть**

В современном мире энергетика играет ключевую роль в обеспечении жизнедеятельности человечества. Но в процессе производства и потребления энергии возникает множество комбинаторных задач, связанных с оптимизацией расходов и повышением эффективности процессов. Решение этих задач является одним из важных направлений развития энергетики.

В 1900 году Максом Планком был впервые введен термин квант в первой работе по квантовой теории, заложившей её основу. Вокруг идеи квантования с начала 1900-х годов развилась новая физическая концепция, называемая квантовой физикой. Квантовые измерения позволяют проводить измерения с высо-

кой точностью и чувствительностью, что делает их особенно полезными для измерения нано масштабных объектов, атомов и молекул. В отличие от классических измерений, квантовые измерения могут приводить к квантовым эффектам, таким как интерференция и рентгладмент.

Цель данной работы – изучение возможности применения квантовых измерений для решения комбинаторных задач в энергетике и анализ перспектив данного подхода.

### **Сущность и особенности квантовых измерений.**

Одна из особенностей квантовых измерений является невозможность одновременного измерения нескольких квантовых состояний. Кроме того, в квантовой механике не существует точного значения для физических величин, и результаты измерений являются вероятностными. Вот почему квантовые измерения представляют собой уникальный подход к измерению и анализу физических систем. Квантовые приборы используются для измерения таких физических величин, как электронный заряд, магнитный момент, атомные свойства и другие характеристики частиц и систем. В энергетическом секторе квантовые измерения могут более эффективно использоваться для решения различных задач, включая комбинаторные задачи, связанные с оптимизацией работы энергетических систем, так как традиционные методы оптимизации могут быть ограничены классическими вычислительными возможностями [1].

Сущность квантовых измерений - измерение физической величины изменяет состояние самой системы. Измерение происходит через взаимодействие измерительного прибора с системой, и это взаимодействие неизбежно приводит к изменению квантового состояния системы.

Квантовые измерения имеют ряд уникальных свойств, таких как неопределенность, неоднозначность и взаимозависимость, которые отличают их от классических измерений. В некоторых случаях они позволяют достигнуть уровня точности, недостижимого с помощью классических методов.

В энергетическом секторе экономики для эффективного управления распределительными сетями необходимо решать задачи о поиске оптимальных путей передачи энергии от источников к потребителям, распределении нагрузки между различными узлами сети и т.д. Такие задачи могут иметь огромное количество вариантов решения, которые не всегда могут быть найдены классическими методами оптимизации [2].

Применение квантовых измерений позволяет проводить оптимизацию энергетических систем с высокой точностью и находить оптимальные решения в условиях большой размерности пространства поиска. Квантовые алгоритмы оптимизации также могут быть использованы для решения задач о синтезе оптимальных управляющих воздействий, например, в управлении генерацией энергии ветровыми и солнечными установками. Для решения комбинаторных задач в энергетике важно то, что результаты измерений, полученные в ходе вычислений на квантовом компьютере, являются вероятностными. Однако вероятности получаемых решений могут быть высокими, что делает возможным использование квантовых алгоритмов для решения сложных комбинаторных задач в энергетике.

Существует множество методов квантовых измерений. Некоторые из этих методов включают:

6. Метод квантовой интерферометрии. Этот метод основан на принципах интерференции волн и используется для измерения различных параметров, таких как длина волны, частота и фаза.

7. Метод квантовых каскадов. Этот метод используется для измерения малых электрических сигналов, например, в процессе детектирования слабых сигналов в радиолокации или в измерении биологических сигналов.

8. Метод квантовой томографии. Этот метод используется для измерения квантовых состояний системы. Он основан на реконструкции плотности матрицы квантовой системы из экспериментальных данных.

9. Методы квантовой метрологии. Эти методы используются для точных измерений физических величин, например, массы, заряда и времени.

10. Квантовая магнитометрия. Этот метод используется для измерения магнитных полей с высокой точностью[3].

Для проведения квантовых измерений используются специальные приборы и устройства, такие как:

4. Квантовые датчики – устройства, которые используют квантовые свойства материи для измерения различных параметров, таких как магнитное поле, температура, давление и т.д.

5. Квантовые компьютеры – устройства, использующие квантовые принципы для обработки информации и решения сложных вычислительных задач.

6. Квантовые приборы – устройства, которые используют квантовые эффекты для измерения различных параметров, таких как время, частота, силы.

### **Внедрение квантовых измерений в энергетике.**

Квантовые измерения представляют собой более эффективный способ измерения и контроля параметров. Их применение позволит повысить эффективность и экономическую выгоду работы энергетических систем.

Квантовые измерения широко применяются в энергетической отрасли:

5. Оптимизация работы электростанций и сетей. Квантовые компьютеры могут использоваться для решения комбинаторных задач, связанных с оптимизацией работы энергетических систем. Например, они могут оптимизировать распределение нагрузки в энергосистемах, уменьшая издержки на производство электроэнергии.

6. Разработка новых материалов. Квантовые измерения могут помочь в создании новых материалов для энергетических установок и устройств. Например, измерения квантовых свойств материалов позволяют оптимизировать их свойства и улучшить работу солнечных батарей, батарей для хранения энергии и других устройств.

7. Создание квантовых датчиков. Квантовые датчики могут использоваться для измерения различных параметров, связанных с производством и использованием энергии. Например, квантовые датчики могут измерять температуру и давление в реакторах ядерных электростанций, что поможет предотвратить аварии и повысить безопасность.



8. Исследование квантовых явлений в энергетических системах. Квантовые явления, такие как квантовые переходы и квантовая интерференция, могут играть важную роль в энергетических системах. Исследования этих явлений могут привести к созданию новых устройств и технологий для производства и использования энергии [4].

Это лишь несколько примеров применения квантовых измерений в энергетической отрасли. Квантовые технологии становятся все более востребованными, открывая новые возможности для применения в энергетике.

### **Заключение**

В результате исследования были рассмотрены сущность и принципы квантовых измерений, их особенности и применение в энергетике. Описаны комбинаторные задачи, которые возникают в энергетическом секторе экономики и проблемы их решения, а также показаны возможности квантовых измерений в решении данных задач и приведены конкретные примеры их применения в энергетике РБ [5].

Таким образом, квантовые измерения представляют собой новую технологию, которая может эффективно применяться в энергетической отрасли. Использование квантовых измерений в энергетике представляет большой потенциал для развития отрасли и решения многих ее проблем.

### **Литература:**

1. Ахметов, Т. И., & Кудряшов, Н. А. Квантовые вычисления и квантовые информационные технологии: современное состояние и перспективы. Информационные технологии и вычислительные системы, 1, 7-16.(2018).
2. Белоусов, А. В., & Гончаров, В. Ю. Квантовые компьютеры: принципы работы и перспективы применения. Вестник Российской академии наук, 86(2), 108-117.(2016).
3. Кириченко, О. В., & Костюк, П. В. Квантовые вычисления: от теории к практике. Современные технологии в технике и науке, 1, 80-84.(2019).
4. Романюк, В. М., & Дубовик, О. В. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления: состояние и перспективы. Радіоелектроніка, інформатика, управління, 2, 5-14.(2017).
5. Яковлев, С. В., & Панкратов, А. П. Квантовые приборы и их применение в современных технологиях. Физика и техника полупроводников, 52(2), 200-212.(2018).

УДК 620.9

**ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ БОЛЬШИХ ТОКАХ КЗ  
DESIGN FEATURES OF ELECTRICAL DEVICES USED FOR HIGH  
SHORT-CIRCUIT CURRENTS**

Траскевич Д.И.

Руководитель – А.Ю. Капустинский, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь  
A.Kapustinski@yandex.by  
Traskevich D.I.

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

***Аннотация:** В данной статье произведен обзор на особенности конструкции электрических аппаратов, применяемых при больших токах короткого замыкания, выделены основные параметры автоматических выключателей. А также раскрыта суть такого метода, как каскадирование.*

***Abstract:** This article provides an overview of the design features of electrical devices used at high short-circuit currents, the main parameters of circuit breakers are divided. And also the essence of such a method as cascading is revealed.*

***Ключевые слова:** автоматический выключатель, метод каскадирования, токоограничивающий автомат, короткое замыкание, коммутационные аппараты.*

***Keywords:** circuit breaker, cascading method, current limiting machine, short circuit, switching devices.*

### Введение

Короткое замыкание (КЗ) – это критическое состояние электрической цепи, при котором происходит непредвиденное соединение проводников между фазами или фазными проводниками, замыкание фаз на землю (нулевой провод) в сетях с глухо и эффективно-заземленными нейтральными, а также витковые замыкания в электрических машинах.

В результате КЗ токи могут достигать значительных значений, превышающих номинальные значения, что может привести к повреждению оборудования и представлять опасность для людей.

В связи с быстро растущими уровнями токов КЗ, требования к коммутационной способности электрических аппаратов и стойкости элементов электротехнических устройств становятся все более высокими.

Для предотвращения возникновения КЗ используются специальные устройства и методы, такие как механизмы каскадирования и каскадного включения коммутационных аппаратов. Кроме того, создаются новые методы, позволяющие ограничивать не только величину тока короткого замыкания, но и продолжительность его действия. Поэтому, помимо применения и совершен-

ствования ранее применяемых методов и средств, разрабатываются новые, более эффективные способы предотвращения возникновения КЗ.

#### Основная часть

Для обеспечения правильной и надежной работы автоматического выключателя, необходимо обязательно определить значение тока короткого замыкания (КЗ), который возникает в процессе коммутации. Ток КЗ определяется как минимальное значение тока, при котором автоматический выключатель должен немедленно отключиться, чтобы защитить систему от повреждения.

Определение значения тока КЗ является важным шагом при проектировании электрических систем, поскольку это позволяет определить наиболее подходящий тип и настройки автоматического выключателя для конкретной системы. Он называется током наибольшей коммутационной способности.

Электрический ток, который может быть автоматически отключен однократно, но после этого может стать непригодным для мгновенного включения, определяется как ток предельной отключающей способности и обозначается как  $I_{cu}$ . Номинальная предельная отключающая способность  $I_{cu}$  - это способность отключения, при которой возможен необратимый обрыв цепи с возможным повреждением контактной системы.

В процессе работы автоматического выключателя важен и ток КЗ, *отключающийся неоднократно*, но при этом продолжающий свою работу. Если выключатель способен отключить данный ток *трижды подряд*, то его значение — ток наибольшей эксплуатационной отключающей способности. Его определяют как  $I_{cs}$ .

Отключающая способность, предполагающая способность данного выключателя длительно проводить свой номинальный ток, на основании с установленным циклом испытаний называется номинальной рабочей наибольшей отключающей способностью  $I_{cs}$ .

В эксплуатации необходимо учитывать ток короткого замыкания, который может быть автоматически отключен выключателем несколько раз, сохраняя при этом работоспособность.

Если выключатель способен отключить ток трижды подряд, то его значение называется током максимальной длительной отключающей способности и обозначается как  $I_{cs}$ . Номинальная максимальная длительная отключающая способность  $I_{cs}$  - это способность выключателя длительно поддерживать свой номинальный ток на основе установленного цикла испытаний.

Значение предельной отключающей способности и рабочей наибольшей отключающей способности устанавливается производителем и определяется в ходе проведенных исследований и проверок [2].

Что касается новейших автоматических выключателей, то их отключающая способность достигает до сотен килоампер. Выключатель, который имеет различные значения отключающей способности может быть одного и того же номинального тока.

Когда автоматический выключатель отключен и в защищаемой им цепи есть короткое замыкание, то включить его возможно только при образовании ударного тока в первом полупериоде переходного процесса. Если этот ток пре-

вышает в 1,5-2 раза действующее значение ожидаемого тока КЗ, то при замыкании контактов может произойти отброс электромагнитными силами с последующим замыканием. Если происходит отброс контактов, то возникает электрическая дуга и контакты могут в некоторых частях расплавиться, а в дальнейшем при замыкании свариться. Тогда наибольшей выключающей способностью тока  $I_{ст}$  описывают возможность выключателя противостоять действию ударного тока КЗ.

Значение тока, указанное в спецификации, является максимальным значением тока, который способен выдержать аппарат в соответствии со стандартом. Однако, если устройства не имеют встроенной функции защиты, такой как, например, выключатели, то они должны выдерживать ток короткого замыкания, который определяется параметрами срабатывания присоединенного аппарата защиты. Значение и длительность тока короткого замыкания должны быть установлены в соответствии с параметрами срабатывания присоединенного аппарата защиты [1].

Метод каскадирования представляет собой инновационный подход к защите электрических цепей от короткого замыкания, при помощи токоограничивающего автоматического выключателя. Этот метод позволяет использовать коммутационные аппараты с гораздо меньшими отключающими способностями и термической и электродинамической устойчивостью. Это повышает эффективность работы электрических цепей, упрощает монтажные работы и снижает затраты.

В случае, если величина тока короткого замыкания является очень большой, выполняется снижение его значения за счет размыкания контактов токоограничивающего автоматического выключателя, в результате чего появляющаяся дуга увеличивает полное сопротивление цепи.

В современном мире короткое замыкание является серьезной проблемой, которая может привести к возникновению большого тока и нанести вред людям и оборудованию. Однако существуют специальные устройства и методы, которые позволяют предотвратить КЗ и обезопасить работу электрических цепей. Один из таких методов - каскадирование коммутационных аппаратов, который позволяет избежать ударного тока при коротком замыкании и ожидаемого действующего значения тока короткого замыкания. Для этого проводятся лабораторные испытания, результаты которых представляют производители в виде таблиц, что позволяет пользователям точно проектировать каскадирование выключателей на основе рекомендованных типов. Большинство национальных стандартов допускают использование этого метода, при условии, что количество энергии, проходящей через токоограничивающий автоматический выключатель, не превышает величину, которую могут выдержать все нижестоящие автоматические выключатели и элементы цепи. Использование каскадирования коммутационных аппаратов является надежным способом защиты электрических цепей от короткого замыкания и обеспечения безопасности работы.

Для ограничения тепловых и электродинамических эффектов от высоких значений токов короткого замыкания применяют токоограничивающие автома-

тические выключатели, которые отключаются менее чем за 0,01с до достижения максимального значения тока КЗ.

Такие выключатели имеют предельные значения отключающей способности, их значение тока  $I_{cu}$  являются ожидаемыми действующими значениями и никогда не достигаются в процессе отключения тока КЗ из-за ограничения тока сопротивлением дуги

При возникновении короткого замыкания в электрических сетях происходит замыкание фаз между собой или на землю. Токи, которые возникают при КЗ, могут быть опасными и требуют от электротехнических устройств высокой коммутационной способности и стойкости. Для ограничения токов КЗ используются различные методы и средства, которые позволяют не только ограничить величину тока, но и продолжительность его действия.

Метод каскадирования позволяет использовать в цепях коммутационные аппараты с меньшими отключающими способностями, а метод каскадного включения коммутационных аппаратов обеспечивает селективность работы системы защиты. Для более эффективного токоограничения размыкание контактов аппарата должно происходить еще до достижения током КЗ своего амплитудного значения. Осуществление быстрого размыкания контактов достигается за счет отталкивания контактов электромагнитными силами Ампера, создаваемыми при взаимодействии тока с магнитным полем близлежащих элементов токопровода в аппарате.

Улучшение электродинамической стабильности всех элементов сети и самого коммутатора происходит за счет того, что ограничения самого большого значения тока КЗ намного меньше ожидаемого значения. Пример зависимостей между ударным током при коротком замыкании и ожидаемым действующим значением тока короткого замыкания показан на рисунке 1.

Кроме того, значение интеграла Джоуля по току короткого замыкания уменьшается в несколько раз, поскольку временной интервал протекания тока составляет менее полупериода. Ограничение значения интеграла Джоуля за время означает ограничение энергии, которая будет выделена во время короткого замыкания в зоне контакта (т.е. электрической дуги) и во всех токоведущих элементах сети и автоматического выключателя. Пример зависимости между интегралом Джоуля от короткого замыкания и ожидаемым эффективным значением тока короткого замыкания показан на рисунке 2.

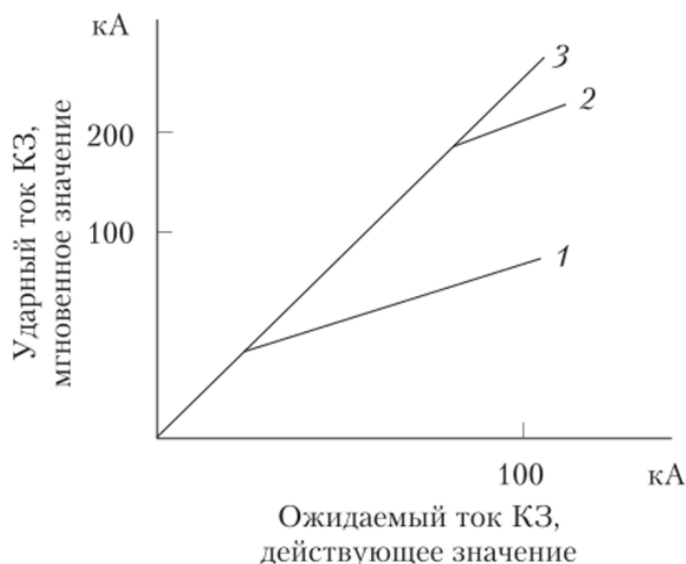


Рисунок 1. Ограничение ударного тока КЗ автоматическими выключателями:  
 1 — выключатель с номинальным током 1000 А; 2 — выключатель с номинальным током 2500 А; 3 — аппараты без токоограничения

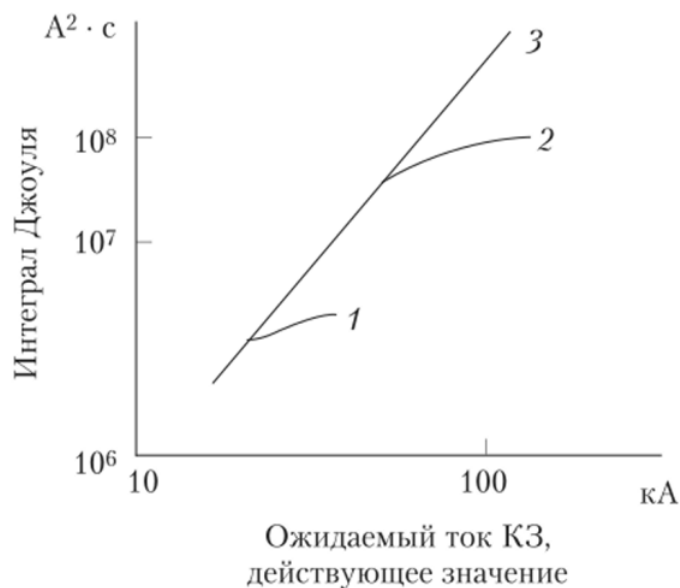


Рисунок 2. Ограничение значения интеграла Джоуля режима КЗ автоматическими выключателями:  
 1 — выключатель с номинальным током 1000 А; 2 — выключатель с номинальным током 2500 А; 3 — аппараты без токоограничения

### Заключение

Таким образом, способность автоматического выключателя осуществлять свое назначение в условиях наличия тока КЗ описывают такими параметрами, как предельная отключающая способность. Автоматический выключатель такой ток при КЗ должен пропускать (без отключения самим выключателем) в течение довольно короткого отрезка времени, который задан. Времятоковая характеристика автомата строго задана и известна производителю, а время от-

ключения известно для каждой точки. В зависимости от условий эксплуатации и требований к системе защиты, выбираются соответствующие выключатели и автоматы с определенными характеристиками. Кроме того, важно регулярно проводить проверки и обслуживание системы защиты, чтобы обеспечить ее надежную работу и предотвратить возможные аварии. В целом, правильно подобранная и обслуживаемая система защиты помогает обеспечить безопасность и надежность работы электрооборудования, а также предотвращает возможные аварии и повреждения оборудования.

### Литература

1. Ограничение тока короткого замыкания автоматическими выключателями - ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ [Электронный ресурс]/. Режим доступа: [https://studme.org/124241/tehnika/ogranichenie\\_toka\\_korotkogo\\_zamykaniya\\_avtomaticheskimi\\_vyklyuchatelyami/](https://studme.org/124241/tehnika/ogranichenie_toka_korotkogo_zamykaniya_avtomaticheskimi_vyklyuchatelyami/). – Дата доступа: 14.04.2023.
2. Предельная коммутационная способность автоматического выключателя таблица (lemzspb.ru) [Электронный ресурс]/. Режим доступа: <https://lemzspb.ru/predel-naya-kommutatsionnaya-sposobnost-avtomaticheskogo-vyklyuchatelya-tablitsa/>. – Дата доступа: 11.04.2023.

УДК 621.32

**ДРАЙВЕРЫ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА  
LED LIGHT SOURCE DRIVERS**

М. В. Кишкель, Ю.А. Котковец

Научный руководитель: В. Б. Козловская, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь[Vkozlovskaya@bntu.by](mailto:Vkozlovskaya@bntu.by)

M. Kishkel, Y. Kotkovets

Supervisor – V. B. Kozlovskaya, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** данная статья посвящена вопросу изучения необходимости светодиода драйвера.

**Annotation:** this article is devoted to the issue of studying the need for a driver LED.

**Ключевые слова:** драйвер, светодиод, элемент стабилизации, LED, ВАХ светодиода

**Keywords:** driver, LED, stabilization element, LED, LED VAC

**Введение**

Элементом LED светильника считается драйвер, или электронный пуско-регулирующий аппарат (ЭПРА). Он нужен для регулирования напряжения и создания постоянного тока.

Чтобы понять для чего светодиоду драйвер нужно ознакомиться с ВАХ светодиода (рисунок 1.).

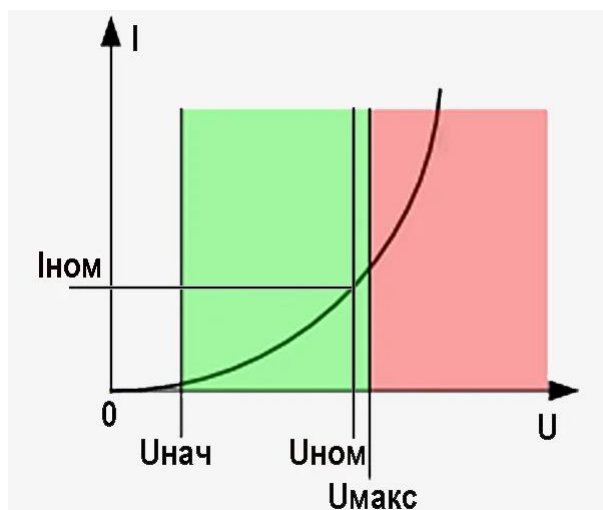
**Основная часть**

Рисунок 1. ВАХ светодиода [2]

Изучая график заметно, что постепенно увеличивая напряжение, сначала ток через светодиод не протекает. Достигая конкретного значения  $U_{нач}$  возни-



кает ток – прибор начинает светиться. Чем выше напряжение, тем ярче свечение.

Этот режим справедлив до тех пор, пока напряжение не будет максимальным. Увеличивая его, кривая ВАХ резко поднимается вверх. Полупроводник сгорает, потому что ток находится за пределами допустимого значения. Поэтому для того, чтобы прибор работал и обладал максимальной светоотдачей, нужно сохранять режим, когда ток и напряжение имеют номинальное значение. Кажется, можно ограничиться стабилизатором напряжения, но ВАХ светодиода находится в зависимости от температуры кристалла. Как только кристалл прогревается, граница  $U_{\text{макс}}$  сдвигается влево – полупроводник выходит из режима (рисунок 2).

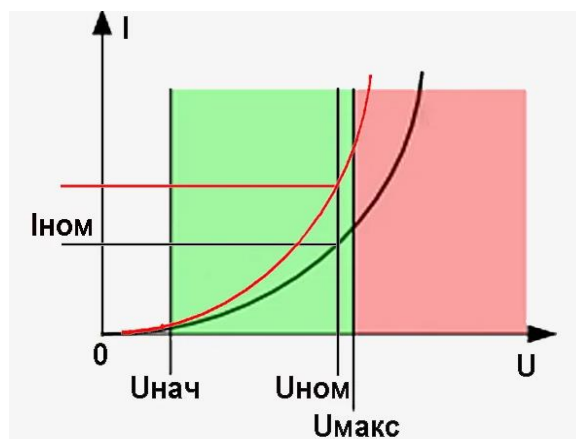


Рис 2. ВАХ светодиода после прогрева кристалла [2]

Из графика заметно, что для поддержания номинального тока после прогрева кристалла, надо уменьшить напряжение, однако оно стабилизировано и ток становится критическим.

Исходя из этого, температура кристалла становится больше, сопротивление перехода падает, а ток повышается. Повышение тока приводит к ещё большему нагреву кристалла. Таким образом, наблюдается лавинообразный процесс, который закончится тепловым пробоем. То есть, прибор выводит из строя сам себя.

Поэтому недостаточно стабилизировать напряжение, нужно стабилизировать ток и поддерживать его на уровне  $I_{\text{ном}}$ . Для этого служит драйвер. По своей сущности он является стабилизатором тока. Логично, что характеристики драйвера и ток стабилизации должны соответствовать характеристикам светодиода, указанным в паспорте.

При приобретении драйвера для светодиодных светильников, надо прибегнуть к основным характеристикам. К ним относятся:

- Выходное напряжение. Оно зависит от величины падения напряжения на светодиодах, количества светодиодов в лампе, способа подачи питания.
- Номинальный ток. Величина номинального тока должна быть такой, чтобы LED источник давал нужную яркость.

○ Мощность. Величина этого параметра зависит от мощности каждого LED прибора, общего количества и цвета свечения светодиода. запас мощности должен быть в пределах 25-30%.

В необходимом порядке нужно учитывать цвет светодиода. Величина падения напряжения существенно меняется от цвета полупроводников кристаллов (таблица 1).

Таблица 1. Зависимость светодиода падения напряжения от цвета

Цвет	Падение напряжения, В	Сила тока, А	Потребляемая мощность, Вт
Красный	1,6-2,04	350	0,75
Оранжевый	2,04-2,1		0,9
Жёлтый	2,1-2,18		1,1
Зелёный	3,3-4		1,25
Синий	2,5-3,7		1,2

По стабилизации тока драйверы можно разделить на два вида: драйвер линейной стабилизации и импульсной.

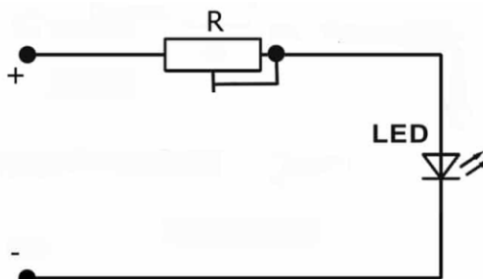


Рисунок 3 Схема линейной стабилизации [2]

Простые драйверы для светодиодной лампы создаются на основе линейной стабилизации (рисунок 3). Элементом стабилизации служит ограничивающий резистор с переменным сопротивлением. Ток начинает расти при возрастании напряжения до критического значения. При достижении критического значения тока происходит перегрев светодиода, а после и его разрушение.

В сложных схемах используются транзисторы для регулирования тока. Существенным минусом линейной схемы являются большие потери мощности.

Для светодиодов, которые имеют большую мощность, данная сема не применяется.

Простая конструкция, низкая стоимость и достаточная надёжность являются плюсами линейной схемы стабилизации.

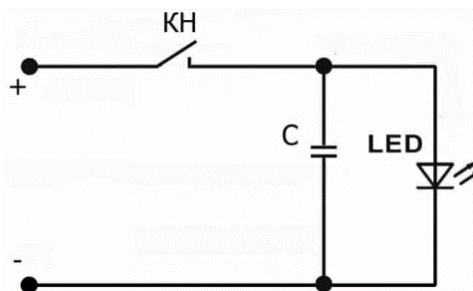


Рисунок 4 Схема импульсной стабилизации и[2]

Включив кнопку КН, конденсатор заряжается, после её выключения – разряжается, при этом отдавая полупроводниковому элементу электроэнергию. Диод излучает свет до тех пор, пока конденсатор отдаёт энергию. Время зарядки зависит от входного напряжения. Чем ниже входное напряжение, тем выше время зарядки. Свечение поддерживается нажатием и отпусканием кнопки. Этот принцип носит название широтно-импульсной модуляции (рисунок 4).

В таблице 2 приведено сравнение линейного и импульсного преобразователя тока

Таблица 2. Сравнение линейного и импульсного преобразователя тока

Тип	Плюсы	Минусы	Применение
Линейный	Не создает помех	КПД менее 80 %, нагревается	Светодиодные светильники малой мощности, ленты и фонарики
Импульсный	Высокий КПД – 95 %	Создает электромагнитные наводки	Уличное освещение и бытовое

По принципу устройства драйверы делятся на электронные, диммируемые и на основе конденсаторов.

Транзистор обязательно используется в схемах электронных драйверах, а на выходе устанавливается конденсатор, который сглаживает пульсации тока. Электронные драйверы борются с электромагнитными высокочастотными помехами и пульсациями. Минусом электронного драйвера является высокая стоимость, а плюсом – КПД, который достигает почти 95%. Такие драйверы используют в автофарах, прожекторах, уличных фонарях.

Яркостью светильника управляют диммируемые драйверы. Регулировка основывается на изменении тока на выходе. Он определяет яркость светопотока. Такие драйверы делятся на два типа: первые управляют энергией, поступающей от источника питания к светодиодам, вторые - непосредственно источникам питания. В основе диммируемых драйверов первого типа используется ШИМ-управление, где энергия поступает к нагрузке в виде импульсов. Такие драйверы применяются для светодиодных лент, бегущих строк и т.д. Принцип работы диммируемых драйверов второго типа заключается не только в ШИМ-

управлении, а и в регулировании величины, протекающего через светодиоды тока. Такие драйверы используются для LED приборов со стабилизированным током.

Анализируя два данных метода регулирования, необходимо отметить то, что при регулировании тока через светодиодные источники наблюдается не только изменение яркости свечения, но и цвета. При минимальном токе, белые светодиоды излучают желтоватый свет. Увеличивая ток, они начинают светиться синим.

Драйверы на основе конденсаторов имеют высокий КПД, который стремится к 100% и простую схему. Такие драйверы можно собрать своими руками. Это недорогие модели, которые используются для бюджетных LED светильников.

### **Заключение**

1. Основным параметром LED-драйвера, которым он сможет обеспечивать потребителя длительное время при определенной нагрузке, является выходной ток.

2. Источник питания для светодиодов следует выбирать очень тщательно. Примером может послужить люминесцентная лампа, на которую подается ток, превышающий норму на 20%. В ее характеристиках практически не произойдет изменений, а вот работоспособность светодиода уменьшится в несколько раз.

### **Литература**

1. Козловская В.Б. Электрическое освещение: / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – Минск: Техноперспектива, 2011.
2. URL:<https://dzen.ru/a/XYxWj-MGLACuT2SV> (Дата обращения: 10.04.2023)
3. Схема управления освещения [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ddecad.ru/osnovnye-vidy-shem-upravleniya-osvescheniem/> – Дата доступа: 15.04.2023.

УДК 621.355.9

**СОВРЕМЕННЫЕ НАКОПИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В СФЕРЕ ЭНЕРГЕТИКИ**  
**MODERN ENERGY STORAGE SYSTEMS**

Е.В. Радюк, И.В. Ковалец

Научный руководитель – С.О. Новиков, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

snovikov@bntu.by

E. Radziuk, I. Kovalets

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

**Аннотация:** В этой статье освещаются актуальные технологии сбора и сохранения энергии, которые применяются в промышленности и в бытовых устройствах. В тексте дается описание механизмов работы и достоинств таких систем, как литий-ионные аккумуляторы, суперконденсаторы, топливные элементы, и др. Приводятся примеры применения этих устройств в различных отраслях, включая энергетику, транспорт и средства связи. В заключении отмечается, что развитие и усовершенствование существующих систем накопления и сохранения энергии имеет важное значение для повышения их экономичности и эффективности.

**Abstract:** This article highlights current technologies for energy harvesting and conservation, which are used in industry and in household devices. The text describes the mechanisms and advantages of such systems as lithium-ion batteries, supercapacitors, fuel cells, and others. Examples are given of the application of these devices in various industries, including energy, transportation, and communications. In conclusion, it is noted that the development and improvement of existing systems of energy storage and preservation is important for increasing their economic efficiency and effectiveness.

**Ключевые слова:** накопление, хранение, аккумуляторы, энергетика, развитие.

**Key words:** storage, storage, batteries, energy, development.

**Введение**

В последнее время вопросы энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии стали все более актуальными. Для того чтобы обеспечить стабильную работу систем, работающих на возобновляемых источниках энергии, требуется эффективная система накопления и хранения энергии. Устройства накопления энергии - это системы, которые хранят энергию в различных формах, таких как электрохимическая, кинетическая, потенциальная, электромагнитная, химическая и тепловая, с использованием, например, топливных элементов, аккумуляторов, конденсаторов, маховиков, сжатого воздуха, гидроаккумуляторов, супермагнитов, водорода и т. д. [1].

Системы накопления и хранения энергии постоянно совершенствуются и модернизируются. В данной статье рассмотрим современные технологии и системы накопления и хранения энергии, их преимущества и недостатки. Также будут рассмотрены перспективы использования этих систем в будущем.

### Основная часть

Технологии накопления энергии играют все большую роль в развитии современных систем коммунального энергоснабжения. Например, общая емкость накопления энергии в США уже превысила 2 ГВт·ч, причем недавно ежегодное увеличение объединенных хранилищ энергии приблизилось к 50%. Отрасль продолжает развиваться, адаптируясь к изменениям энергетического ландшафта и внедряя новые технологии [2].

Современные системы накопления и хранения энергии включают в себя:

1) литий-ионные аккумуляторы - это наиболее распространенный тип батарей, который используется в смартфонах, ноутбуках, электромобилях и домашних батареях хранения энергии. Они обладают высокой энергоемкостью и имеют небольшой вес;

2) железо-гидридные аккумуляторы - это экологически чистые батареи, которые используются в домашних энергетических системах и солнечных батареях;

3) графеновые аккумуляторы - это новый тип батарей, который использует графеновые материалы, чтобы обеспечить высокую энергоемкость и быстрое зарядное время;

4) суперконденсаторы - это устройства, которые могут быстро хранить и выделять энергию. Они используются в электромобилях и солнечных батареях для улучшения энергоэффективности;

5) гидрогенераторы - это устройства, которые используются для преобразования энергии водорода в электричество. Они используются в системах энергетического хранения, солнечных батареях и даже водородных автомобилях;

6) твердотельные батареи - это новый тип батарей, который использует твердые электролиты вместо жидких. Они обладают высокой энергоемкостью и более высокой безопасностью, чем литий-ионные аккумуляторы.

Литий-ионные аккумуляторы (*Li-ion*) являются одними из самых популярных типов аккумуляторов на сегодняшний день. Они используют литиевую ионную технологию для хранения энергии. Основными преимуществами *Li-ion* являются высокая энергетическая плотность, низкий саморазряд, короткое время зарядки и долгий срок службы. Они также легкие и могут быть размещены в различных формах, что делает их удобными для использования в мобильных устройствах, ноутбуках, электрических автомобилях и других приложениях.

Суперконденсаторы, также известные как электрические двойные слои, являются электрохимическими устройствами, которые хранят энергию в электрическом поле. Они обладают высокой мощностью, низкой стоимости обслуживания, широкому диапазону температур и более продолжительному циклу эксплуатации по сравнению с вторичными батареями, что позволяет им быстро брать и отдавать энергию. Это делает их идеальными для применения в элект-

трических транспортных средствах и солнечных батареях, которые нуждаются в большой мощности на короткие промежутки времени [2].

Топливные элементы являются устройствами, которые получают энергию из химической реакции между кислородом и водородом. Топливные элементы имеют высокую эффективность и низкий уровень загрязнения окружающей среды, потому что они не выделяют углекислый газ. Это делает их идеальными для использования в автономных судах и подводных лодках.

Другие типы батарей и аккумуляторов также существуют, в том числе никель-металл-гидридные аккумуляторы и литий-полимерные аккумуляторы. Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от конкретных приложений и требований.

Примеры применения современных систем накопления и хранения энергии в различных отраслях, включая энергетику, транспорт и устройства связи:

- в энергетике современные системы накопления и хранения энергии могут использоваться, например, в солнечных и ветровых электростанциях. Энергия, производимая в периоды высокой загрузки, может храниться в батареях, а затем использоваться в периоды низкой загрузки;

- в транспорте современные системы накопления и хранения энергии используются в электрических и гибридных автомобилях. Аккумуляторы позволяют хранить энергию, производимую в процессе торможения и использовать ее для движения автомобиля;

- в устройствах связи системы накопления и хранения энергии могут использоваться, например, для бесперебойного питания серверов и другого оборудования. Батареи и суперконденсаторы сохраняют энергию и могут использоваться для поддержания работы системы связи в случае отключения электричества;

- в бытовых приборах также используются современные системы накопления и хранения энергии. Например, батареи для зарядки смартфонов, планшетов, ноутбуков и других устройств могут хранить энергию в достаточном объеме, чтобы несколько раз заряжать устройство в течение дня.

Анализ преимуществ и недостатков современных систем хранения энергии.

Преимущества:

- 1) экологически чистые: современные системы хранения энергии работают на безопасной для окружающей среды технологии, что позволяет избежать выброса вредных газов в атмосферу;

- 2) эффективные: некоторые из современных систем хранения энергии могут преобразовывать энергию более эффективно, чем традиционные батареи;

- 3) большой потенциал: системы хранения энергии могут использоваться в различных областях, включая транспорт, производство электроэнергии и бытовые приложения.

Недостатки:

- 1) высокие затраты: многие из современных систем хранения энергии слишком дороги и не доступны для обычных потребителей;

2) низкая мощность: некоторые системы хранения энергии обладают недостаточной мощностью, чтобы использоваться в крупных масштабах;

3) ограниченная жизненность: многие из современных систем хранения энергии имеют ограниченный срок службы, что может требовать установки нового оборудования через несколько лет;

4) необходимость правильной утилизации: некоторые из современных систем хранения энергии содержат опасные химические элементы, которые требуют правильной утилизации для предотвращения загрязнения окружающей среды.

Перспективные направления научных исследований на тему «Современные системы накопления и хранения энергии» с целью выработки рекомендаций по их использованию в электрических сетях:

- исследование новых материалов для создания более эффективных аккумуляторных батарей. Это может включать в себя разработку батарей на основе твердотельных электролитов, батарей на основе литий-металлических анодов, батарей на основе кислородных катодов и других инновационных материалов;

- исследование методов улучшения эффективности зарядки и разрядки батарей. Это может включать в себя улучшение дизайна батарей, разработку умных систем управления зарядкой и разрядкой, а также применение методов быстрого заряда;

- исследование энергетических хранилищ на основе технологии гравитационного и гидравлического накопления. Эти системы используются для накопления энергии в виде потенциальной энергии воды или частиц в гравитационно-механических системах;

- исследование технологии суперконденсаторов для энергетических накопителей. Суперконденсаторы представляют собой электрические устройства, которые могут хранить большое количество энергии на короткое время;

- исследование использования биомассы в качестве источника энергии. Это может включать в себя разработку систем накопления и использования биотоплива, а также исследование эффективности новых технологий, применяемых в производстве биотоплива;

- исследование технологии сложных систем управления энергообменом между предприятиями и государствами. Эти системы позволяют более эффективно использовать и распределять доступную энергию на международном уровне;

- исследование технологий, связанных с взаимодействием энергетических систем различных типов и масштабов, таких как ветро- и солнечные электростанции, электромобили и обычные энергосистемы. Это может включать в себя разработку инновационных систем электроуправления и управления энергосистемами

Для более эффективного и экономичного использования энергетических ресурсов необходимо продолжать развивать и совершенствовать системы хранения и накопления энергии. Системы такого типа позволяют увеличивать ис-



пользование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая, за счет сохранения избыточной энергии в периоды низкого потребления, для последующего использования в периоды повышенного спроса.

Кроме того, системы хранения энергии также могут использоваться для сокращения нагрузки на сеть в периоды пикового потребления, что повышает надежность и эффективность работы всей системы энергоснабжения. Это позволяет снизить затраты на строительство новых электростанций и поддержание имеющихся объектов. Развитие технологий хранения энергии определенно будет способствовать увеличению доли возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии. Это также будет приводить к снижению выбросов парниковых газов и других вредных веществ, что в свою очередь поможет справиться с вызовами изменения климата.

В целом можно сказать, что дальнейшее развитие и улучшение систем накопления и хранения энергии позволят повысить устойчивость систем энергоснабжения, снизить затраты на производство электроэнергии и снизить отрицательное влияние, которое производство энергии оказывает на окружающую среду.

### **Заключение**

Многие технические проблемы в сфере накопления и хранения электрической энергии постепенно решаются. Повышение информированности о последних достижениях в энергетическом инжиниринге способствует росту спроса на аккумуляторы новых типов и другие технические решения для возобновляемых источников энергии. Низкая стоимость позволяет перезаряжаемым батареям становиться все более конкурентоспособными на рынке. Стоимость систем хранения энергии резко сократилась в последние годы из-за увеличения количества их установок и повышенного интереса к ним. Все эти факторы будут и дальше способствовать беспрецедентному использованию аккумуляторных батарей в электрических сетях [3].

### **Литература**

1. ElectricalSchool.info / Современные устройства накопления энергии, самые распространенные типы накопителей энергии: [сайт]. – 2023. - URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/2443-ustroystva-nakopleniya-energii.html> (дата обращения: 14.04.2023). - Текст : электронный.
2. Краузе, К. Современные системы накопления энергии / Краузе, К., Рентюк, В. - Текст : электронный - 2020. - С. 12-13. - URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/8612.pdf> (дата обращения: 14.04.2023).
3. Esfccompany.com / Технологии хранения электрической: [сайт]. – 2023. - URL: <https://esfccompany.com/articles/tekhnologii/tekhnologii-khraneniya-elektricheskoy-energii/> (дата обращения: 14.04.2023). - Текст : электронный.

УДК 620

**ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ  
THE PROBLEM OF DISPOSAL OF ALTERNATIVE ENERGY  
EQUIPMENT**

В.С. Вадейко, В.Н. Коршун

Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ef@bntu.by

V. Vadeyko, V. Korshun

Supervisor – Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** «Зеленую» энергию выбирают многие страны, города, компании. Человечество учится использовать альтернативные источники энергии, но не знает, как правильно утилизировать оборудование, предназначенное для её получения. В данной работе были рассмотрены примеры утилизации лопастей ветротурбин и солнечных панелей.*

***Abstract:** Many countries, cities, and companies choose "green" energy. Humanity is learning to use alternative energy sources, but does not know how to properly dispose of the equipment intended for its production. In this paper, examples of utilization of wind turbine blades and solar panels were considered.*

***Ключевые слова:** альтернативная энергетика, ветротурбина, лопасти, солнечные батареи, утилизация.*

***Keywords:** alternative energy, wind turbine, blades, solar panels, recycling.*

### **Введение**

В последние годы альтернативная энергетика активно развивается. Нарастание мощностей происходит за счет сооружения новых ветропарков и расширения уже существующих, а также за счет увеличения количества солнечных электростанций. На фоне этих процессов возникает вопрос о том, как следует поступать с уже отработавшими установками и их элементами.

### **Основная часть**

Средний срок эксплуатации первых солнечных модулей и ветротурбин составляет 25-30 лет. Введенные в 1990-х годах в эксплуатацию установки уже сейчас подлежат замене. В результате электронные элементы солнечных батарей и композитные материалы лопастей ветровых турбин, которые сейчас не перерабатываются в производственных масштабах, зачастую подлежат захоронению на своего рода свалках.

Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, а также исследовательский проект Re-Wind прогнозируют, что 2050-му году достигнет своего конца службы 78 миллионов метрических тонн солнечных панелей, что соответствует 6 миллионам метрических тонн отработанных электронных

материалов, а также будут подлежать утилизации 40 миллионов тонн композитных материалов лопастей ветротурбин [3].

Причины трудностей, возникающих при утилизации и переработке отработавшего оборудования схожи для солнечной и ветроэнергетики.

При переработке солнечных панелей возникает необходимость использования нестандартных для электроники методов переработки. В основном в качестве полупроводника в солнечных батареях используется кремний. Кремниевые кристаллы в каждой ячейке покрываются тонкими полосками серебра или другого металла. По этим каналам передается электричество в медную проводку панели. При переработке панели часто основное внимание уделяют извлечению из панелей алюминия и меди, в то время как кремниевые пластины и остальные материалы попросту перемалываются. Данный способ переработки малоэффективен.

Кроме перечисленных материалов при производстве солнечных панелей используются токсичные вещества, что также усложняет процессы утилизации или переработки.

Трудоемким является процесс разборки многослойной конструкции, защищающей элементы солнечной батареи от воздействия окружающей среды. Эта конструкция состоит из защитной пленки прозрачного пластика, слоев стекла и пластика и алюминиевой рамки. В результате основной проблемой является разделение компонентов конструкции для эффективной переработки.

Утилизация ветротурбины по большей части не вызывает трудностей. 85-90% от общей массы турбины подлежат утилизации. Оставшуюся часть составляют лопасти. Трудности утилизации лопастей обусловлены содержанием в них сложных композиционных материалов – комбинации армированных углеродных или стеклянных волокон и полимерной матрицы. Такая конструкция позволяет добиться оптимального соотношения прочности и массы лопасти, однако затрудняет переработку, поскольку, в отличие от термопластов, шитые полимеры нельзя плавить. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективных методов переработки.

Несмотря на перечисленные сложности, уже имеются способы переработки лопастей ветротурбин и солнечных панелей, а также инновации, устраняющие ранее имевшиеся проблемы из процесса переработки. Так для переработки лопастей возможно использование методов механической рециркуляции, сольволиза и пиролиза, а также фрагментации высоковольтным импульсом. Однако в данном случае существует проблема, состоящая в сужении области применения полученных после переработки полимерных материалов, качество которых более низкое, чем у исходного материала. Кроме того, переработка не осуществляется в производственных масштабах [3].

С целью оптимизации переработки солнечных панелей французская компания Veolia стала использовать роботов, назначение которых состоит в разделении частей кремниевых солнечных панелей для вторичной переработки.

В 2021 году компания Siemens Gamesa Renewable Energy разработала перерабатываемые лопасти для ветрогенераторов RecyclableBlade. В процессе утилизации лопасть погружается в специальный раствор, в котором происходит

ее распад на первичные материалы. Смола, использовавшаяся при производстве лопасти, растворяется в растворе. Полученные при переработке материалы можно комбинировать с клеями и прессовать в огнестойкие и влагостойкие композитные панели [4].

Филиал компании General Electric, занимающийся вопросами о возобновляемых источниках энергии, по договоренности с производителем цемента Holcim используют при производстве бетона композитные материалы лопастей. В результате замены части цементного сырья и использования оставшихся после переработки органических соединений в качестве топлива, выбросы углекислого газа при производстве цемента сокращаются на 27%, а чистое снижение потребления воды составляет 13%.

Для того чтобы сделать лопасти ветротурбин пригодными для вторичной переработки, французская компания Arkema предложила изготавливать лопасти с использованием термопластических смол. Экспериментальная лопасть была изготовлена из стекловолокна и метакрилатной смолы, которую можно расплавлять и перерабатывать.

### **Заключение**

Доля солнечной и ветровой энергетики в мировом энергетическом балансе составляет примерно 11% и продолжает стабильно расти. Установленная мощность солнечной энергетики в 2022 году составила 1185 ГВт [1], ветровой энергетики – 837 ГВт [2]. Эти показатели, а также нацеленность производителей электроэнергии на дальнейшее развитие альтернативной энергетики обуславливает актуальность вопроса утилизации отработавшего оборудования сейчас и в ближайшем будущем.

### **Литература**

1. Солнечные электростанции. [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://renew.ru/v-2022-godu-v-mire-bylo-ustanovleno-240-gvt-solnechnyh-elektrostantsij/>. Дата доступа: 18.04.2023.
2. Возобновляемая энергетика. [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://www.m.eprussia.ru/news/base/2022/9324778.htm/>. Дата доступа: 18.04.2023.
3. Проблемы утилизации отработанного оборудования зелёной энергетики. -Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/mvideo/articles/599687/>. Дата доступа: 20.04.2023.
4. Утилизация лопастей турбин: ахиллесова пята ветроэнергетики. -Режим доступа: <https://compositeworld.ru/articles/market/id61a108718606de0019d9207f>. Дата доступа: 25.04.2023.

УДК 620

**ПУНКТ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ  
THE POINT OF DEEP BURIAL OF RADIOACTIVE WASTE**

А.И. Васильева, С.В. Зеньков

Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ef@bntu.by

A. Vasileva, S. Zenkov

Supervisor – Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** описание устройства ПГЗРО и методов определения его безопасности и надежности.*

***Abstract:** description of the DDFRWC device and methods for determining its safety and reliability.*

***Ключевые слова:** радиоактивные отходы, радиация, безопасность, захоронение.*

***Keywords:** radioactive waste, radiation, safety, burial.*

### **Введение**

Пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) — это сооружение на глубине более 100 метров от поверхности земли, предназначенное для размещения высокоактивных тепловыделяющих и среднеактивных долгоживущих РАО без намерения их последующего извлечения и обеспечивающее радиационную безопасность работников такого пункта, населения и окружающей среды в течение периода потенциальной опасности РАО. [1]

Пункт глубинного захоронения (ПГЗРО) предназначен для глубинного захоронения долгоживущих ВАО с высоким тепловыделением (РАО класса 1) и долгоживущих ВАО и САО с незначительным тепловыделением (РАО класса 2). Предварительный этап к созданию ПГХРО — создание на площадке Подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). РАО класса 1 планируется захоранивать в вертикальных скважинах глубиной 75 метров, в толстостенных пеналах, с мощным бентонитовым барьером, а РАО класса 2 планируется размещать в штабелях контейнеров в горизонтальных подземных выработках.

Первая очередь ПГЗРО создается с целью окончательного вывода из сферы жизнедеятельности ранее накопленных наиболее экологически опасных долгоживущих ВАО и САО, находящихся в наземных временных хранилищах.

Подземная исследовательская лаборатория — первоначальный этап сооружения ПГЗРО, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и международным опытом выполнения аналогичных работ. Она необходима для обоснования долговременной безопасности глубинного захоронения долгоживущих РАО.

В задачи подземной лаборатории входит: дополнительные исследования характеристик вмещающего массива горных пород; подтверждение пригодности массива пород для безопасного глубинного захоронения долгоживущих РАО; исследование и обоснование изолирующих свойств системы инженерных барьеров; отработка технических решений и транспортно-технологических схем строительства и эксплуатации объекта захоронения РАО; обучение производственного персонала.

### **Основная часть**

Оценку долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов рекомендуется выполнять с целью подтверждения способности системы захоронения радиоактивных отходов ограничивать радиационное воздействие пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов на население и окружающую среду пределами, установленными санитарными правилами и нормами радиационной безопасности, с учетом всех значимых событий, явлений и факторов, влияющих на выход радионуклидов из пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов и их перенос в окружающей среде, в том числе с учетом цепочек радиоактивных превращений. [2]

При проведении оценки долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов рекомендуется выполнять прогнозные расчеты миграции радионуклидов в системе захоронения радиоактивных отходов и окружающей среде (биосфере) и радиационного воздействия пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов на население, а также прогнозы развития процессов и явлений, учитываемых в различных сценариях (далее — прогнозные расчеты). [2]

В зависимости от этапа жизненного цикла ПГЗРО оценку долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется выполнять на основе консервативного или реалистичного подходов или их комбинации.

При использовании консервативного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется в сценариях и расчетной модели в качестве исходных данных и расчетных параметров использовать данные (в пределах допустимых диапазонов их значений), а также допущения, предположения и граничные условия, заведомо приводящие к наиболее неблагоприятным результатам, то есть в предположении максимального радиационного воздействия ПГЗРО на критическую группу населения.

При использовании реалистичного подхода к оценке долговременной безопасности ПГЗРО рекомендуется в сценариях и расчетной модели в качестве исходных данных и расчетных параметров использовать характеристики ПГЗРО и условий площадки и района его размещения, граничные условия там, где это возможно, подтвержденные исследованиями, в том числе в ПИЛ, научно обоснованные допущения и предположения.

С целью определения статистических характеристик результатов расчетной модели рекомендуется выполнять статистическую обработку результатов многовариантных расчетов. Оценку долговременной безопасности ПГЗРО на этапе размещения рекомендуется выполнять на основе консервативного подхода.

На основании исходных данных о характеристиках ПГЗРО и условиях его размещения рекомендуется разрабатывать сценарии, представляющие собой возможные последовательности событий, явлений и факторов, а также процессов, происходящих в системе захоронения РАО.

В сценариях рекомендуется учитывать:

- 1) свойства (условия, характеристики, особенности) ПГЗРО, площадки и района его размещения, влияющие на долговременную безопасность ПГЗРО;
- 2) внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения и площадке ПГЗРО;
- 3) процессы, определяющие миграцию радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде, в том числе выход радионуклидов из компаундов (матричных материалов с включенными в них РАО) и упаковок РАО;
- 4) факторы, которые могут прямо или косвенно влиять на миграцию радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде;
- 5) возможные пути миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде;
- 6) исходные события, учитываемые при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО, установленные федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии;
- 7) механизмы облучения критической группы населения.

Обоснование учета в сценариях событий, явлений и факторов рекомендуется выполнять качественно и количественно, основываясь на результатах специализированных прогнозных оценок и исследований, выполненных в том числе в ПИЛ. В рамках консервативного подхода допускается использовать экспертный метод, основанный на анализе и формализации мнений квалифицированных специалистов, их знании характеристик ПГЗРО и условий его размещения, возможных состояний системы захоронения РАО и ее эволюции в предполагаемых условиях, а также имеющегося опыта.

В зависимости от частоты реализации учитываемых событий, явлений и факторов рекомендуется разрабатывать сценарии следующих типов:

- 1) сценарий нормальной эволюции (наиболее вероятный сценарий), то есть последовательность наиболее вероятных событий, явлений и факторов, в том числе процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО;
- 2) альтернативные сценарии, то есть вероятные отклонения системы захоронения РАО от ее нормальной эволюции, которые могут приводить к более негативным последствиям для системы захоронения РАО, приводящим к изменению механизмов, путей и (или) скорости миграции радионуклидов в системе захоронения РАО и окружающей среде, включая маловероятные сценарии, обусловленные катастрофическими внешними воздействиями природного и техногенного характера на площадке размещения ПГЗРО.

При разработке сценария нормальной эволюции рекомендуется учитывать постепенное снижение защитных, задерживающих, прочностных и изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности со временем в результате внутренних воздействий и процессов.

При разработке альтернативных сценариев рекомендуется учитывать:

1) внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПГЗРО, способные привести к ухудшению изолирующих и прочностных свойств естественных барьеров безопасности, нарушению целостности и отказам инженерных барьеров безопасности;

2) внутренние воздействия и недостатки в системе инженерных барьеров безопасности, приводящие к их отказам и раннему выходу из строя, включая возникновение СЦР после закрытия ПГЗРО, дефекты производственного характера, ошибки при создании системы инженерных барьеров безопасности;

3) непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО, включая буровые и горные работы, различные виды промышленной деятельности на площадке ПГЗРО, приводящие в том числе к вскрытию ячеек захоронения РАО.

### **Заключение**

ПГЗРО являются крайне важные объектами, к которым необходимо подходить максимально ответственно. Следует рассмотреть всевозможные варианты развития событий и их последствия.

### **Литература**

1. Проектирование и строительство подземной исследовательской лаборатории для изучения вопросов захоронения РАО классов 1 и 2 [Электронный ресурс]/ФЦП ЯРБ.РФ- Режим доступа : <https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/about/events-program/direction1event8/>.- Дата доступа : 17.04.2023.

2. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии [Электронный ресурс]/ Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору- Режим доступа : [https://docs.secnrs.ru/documents/rbs/РБ-003-21/РБ-003-21.html#\\_Тос68600418](https://docs.secnrs.ru/documents/rbs/РБ-003-21/РБ-003-21.html#_Тос68600418).- Дата доступа : 17.04.2023.



УДК 620.9

**СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЕЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ**  
**SOLAR ENERGY AND ITS ENVIRONMENTAL PROBLEMS**

В.В. Голуб, М.А. Шешко

Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ef@bntu.by

V. Golub, M. Sheshko

Supervisor – Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** *Статья описывает солнечную энергетику и ее экологические проблемы. Описываются преимущества и недостатки солнечной энергетики, способы решения этих проблем. В конце статьи рассказывается про способы решения проблем, а также перспективы развития этого вида энергетики.*

**Abstract:** *The article describes solar energy and its environmental problems. The advantages and disadvantages of solar energy, ways to solve these problems are described. At the end of the article, we talk about ways to solve problems, as well as prospects for the development of this type of energy.*

**Ключевые слова:** *Солнце, панели, утилизации, батареи, электроэнергия, утилизация.*

**Keywords:** *Sun, panels, recycling, batteries, electricity, recycling.*

**Введение**

Солнце – самый мощный источник энергии на нашей планете, естественный и экологически чистый. Оно производит энергию уже много миллиардов лет. Эта энергия общедоступная и бесплатная, поэтому активно используется человечеством для удовлетворения своих нужд. Каждый час солнце излучает на Землю энергии больше, чем человечеству необходимо в год. Солнце-это источник жизни, дающий возможность родиться и вырасти каждому живому организму на Земле уже на протяжении нескольких миллиардов лет. Всерьез о технологическом «приручении» солнечного света человек начал задумываться только в прошлом столетии

Солнечная энергия является основой жизни. Человечество научилось ее использовать как в виде тепла, так и преобразовывать в другие виды – электрическую и механическую.

Солнечная энергетика – это использование солнечного излучения для получения энергии в каком-либо виде. Солнечная энергетика использует возобновляемый источник энергии и в перспективе может стать экологически чистой, то есть не производящей вредных отходов.

**Основная часть**

Солнечная энергетика является одним из самых древних видов энергетики, человечество начало использовать ее еще в древности для сушки продуктов, обогрева помещений и приготовления пищи. Однако первыми, кто начал при-

менять энергию Солнца для производства электроэнергии, стали французы Жак Шондельмайер и Жозеф Лавуазье в 1839 году. Они создали первый солнечный элемент, который основывался на принципе фотоэлектрического эффекта.

В 1883 году американский изобретатель Чарльз Фритц установил первую солнечную электростанцию, которая использовалась для подачи электричества на здание в Нью-Йорке. В 1904 году физик и изобретатель Чарльз Гермес используя солнечную энергию, создал первый прототип солнечного котла. В 1954 году американские ученые Джеральд Пирсел и Дональд Чэпмэн создали первую солнечную батарею. Первые солнечные панели были использованы для питания спутников, вращающихся вокруг Земли. В 1958 году в США был запущен спутник Vanguard I (Авангард 1), на котором размещалось шесть солнечных батарей мощностью около 1 Вт.

Сегодня технологии солнечной энергетики достигли невероятных высот. Продуктивность панелей улучшилась, а стоимость снизилась. Солнечные электростанции строятся по всему миру и генерируют огромные объемы энергии. Солнечная энергия стала одним из главных источников чистой, безопасной и доступной энергии в мире.

Солнечная энергетика в наше время является одной из самых популярных и перспективных возможностей генерации электроэнергии. Это связано с рядом преимуществ, которые она предлагает.

Во-первых, солнечная энергия бесплатна и бесконечна. Так как Солнце – это возобновляемый источник энергии, солнечные батареи могут производить электроэнергию без прерывания и без каких-либо дополнительных затрат на топливо.

Во-вторых, производство солнечных панелей стало значительно дешевле и доступнее в последние годы, что позволяет сокращать стоимость электроэнергии для конечного потребителя.

В-третьих, солнечная энергетика экологически безопасна. Она не выбрасывает в атмосферу вредные газы и не загрязняет окружающую среду.

В-четвертых, солнечная энергетика стимулирует экономический рост и создание новых рабочих мест. В мире сейчас активно развиваются индустрии, связанные с производством солнечных панелей, и технологии производства энергии из солнечной энергии.

Таким образом, солнечная энергетика – это эффективный и экологически безопасный источник энергии, который может значительно снизить зависимость от нефтяных ресурсов и поспособствовать экономическому развитию как в масштабах государства, так и в масштабах отдельных регионов.

Солнечная энергетика – это один из самых перспективных и экологически чистых видов производства электроэнергии. При этом хорошо известно, что солнечная энергия является бесконечным источником энергии, который может использоваться для производства электроэнергии на протяжении длительного времени. Однако, на сегодняшний день солнечная энергетика сталкивается с рядом экологических проблем. Как и у любой другой формы энергетики, у солнечной энергетики есть некоторое воздействие на окружающую среду. Однако,

минусы солнечной энергетики связанные с экологией невелики в сравнении с использованием других источников энергии, таких как нефть, уголь или газ.

Первая проблема, связанная с солнечной энергетикой, это производство солнечных панелей. Для производства панелей необходимо использовать различные химические вещества, такие как селен, кадмий и свинец, которые являются токсичными и могут загрязнять окружающую среду. Кроме того, в процессе производства панелей может быть потрачено большое количество энергии. Производство солнечных панелей начинается с производства кристаллов кремния, основного материала для производства солнечных элементов. Это происходит в специальных печах, где кремний плавится при температуре более 1 400°С, и затем его литьем формируют кристаллы.

После этого кристаллы кремния нужно обработать и охладить, чтобы получить пластины, которые затем используются для производства солнечных элементов. Пластины также обрабатываются, чтобы начертить на них шестигранную схему токопроводящих контактов.

Затем на пластины кремния наносятся фоточувствительные слои, которые превращают солнечный свет в электрический ток. Для этого используются три основных технологии: моно-, кристалло-, и аморфный кремний. После этого пластины отделяют различными материалами, которые увеличивают эффективность сбора солнечной энергии, а затем складывают их вместе, чтобы создать солнечные панели. В процессе производства солнечных панелей также используются другие материалы, такие как стекло, пластик, металлы и электроника. Каждый этап производства требует высокой точности и знаний в области технологий солнечной энергетики.

Вред, который может быть нанесен окружающей среде при производстве солнечных панелей, включает в себя загрязнение воздуха и воды, вызванное выбросами промышленных отходов и использованием ряда химических веществ в производственном процессе.

Также процесс производства солнечных панелей может потреблять большое количество электроэнергии, что также может иметь отрицательный экологический эффект. Однако, на длительной перспективе, использование солнечных панелей помогает уменьшить зависимость от нефти, уменьшает выбросы углекислого газа и других вредных веществ, а также способствует экологической устойчивости.

Вторая проблема – это утилизация солнечных панелей по окончании срока их эксплуатации. К сожалению, на сегодняшний день не существует эффективной технологии переработки солнечных панелей, что приводит к их накоплению и загрязнению окружающей среды. Проблема утилизации солнечных панелей связана с тем, что они содержат опасные для окружающей среды вещества, такие как кадмий, свинец и ртути. Когда солнечные панели кончают свой ресурсный срок (около 25 лет) или становятся непригодными для использования, их необходимо утилизировать.

Технологии утилизации солнечных панелей все еще находятся в стадии разработки и создания. Большинство используемых сейчас способов не являются идеальными и могут приводить к загрязнению окружающей среды. Напри-

мер, одним из самых распространенных способов утилизации солнечных панелей является их сжигание. Однако этот процесс может приводить к выбросу опасных веществ в атмосферу.

Другим примером неидеальной утилизации является складирование устаревших или сломанных панелей на свалках, что приводит к их длительному разложению под воздействием природных факторов и выделению опасных веществ. Таким образом, при утилизации солнечных панелей возникают значительные проблемы с учетом негативного воздействия на окружающую среду. Необходимо искать новые, более безопасные и эффективные способы утилизации солнечных панелей.

Третья проблема солнечной энергетики – это необходимость использования больших площадей земли для размещения солнечных панелей. Это может приводить к уничтожению экосистем и обитателей, которые живут на этих территориях.

Проблема использования больших площадей земли для установки солнечных панелей заключается в том, что для этого требуется значительное количество земли, что может привести к уничтожению экосистем и нарушению биоразнообразия. Кроме того, процесс установки солнечных панелей может вызывать определенный вред экологии. Некоторые из них:

1) разрушение и изменение природных угодий и ландшафтов - для установки солнечных панелей необходимо убрать растительный покров и произвести завоз грунта, это может привести к исчезновению редких видов растений и животных;

2) использование больших количеств химических веществ и материалов - производство солнечных панелей может включать использование токсичных и опасных химических веществ, которые могут попадать в окружающую среду, загрязняя почву и воду;

3) потребление водных ресурсов - так как для охлаждения солнечных панелей требуется охлаждающая жидкость, которая затем выбрасывается, это может вызывать иссушение близлежащих водоемов;

4) значительный вклад в изменение климата - солнечные панели могут уменьшить выбросы парниковых газов, однако производство и транспортировка этих панелей вызывает выбросы углекислого газа в окружающую среду.

В целом, использование солнечных панелей является современным и продвинутым способом генерации энергии, однако для уменьшения негативного воздействия на окружающую среду, необходимо использовать технологии, которые уменьшают требования к земле и ресурсам при производстве и установке солнечных панелей.

Необходимо признать, что солнечная энергетика имеет свои экологические проблемы. Однако, она все еще является одним из самых чистых и перспективных видов производства электроэнергии. Для решения проблем необходимо развивать новые технологии для производства солнечных панелей и их утилизации, а также использовать эффективные методы для максимального использования земельных участков.

### **Заключение**

Можно отметить, что использование солнечной энергии в энергетике является перспективной областью развития. Однако, несмотря на все положительные стороны, применение солнечной энергетики все еще нуждается в дальнейшем исследовании и совершенствовании. Важно продолжить изучение этих технологий, и внедрять их в более широком спектре энергетических систем, чтобы повысить эффективность и надежность их работы.

#### **Литература**

1. Yaklass.by / Солнечная энергетика: [сайт]. – 2023. - URL: <https://yaklass.by> (дата обращения: 05.05.2023). - Текст : электронный.
2. Top-technologies.ru. Проблемы использования солнечной энергии: [сайт]. – 2023 – URL: <https://top-technologies.ru> (дата обращения: 05.05.2023). – Текст электронный.

УДК 528.526.6

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ  
В ЭНЕРГЕТИКЕ  
LASER AND OPTICAL GYROSCOPE APPLICATIONS IN ENERGY**

И.В. Ковалец, Е.В. Радюк

Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ef@bntu.by

I. Kovalets, E. Radziuk

Supervisor – Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Лазерные и оптические гироскопы являются приборами, используемыми для измерения угловой скорости и ориентации объектов в пространстве. Основным принципом работы гироскопов является сохранение углового момента твердого тела при вращении, который проявляется в форме гироскопической прецессии. Лазерные и оптические гироскопы широко применяются в навигации, авиации, подводных лодках, медицинской технике, промышленности и других областях, где требуется точное измерение угловой скорости и ориентации объектов.*

***Abstract:** Laser and optical gyroscopes are devices used to measure angular velocity and orientation of objects in space. The basic principle of gyroscopes is the conservation of angular momentum of a solid body as it rotates, which manifests itself in the form of gyroscopic precession. Laser and optical gyroscopes are widely used in navigation, aviation, submarines, medical equipment, industry and other fields where accurate measurement of angular velocity and orientation of objects is required.*

***Ключевые слова:** Гироскоп, энергетика, лазерный, оптический, измерение, угловая скорость, ориентация.*

***Key words:** Gyroscope, energy, laser, optical, measurement, angular velocity, orientation.*

### **Введение**

Гироскопы, один из фундаментальных элементов навигационных систем, играют важную роль в современных технологиях. Они широко используются в различных областях, таких как авиация, аэрокосмическая, морская и наземная навигация. За многие годы было разработано несколько типов гироскопов, однако лазерные и оптические гироскопы являются одними из самых передовых и эффективных устройств, доступных в настоящее время. Эти гироскопы обладают широким спектром преимуществ, таких как высокая точность, прочность и высокая стабильность. В данной статье представлен обзор лазерных и оптических гироскопов, включая принципы их работы, преимущества, ограничения и практическое применение.

### **Основная часть**

Лазерный гироскоп (ЛГ) основан на явлении Сагана, которое заключается в том, что луч света при прохождении через ротирующий элемент испытывает изменение фазы. Это изменение фазы зависит от скорости вращения элемента и может быть использовано для измерения угловой скорости [1].

Лазерный гироскоп состоит из лазерного излучателя, делительной призмы, некоторого количества зеркал и фотодетектора. Суть работы лазерного гироскопа состоит в том, что освещенный лазером круг с помощью зеркал отклоняется в определенном направлении, а затем проходит через делительную призму. Для измерения угловой скорости вращения используются интерферометрические методы, поскольку вращающийся прибор будет изменять длину волны лазерного излучения.

Оптический гироскоп использует эффект Сагана и комбинирует его с использованием оптических волноводов и интерферометров. Это позволяет достичь более высокой точности и чувствительности при измерении угловых скоростей.

Оптический гироскоп похож на лазерный гироскоп по своей конструкции. Он также состоит из лазерного излучателя, оптических интерферометров и фотодетектора. Эти интерферометры построены путем расщепления световых лучей и последующим объединением на выходе. При вращении элементов гироскопа, длина световых путей меняется, что приводит к разности фаз между лучами. Напряженность света, зарегистрированного на выходе такого гироскопа, зависит от величины изменения фазы и от скорости изменения фазы при вращении элементов гироскопа.

К основным характеристикам лазерных гироскопов можно отнести:

- Точность измерения угловых скоростей - от 0,0001 до 0,00001 градуса в секунду.
- Работает на оптических принципах, что обеспечивает высокую точность измерений.
- ЛГ имеет низкий уровень шума и поэтому может использоваться для измерения малых угловых скоростей.
- Он не требует механических частей и потому обладает долгим сроком службы.

ЛГ обеспечивает высокую точность измерений, что делает его одним из самых точных датчиков угловой скорости. Он не имеет контакта с вращающимся образцом, поэтому не требуется техническое обслуживание и ремонт. Кроме того, лазерный гироскоп имеет довольно простую конструкцию и небольшой размер, что позволяет использовать его в компактных приборах.

Однако существует и ряд ограничений лазерных гироскопов, а именно:

- ЛГ имеет высокую стоимость по сравнению с другими типами гироскопов.
- Он подвержен влиянию внешних факторов, таких как вибрации и температурные изменения.
- Лазерный гироскоп не может использоваться для измерения линейных движений, его применение ограничивается только измерением угловых скоростей.

В целом, лазерный гироскоп является высокоточным инструментом, который обеспечивает точные измерения угловых скоростей. Его использование находится в ограниченном числе областей, но там, где требуется высокая точность данных, ЛГ остается незаменимым средством.

Оптические гироскопы имеют следующие характерные особенности:

- Они чувствительны к вращению и могут работать с высокой точностью, что делает их незаменимыми для навигации и авиации.
- Оптические гироскопы не имеют движущихся частей, что делает их менее подверженными износу и дает им значительный ресурс работы.
- Они могут работать в широком диапазоне температур.
- Они не зависят от магнитных полей и могут использоваться вблизи магнитных источников.

Ограничением оптических гироскопов:

- Высокая стоимость
- Требуются высокоточная калибровка, в частности, при первой установке
- Работают на основе сложных физических явлений и потребляют большое количество энергии
- Невысокая частота измерений - до нескольких килогерц, что не позволяет использовать их в определенных приложениях.

Оба вышеописанных типа гироскопов имеют множество применений. Например, они используются в навигации морских и воздушных судов, в авиации, в космических приложениях, в геофизике и многих других областях. Кроме того, лазерные и оптические гироскопы имеют также немаловажное значение для энергетической сферы.

В энергетической отрасли лазерные и оптические гироскопы наиболее широко применяются для определения направления вращения генератора ветряной установки. Ветроэлектростанции активно развиваются, и лазерные гироскопы – это надежный прибор для контроля скорости вращения генератора и определения его положения в пространстве. От того, как точно работает генератор, зависит скорость подачи в электросеть энергии, а также стабильность работы всей системы в целом.

Гироскопы могут быть использованы для решения многих других задач в энергетической отрасли. Ниже приведены некоторые из них:

1. Контроль и управление вращением оборудования: гироскопы могут использоваться для контроля и управления вращением оборудования, такого как роторы генераторов, компрессоры, турбины и другие устройства, которые работают на высоких скоростях.

2. Мониторинг состояния оборудования: гироскопы могут использоваться для мониторинга состояния оборудования, например, для определения вибрации, смещения или деформации.

3. Определение местоположения объектов: гироскопы с высокой точностью могут определять местоположение не только в космической и авиационной промышленности, но и в энергетической отрасли, например, для определения расположения трубопроводов или кабельных линий.



4. Управление направлением движения техники: гироскопы могут использоваться для управления направлением движения техники, например, для стабилизации и ориентации буровых установок или для поддержания управляемости грузовиков, используемых в горнодобывающей промышленности.

Лазерные гироскопы часто применяются в гидротурбинах и генераторах электрической энергии. Использование этих устройств позволяет снизить риск аварийных ситуаций и повысить поток производства энергии.

Таким образом, использование лазерных и оптических гироскопов в энергетической отрасли является необходимым условием для контроля скорости вращения генератора и стабильности работы всей системы. Новейшие разработки в данной области позволяют повысить точность и устойчивость приборов, что в свою очередь повышает эффективность работы всего механизма.

Использование лазерных и оптических гироскопов в энергетике может привести к значительному экономическому эффекту и повышению экологической безопасности.

Лазерные и оптические гироскопы используются для контроля и стабилизации роторных машин, таких как турбины и генераторы. Это позволяет снизить износ и увеличить долговечность оборудования, а также улучшить его эффективность и производительность.

Помимо этого, применение лазерных и оптических гироскопов может способствовать уменьшению выбросов вредных веществ и увеличению энергоэффективности процессов. Это, в свою очередь, позволит сократить затраты на топливо и снизить негативное воздействие производства на окружающую среду.

Некоторые возможности для новых разработок и исследований, связанных с гироскопами в энергетике, включают [2]:

1. Энергетически эффективные электрогенераторы. Гироскопы могут использоваться в качестве движущихся частей в электрогенераторах, что позволяет создавать более эффективные системы для генерации электроэнергии.

2. Усовершенствование системы энергохранения. Использование гироскопов в энергохранительных устройствах может позволить создавать более эффективные системы хранения энергии, которые могут быть использованы в различных сферах — от солнечных батарей до электрических автомобилей.

3. Улучшение систем автоматического управления. Гироскопы могут использоваться в системах автоматического управления для улучшения точности и стабильности летательных аппаратов, морских судов или других автономных систем.

4. Создание систем наведения. Использование гироскопов в системах наведения может улучшить точность наведения различных систем, например, баллистических ракет.

5. Улучшение систем контроля и стабилизации плазмы. Гироскопы могут быть использованы в качестве устройств для контроля и стабилизации плазменных процессов, что может применяться в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу.

6. Разработка криогенных гироскопов для использования в космосе. Использование гироскопов в космических аппаратах может быть усовершенствовано путем создания гироскопов, работающих в экстремальных условиях низких температур.

7. Исследование гравитационных волн. Использование гироскопов может помочь при исследовании гравитационных волн и создании новых систем для наблюдения за космическими явлениями.

Это лишь несколько примеров возможностей для новых разработок и исследований с использованием гироскопов в энергетике. Учитывая все преимущества и потенциальные применения этой технологии, ожидается, что в ближайшее время будут разработаны еще более динамичные и эффективные системы на основе гироскопов.

### **Заключение**

Можно отметить, что использование лазерных и оптических гироскопов в энергетике является перспективной областью развития. Однако, несмотря на все положительные стороны, применение лазерных и оптических гироскопов в энергетике все еще нуждается в дальнейшем исследовании и совершенствовании. Важно продолжить изучение этих технологий, и внедрять их в более широком спектре энергетических систем, чтобы повысить эффективность и надежность их работы. Рекомендации по дальнейшему изучению темы включают проведение более глубоких исследований в области оптической и лазерной гироскопии, а также разработку новых, более точных и эффективных устройств контроля и управления энергетическими системами. Такая работа поможет повысить устойчивость различных энергетических систем и сделать их более экономичными и эффективными.

### **Литература**

1. Laserportal.ru / Применение оптических гироскопов : [сайт]. – 2023. - URL: [https://laserportal.ru/content\\_1013](https://laserportal.ru/content_1013) (дата обращения: 27.04.2023). - Текст : электронный.

2. Соколов, Д.А. Перспективы использования малогабаритных волоконно-оптических гироскопов : электронный - 2013. - С. 154-157. - <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-malogabaritnyh-volokonno-opticheskikh-giroskopov-v-giroinklinometrii/viewer> (дата обращения: 27.04.2023).

УДК 504.5

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УЩЕРБ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ENVIRONMENTAL DAMAGE FROM THE USE OF ELECTRICITY STORAGE IN POWER SYSTEMS

Г.Д. Козин, М.В. Прокопович

Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

ef@bntu.by

G. Kozin, M. Prokopovich

Supervisor – Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** В статье рассматриваются 3 периода экологического ущерба от применения накопителей электроэнергии и предлагаются эффективные способы его снижения.

**Abstract:** The article describes 3 periods of environmental damage from the use of energy storage devices and suggests effective ways to reduce it.

**Ключевые слова:** Ущерб, накопители электроэнергии, электроэнергетика, аккумуляторная батарея

**Keywords:** Damage, energy storage, power industry, storage battery

### Введение

Одной из главных проблем электроэнергетики является сложность в накоплении электроэнергии в больших объемах и хранение ее длительное время. Системы накопления энергии применяются в огромном количестве сфер и отраслей промышленности (от электротранспорта до электроэнергетики). Поэтому в настоящее время сфера накопителей электроэнергии во всем мире развивается существенными темпами. По разным оценкам к концу 2030 года мощность и емкость систем накопления электроэнергии (СНЭ) во всем мире вырастут до 358 ГВт и 1028 ГВт·ч. Вследствие этого проблема утилизации отработавших накопителей энергии также обостряется с каждым годом.

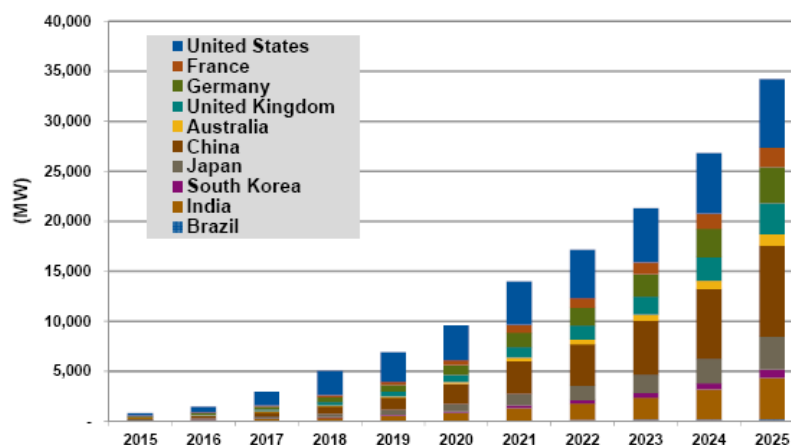


Рисунок 1 - Темпы развития мощности накопителей электроэнергии.

**Основная часть:**

В течение всего жизненного цикла накопители электроэнергии наносят ущерб окружающей среде. Экологический ущерб от накопителей электроэнергии можно разделить на 3 периода:

- ущерб от производства аккумуляторов;
- ущерб в процессе эксплуатации аккумулятора;
- ущерб экологии в конце жизненного цикла АКБ.

**1. Ущерб от производства аккумуляторов.** В первую очередь производство приносит вред непосредственно для работников завода, на которых АКБ производится. В состав литиевых аккумуляторных батарей входит большое число токсичных соединений. К примеру, кобальт, никель, бористый литий. Производство литий-ионных аккумуляторов является наиболее опасным, чем производство аккумуляторов других типов. Также немаловажным фактом является то, что производство аккумуляторных батарей является весьма энергоемким процессом, то есть потребляется большое количество электроэнергии, а ее производство не обходится без выбросов. Каково их количество — зависит от источника энергии.

**2. Ущерб в процессе эксплуатации аккумуляторных батарей** удобно рассматривать на примере электромобилей. В процессе езды электромобиль не выделяет вредных газов, в отличие от ДВС, однако эти газы выделяются на электростанции, которая вырабатывает электроэнергию для зарядки аккумуляторных батарей электромобиля. Учитывая, что наибольшая доля вырабатываемой энергии приходится на электростанции, сжигающие топливо (уголь, газ), то вред экологии можно назвать ощутимым. Даже несмотря на это, электромобиль будет по меньшей мере вдвое экологичнее. Это во многом связано с низким КПД двигателей внутреннего сгорания, который даже не достигает и 50%.

В настоящее время энергетическая отрасль реформируется, увеличивается процент энергии, вырабатываемой за счет возобновляемых источников (солнце, ветер и вода). Следовательно, снижается косвенный вред от эксплуатации аккумуляторов.

**3. Ущерб экологии в конце жизненного цикла АКБ.** Отработанные свинцовые АКБ (а срок эксплуатации основных типов АКБ — до 3-х лет) экологически опасны. Причина заключается в том, что в таких аккумуляторах содержится токсичный свинец, который составляет до 60 % от массы; химически агрессивный кислотный электролит — раствор серной кислоты (10–15 %). Также присутствуют другие тяжелые металлы: сурьма (около 2 %), различные пластмассы в количестве (12–18 %).

Значительную экологическую проблему представляют вопросы утилизации отработанных АКБ. Сложности начинаются уже на этапе сбора таких АКБ, особенно малогабаритных, которые обычно выбрасываются с бытовым мусором и представляют собой источник экологической опасности.

На данный момент технологии переработки свинцово-кислотных аккумуляторов отработаны и в некоторых странах налажена их 100-процентная утилизация. С литий-ионными АКБ ситуация значительно сложнее.

Переработка литиево-ионных аккумуляторов призвана решить две проблемы:

- утилизация изделий, которые не могут быть просто захоронены на обычных полигонах для твердого мусора — литий-ионные аккумуляторы содержат большое количество веществ, которые могут вызвать заражение грунта и воды на большой площади;
- получение материалов, которые могут быть повторно использованы в производственном цикле. Рост спроса на литий-ионные накопители энергии вызвал резкий скачок цен на материалы, прежде всего — на литий, медь, кобальт и т.д.

Однако существует следующая технологическая проблема. Процесс переработки пока не позволяет полноценно выделять литий, который остаётся в составе «побочного продукта». Для получения лития из остаточных сплавов требуется дальнейшее развитие технологий и соответствующие затраты. Однако, по некоторым оценкам, технология извлечения лития из старых аккумуляторов, не будет работать ещё как минимум десять лет. Проблема обостряется также и тем, что удельная стоимость переработки литий-ионных аккумуляторов примерно в три раза выше, чем удельная стоимость получаемых на выходе материалов. То есть технологии переработки пока еще не являются полноценными и требуют инвестиций и исследований.

Одним из наиболее эффективных способов снижения экологического ущерба от использования ЭХНЭ является увеличение их срока жизни. Основная причина снижения срока АКБ – сульфатация.

Сульфатация – это процесс покрытия пластин аккумуляторной батареи сернокислым свинцом.

В АКБ происходит химическая реакция, при разряде батареи на ее пластинах образуется слой кристаллов сульфата свинца, при последующем заряде батареи кристаллы расходятся.

Если при заряде АКБ расходятся не все кристаллы сульфата свинца, то происходит процесс сульфатации пластин, который приводит к снижению остаточной емкости батареи и существенно снижает срок службы АКБ.

Для увеличения срока жизни, применяется фильтрация электролита, то есть его “перемешивание”, в следствие чего кристаллы сульфата свинца не локализируются в одной точке, а распространяются равномерно, повышая емкость батареи.

Также, для увеличения срока реальной службы аккумулятора необходимо обеспечить периодическое его использование. Если этого не происходит по внешним причинам, то необходимо обеспечить тренировку аккумуляторной батареи с определенной периодичностью. Для увеличения срока использования аккумуляторов ИБП достаточно выполнять тренировку один или два раза в полугодие. Такая несложная процедура может обеспечить улучшение параметров работы батареи и увеличить срок ее службы до 2 раз.

### **Заключение**

Таким образом, применение систем накопления электроэнергии сопровождается значительным экологическим ущербом на всех этапах жизни накопителя, от производства и до окончания их срока службы. Системы накопления развиваются активными темпами, однако стоит должным образом относиться к вопросу экологической безопасности, особенно на стадии их утилизации.

### **Литература**

1. Научная электронная библиотека «КиберЛенинка» [Электронный ресурс]/ Накопители электрической энергии как средство повышения надёжности и экономичности функционирования электрической сети. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nakopiteli-elektricheskoy-energii-kak-sredstvo-povysheniya-nadyozhnosti-i-ekonomichnosti-funktsionirovaniya-elektricheskoy-seti>. – Дата доступа: 25.04.2023.
2. Утилизация батарей электромобилей: проблемы и перспективы в мире [Электронный ресурс]/ Утилизация батарей электромобилей: проблемы и перспективы в мире. – Режим доступа: <https://e-cars.tech/zakony-pro-elektromobili/utilizatsiya-batarey-elektromobiley-problemy-i-perspektivy-v-mire/>. – Дата доступа: 25.04.2023.
3. Вред отработанных аккумуляторов для окружающей среды [Электронный ресурс]/ Вред отработанных аккумуляторов для окружающей среды. – Режим доступа: <https://ru.large.net/news/7bu43nd.html> – Дата доступа: 26.04.2023.

УДК 662.7

## БИОТОПЛИВО ИЗ ВОДОРОСЛЕЙ BIOFUELS FROM ALGAE

Падрез А. С.

Научный руководитель – Ю.В. Суходолов, доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
ef@bntu.by

A. Padrez

Supervisor – Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** статья описывает перспективы использования водорослей в качестве источника биотоплива. Рассматриваются водоросли, их выращивание и переработка в топливо. Подчеркиваются экологическую значимость данного вида топлива и его потенциал для сокращения выбросов парниковых газов. Также рассматриваются проблемы, связанные с высокой стоимостью производства и необходимостью дальнейшего исследования и развития технологий производства биотоплива из водорослей.*

***Abstract:** the article describes the prospects of using algae as a source of biofuel. Various algae, their cultivation, and processing into fuel are considered. The ecological significance of this type of fuel and its potential for reducing greenhouse gas emissions are emphasized. The problems associated with the high cost of production and the need for further research and development of technologies for producing biofuels from algae are also discussed.*

***Ключевые слова:** водоросли, производство энергии, экологичность.*

***Keywords:** Algae, energy production, environmental friendliness.*

### Введение

В настоящее время, проблема экологической безопасности и энергетической эффективности становится все более актуальной для многих стран мира. Поэтому, разработка альтернативных источников энергии, таких как биотопливо, становится все более важной задачей для мирового сообщества. В данном докладе мы рассмотрим технологию производства биотоплива из морских водорослей, плюсы и минусы данного вида топлива и ее перспективы на рынке энергетики. Биотопливо из водорослей – это один из вариантов альтернативных источников энергии, который становится все более популярным в свете проблемы исчерпания запасов нефти и газа, а также растущих экологических проблем. Биотопливо из водорослей является экологически чистым и устойчивым источником энергии, который используется для производства тепла и электроэнергии, а также для заправки автомобилей и самолетов. Производство такого топлива было связано с долгим процессом переработки биомассы в нефть.

### Основная часть

До недавнего времени производство биотоплива из водорослей было связано с длительным процессом превращения биомассы в нефть, что существенно

затрудняло его массовое производство. Но благодаря новым технологиям, ученым удалось ускорить процесс превращения водорослей в биотопливо, что открывает новые возможности в использовании этого альтернативного источника энергии. При производстве биотоплива из морских водорослей используются различные технологии. Например, одна из самых популярных технологий – это быстрый пиролиз. В этом процессе биомасса нагревается до высоких температур, что приводит к ее разложению на биотопливо. Однако, у этого метода есть определенные недостатки, такие как высокая стоимость и необходимость больших объемов биомассы для производства биотоплива.

По мнению экспертов, новый процесс производства биотоплива из водорослей является значительным прорывом в данной области. Ученым удалось превратить 65% водорослевой массы в топливо аналогичное нефти всего за одну минуту. Это стало возможным благодаря новому процессу, который не требует периода в миллион лет для превращения натурального сырья в нефть. Пока остается неясным, почему более короткий по времени нагрев оказался столь эффективным. По версии ученых реакции, производящие искусственную нефть, протекают очень быстро, а медленный нагрев просто замедляет процесс преобразования побочными реакциями. Следуя этой теории, изменение затрачиваемого времени на протекание реакции позволит в дальнейшем значительно повысить скорость производства из водорослей нефтеподобного продукта, но и уменьшит размеры реакторов, что в свою очередь снизит стоимости сооружения заводов по производству биотоплива из водорослей.

Ранее производство биотоплива из водорослей было связано с длительным процессом нагрева биомассы от 10 до 90 минут до 300 градусов Цельсия, в результате чего и происходило превращение. Но новый процесс заключается в том, что масса мокрых водорослей помещается в песок, разогретый до 600 градусов Цельсия, всего за одну минуту 65% объема водорослей превращается в биотопливо.

Биотопливо из водорослей имеет несколько преимуществ перед традиционными источниками энергии, такими как нефть и газ. Во-первых, производство биотоплива из водорослей является экологически чистым и устойчивым источником энергии. Производство биотоплива из водорослей не загрязняет окружающую среду и не вредит здоровью людей. Во-вторых, биотопливо из водорослей является более доступным и дешевым источником энергии, чем традиционные источники, такие как нефть и газ. Биотопливо из водорослей может быть произведено на месте, что снижает затраты на транспортировку и хранение. В-третьих, биотопливо из водорослей является более универсальным источником энергии, чем традиционные источники. Оно может быть использовано для производства тепла и электроэнергии, а также для заправки автомобилей и самолетов.

Однако, несмотря на перспективы использования биотоплива из морских водорослей, есть и некоторые проблемы, которые могут затруднить его производство и использование. Во-первых, производство биотоплива из водорослей требует больших затрат на инфраструктуру и технологии. Строительство заводов по производству биотоплива из водорослей может быть очень дорогостоя-



щим и требует значительных инвестиций. Во-вторых, производство биотоплива из водорослей может конкурировать с другими видами использования водных ресурсов, таких как рыболовство и аквакультура. Это может привести к конфликтам между различными отраслями экономики и между общественностью и промышленными компаниями. В-третьих, биотопливо из водорослей может иметь низкую энергетическую плотность по сравнению с традиционными источниками энергии, что может снизить его эффективность в некоторых приложениях. Также, использование биотоплива из водорослей может столкнуться с проблемой недостаточности сырья. Для производства больших объемов биотоплива необходимо иметь большое количество водорослей, что может привести к экологическим проблемам. Однако, при правильной организации производства и использования водорослей, эту проблему можно решить.

Так, где же используют данное топливо и используют ли его вообще. В США был проведен экспериментальный рейс эсминца, который использовал биотопливо в качестве горючего. Эскадренный миноносец класса Spruance был управляем дистанционно и плавал вдоль берега США на смеси, содержащей обычное горючее и масло, полученное из водорослей. Этот эксперимент является частью перехода ВМС США на доктрину "Великого зеленого флота", согласно которой до 2026 года планируется использовать только альтернативное топливо, а к началу следующего десятилетия - удовлетворять 50% потребности флота в энергии за счет альтернативных источников. Концерн EADS также работает над разработкой топлива будущего, в том числе из водорослей, и показал на авиасалоне в Берлине биореактор для выращивания водорослей.

### **Заключение**

В заключение, можно сказать, что использование биотоплива из морских водорослей является одним из наиболее перспективных направлений в области альтернативной энергетики. Новые технологии производства биотоплива из водорослей позволят получать нефтеподобный продукт всего за несколько минут, что существенно ускорит процесс производства. Однако, необходимо учитывать и некоторые проблемы, такие как высокая стоимость производства и недостаточность сырья, которые могут затруднить развитие этой отрасли.

### **Литература**

1. Пономарев, А. А. Топливо-энергетические ресурсы / А. А. Пономарев. – СПб. : УИТМО. – 2022. – 101 стр.
2. Панова, Т. М. Технология биотоплива / Т. М. Панова. – Екб. : Урал. ун-та, 2016. – 136 с.

УДК 621.311

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ**  
**DETERMINATION OF POWER SUPPLY RELIABILITY INDICATORS BASED ON THE FAILURE TREE**

В.С. Вадейко, В.Н. Коршун

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

V. Vadeyko, V. Korshun

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** бесперебойное электроснабжение электроэнергией требуемого нормативного качества – основная функция надёжности энергосистемы. В данной работе будет рассмотрен один из методов расчёта показателей надёжности, а именно, дерево отказов. Ручной расчёт дополняется полученными результатами в программе “REISS”. Практическая значимость работы заключается в наглядном примере анализа взаимосвязи отказов событий, составлении алгоритма, который позволяет определить вероятность отказа, под которым в данном случае понимается прекращения электроснабжения от ветровой электрической станции.*

***Abstract:** uninterrupted power supply with electricity of the required regulatory quality is the main function of the reliability of the power system. In this paper, we will consider one of the methods for calculating reliability indicators, namely, the failure tree. The manual calculation is supplemented by the results obtained in the REIS program. The practical significance of the work lies in a clear example of the analysis of the relationship of failures of events, the compilation of an algorithm that allows you to determine the probability of failure, which in this case is understood as the termination of power supply from a wind power station.*

***Ключевые слова:** надёжность, дерево отказов, ветрогенератор, система, электроснабжение.*

***Keywords:** reliability, failure tree, wind generator, system, power supply*

### **Введение**

Ветровая электрическая станция представляет собой несколько ветровых генераторов, соединённых в единую цепь. Целью создание ветровых электрических станций является преобразование энергии ветра в электрическую. Надёжность системы электроснабжения определяется надёжностью электроустановок, из которых и состоит сама система. В данной работе составляющими системы являются: трансформатор, выключатель, сборные шины, разъединители, кабельные и воздушные линии, ветрогенераторы.

### **Основная часть**

Расчет показателей надежности осуществим для следующей схемы ветровой электрической станции:

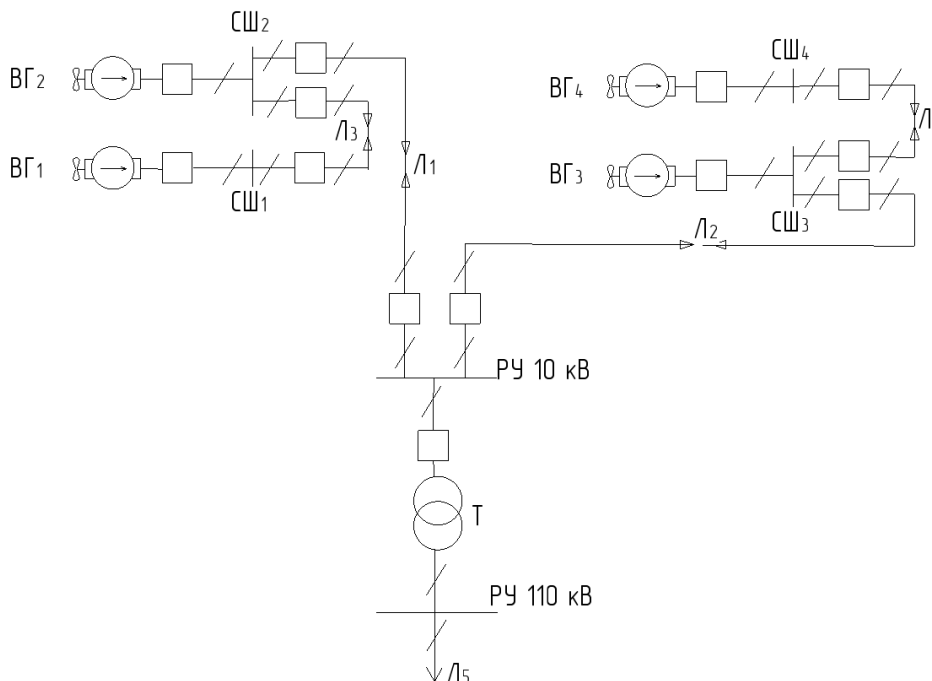


Рисунок 1 - Схема ветровой электрической станции.

Метод расчёта показателей надёжности на основе построения дерева отказов строится на анализе событий, которые могут привести к отказу системы, позволяет легко воспроизводить алгоритмы.

При исследовании метода расчёта показателей надёжности воспользуемся следующими параметрами элементов, входящих в ветровую электрическую станцию (таблица 1).

Таблица 1 - Параметры надёжности элементов схемы

Элемент	Частота отказа, 1/год	Время восстановления, ч	Частота планового ремонта, 1/год	Длительность планового ремонта, ч
Трансформатор	0,03	30	0,4	22
Выключатель	0,005	5	0,2	6
Сборная шина (1,4) 10 кВ	0,002	12	0,32	10
Сборная шина (2,3) 10 кВ	0,003	5	0,48	15
Сборная шина 110 кВ	0,002	5	0,30	12
Разъединитель 10 кВ	0,01	7	0,166	4
Разъединитель 110 кВ	0,01	6	0,166	8
Кабельные линии	0,1	25	0,5	3
Ветрогенератор	0,370	53	0,25	50
Воздушная линия	0,24	8	0,45	8

Процесс построения дерева отказов осуществляется от единственного события в корне дерева (конечного события) к исходному событию и составляется до тех пор, пока на всех уровнях дерева не останутся одни элементарные события, обозначенные окружностью. На рисунке 2 изображено дерево отказов для рассматриваемой системы.

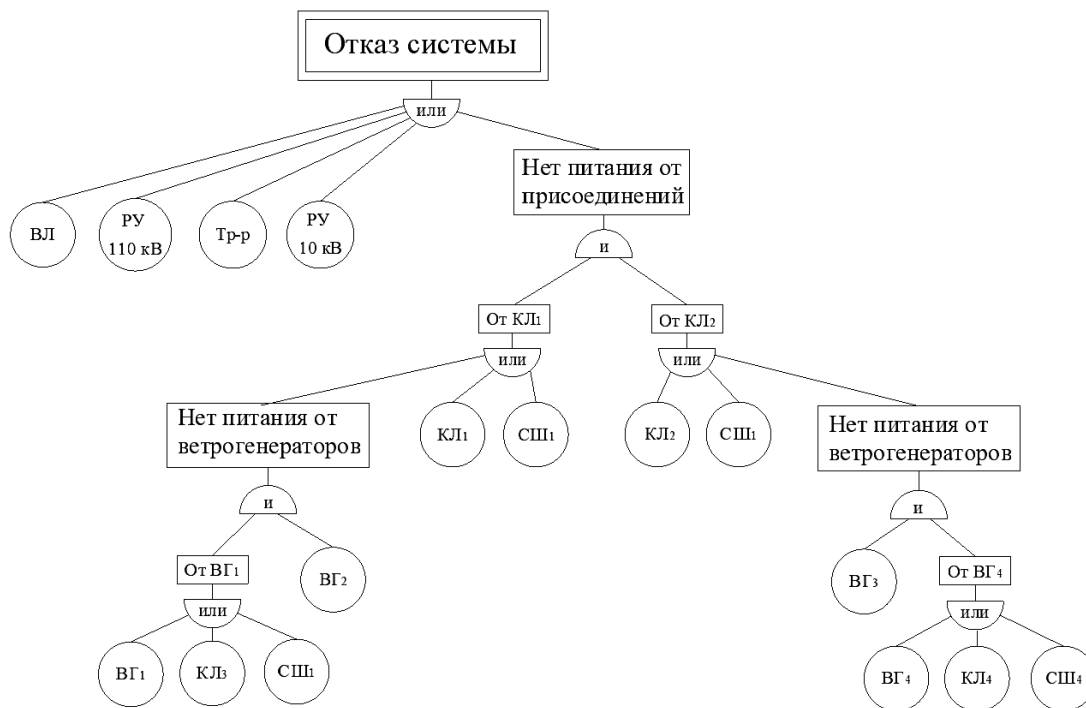


Рисунок 2 - Дерево отказов

Обозначим события отказа воздушной линии 110 кВ, РУ 110 кВ, трансформатора Т и РУ 10 кВ латинскими буквами  $O, P, R, S$  соответственно. Событие отсутствия питания от присоединений РУ 10 кВ обозначим  $T$ , события отсутствия питания от кабельных линий  $КЛ_1$  и  $КЛ_2$ , ветрогенераторов  $ВГ_1$  и  $ВГ_4$  – соответственно  $U, V, Y, Z$ . События отсутствия питания от ветрогенераторов, приводящие к потере электроснабжения по линиям  $КЛ_1$  и  $КЛ_2$ , обозначим  $W$  и  $X$ .

Элементарные события отказов элементов также обозначим следующим образом:  $ВГ_1 - a, КЛ_3 - g, СШ_1 - k, ВГ_2 - b, КЛ_1 - e, СШ_2 - l, КЛ_2 - f, СШ_3 - m, ВГ_3 - c, ВГ_4 - d, КЛ_4 - h, СШ_4 - n$ .

Логическая функция отказа системы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_c &= O + P + R + S + T = O + P + R + S + U \cdot V = O + P + R + S + (W + e + l) \cdot (X + f + m) = \\ &= O + P + R + S + (Y \cdot b + e \cdot l) \cdot (Z \cdot c + f + m) = O + P + R + S + ((a + g + k) \cdot b + e + l) \cdot ((d + \\ &+ h + n) \cdot c + f + m) = O + P + R + S + ((a \cdot b + g \cdot b + k \cdot b + e + l) \cdot ((d \cdot c + h \cdot c + n \cdot c + f + m) = \\ &= O + P + R + S + a \cdot b \cdot d \cdot c + a \cdot b \cdot h \cdot c + a \cdot b \cdot n \cdot c + a \cdot b \cdot f + a \cdot b \cdot m + g \cdot b \cdot d \cdot c + g \cdot b \cdot h \cdot c + \\ &+ g \cdot b \cdot n \cdot c + g \cdot b \cdot f + g \cdot b \cdot m + k \cdot b \cdot d \cdot c + k \cdot b \cdot h \cdot c + k \cdot b \cdot n \cdot c + k \cdot b \cdot f + k \cdot b \cdot m + e \cdot d \cdot c + \\ &+ e \cdot h \cdot c + e \cdot n \cdot c + e \cdot f + e \cdot m + l \cdot d \cdot c + l \cdot h \cdot c + l \cdot n \cdot c + l \cdot f + l \cdot m. \end{aligned}$$

Логическая функция при минимальных сечениях:

$$\bar{Y}_{c.min} = O + P + R + S + a \cdot b \cdot d \cdot c + a \cdot b \cdot h \cdot c + a \cdot b \cdot n \cdot c + a \cdot b \cdot f + a \cdot b \cdot m + g \cdot b \cdot d \cdot c + g \cdot b \cdot h \cdot c + g \cdot b \cdot n \cdot c + g \cdot b \cdot f + g \cdot b \cdot m + k \cdot b \cdot d \cdot c + k \cdot b \cdot h \cdot c + k \cdot b \cdot n \cdot c + k \cdot b \cdot f + k \cdot b \cdot m + e \cdot d \cdot c + e \cdot h \cdot c + e \cdot n \cdot c + e \cdot f + e \cdot m + l \cdot d \cdot c + l \cdot h \cdot c + l \cdot n \cdot c + l \cdot f + l \cdot m.$$

Поскольку конкретные повреждения, приводящие к отказу элементов системы, при построении дерева отказов не учитывались, а были учтены лишь сами отказы элементов и их логическая взаимосвязь, то с помощью логической функции можно определить лишь вероятность неработоспособности системы. Для этого вместо событий отказа подставим в логическую функцию вероятности наступления этих событий.

Пусть закон распределения случайных величин вероятностей экспоненциальный. Тогда вероятности отказа для каждого элемента определим по формуле:

$$Q = 1 - e^{-\lambda t} \tag{1}$$

Подставив значения вероятности наступления событий отказа в логическую функцию, получим вероятность отказа системы:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{c.min} = & 0,213 + 0,003 + 0,03 + 0,002 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + \\ & + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,002 \cdot 0,309 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,095 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,003 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,309 \times \\ & \times 0,309 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,002 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,095 + 0,095 \times \\ & \times 0,309 \cdot 0,003 + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,095 + \\ & + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,003 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,002 \cdot 0,309 + 0,095 \times \\ & \times 0,095 + 0,095 \cdot 0,003 + 0,003 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,003 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,003 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + \\ & + 0,003 \cdot 0,095 + 0,003 \cdot 0,003 = 0,298 \end{aligned}$$

Найдём вероятность безотказной работы через вероятность отказа системы:

$$P_c = 1 - Q_c = 1 - 0,298 = 0,702.$$

Вероятность безотказной работы системы, как показатель надежности, характеризует изменение надёжности во времени, даёт возможность наглядно судить о надёжности системы до первого отказа.

Для того, чтобы случайные явления выступали как необходимые, система должна быть избыточной, т.е. должна учитывать дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. В рассмотренном примере, система не является избыточной, поскольку при ручном расчёте надежности системы с помощью дерева отказов достаточно трудно учесть все элементы схемы и возможные события.

Для расчета суммарной частоты события отказа, средней продолжительности отключения и коэффициента неготовности одной или нескольких сборных шин можно воспользоваться программой “REISS”, алгоритм расчета которой

основан на построении дерева отказов. Данная программа позволяет проводить анализ структурной надежности схем электроснабжения, включающих в себя источники рабочего, резервного и аварийного электроснабжения, передающие элементы, коммутационные аппараты и отдельных потребителей.

Работа с использованием программы REISS начинается с ввода исходных данных рассчитываемой системы. Далее все элементы схемы обозначаются буквенно-цифровыми кодами, содержащими в себе информацию о типе элемента и его порядковом номере, присвоенном при нумерации узлов и ветвей. После этого составляется матрица связей узлов и ветвей схемы. Последним этапом подготовки исходных данных является ввод значений показателей надежности оборудования, из которого состоит рассматриваемая схема.

Расчет частоты и длительности погашений потребителя осуществляется по формулам:

$$\Lambda = \sum_k \lambda(k); \tag{2}$$

$$T = \frac{1}{\Lambda} \cdot \sum_k T(k) \cdot \lambda(k), \tag{3}$$

где  $\lambda(k)$  и  $T(k)$  – частоты и длительности аварий  $k$ -го вида, приводящих к расчетному погашению. Они определяются следующим образом:

$$\lambda(k) = q(k, j) \cdot \lambda(k, m) \cdot \prod_s Q(k, s); \tag{4}$$

$$T(k) = q(k, j) \cdot \lambda(k, m) \cdot \min \left( \frac{t(k, j)}{2}; t(k, m); t_{o.n.} \right) \cdot \prod_s Q(k, s), \tag{5}$$

где  $q(k, j)$  – относительная длительность ремонтного простоя  $j$ -го элемента,  $\lambda(k, m)$  – частота повреждения  $m$ -го элемента,  $t(k, j)$  – длительности послеаварийного восстановления  $j$ -го и  $m$ -го элемента,  $t(k, m)$  – время оперативных переключений,  $Q(k, s)$  – вероятность отказа в срабатывании  $s$ -го устройства релейной защиты (РЗ), коммутационного аппарата или автоматического ввода резерва.

Коэффициент неготовности:

$$K_n = \frac{T \cdot \Lambda}{8760} \tag{6}$$

Результаты расчета показателей надежности с использованием программы “REISS” для РУ 10 кВ представлены в таблице 2.

$$\Lambda = 0,1318 \frac{1}{год}, T = 20,22 \text{ ч}, K = 0.0003042 \text{ о.е.}$$

Таблица 2 - Результаты расчета программы

Событие (состояние)	Элемент схемы	Частота события, 1/год	Длительность перерыва, ч
Повреждение	КЛ <sub>1</sub>	0,1	25
Повреждение	Выключатель в КЛ <sub>2</sub>	0,005	5
Повреждение	Выключатель в цепи Т	0,005	5
Повреждение	Выключатель в КЛ <sub>1</sub>	0,005	5
Повреждение	Выключатель в КЛ <sub>1</sub>	0,005	5
Повреждение	Выключатель в КЛ <sub>3</sub>	0,005	5
Повреждение	РУ 10 кВ	0,003	5
Повреждение	СШ <sub>2</sub>	0,003	5
Ремонтный простой	ВГ <sub>2</sub>	0,000366	25
Повреждение	КЛ <sub>3</sub>		
Ремонтный простой	КЛ <sub>3</sub>	0,0001689	3,333
Повреждение	ВГ <sub>2</sub>		
Повреждение	КЛ <sub>2</sub>	0,0001	0
Отказ в срабатывании РЗ	В цепи КЛ <sub>2</sub>		
Повреждение	КЛ <sub>3</sub>	0,0001	0
Отказ в срабатывании РЗ	В цепи КЛ <sub>3</sub>		

### Заключение

Таким образом, для определения показателей надежности системы можно использовать метод с использованием дерева отказов. Данный метод позволяет наглядно изобразить взаимосвязи событий отказов элементов, приводящих к отказам подсистем и системы в целом. При более подробном рассмотрении событий повреждений и учете отказов в срабатывании коммутационной аппаратуры, как это сделано в программе, можно с помощью ручного расчета определить все необходимые показатели надежности системы.

### Литература

1. Цыганков В.М. Надежность электрических систем и сетей. Конспект лекций. – Минск : БГПА, 2001. – 152 с.
2. Анищенко В.И., Колосова И.В. Основы надежности систем электропитания: учебное пособие/ В.А. Анищенко, И.В. Колосова. – Минск : БНТУ, 2007. – 151 с.
3. Гук Ю.Б., Кобжув В.М., Черновец А.К. Устройство, проектирование и эксплуатация схем электроснабжения собственных нужд АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 296 с.

УДК 519.217.2

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАФОВ В НАДЕЖНОСТИ И ПРИМЕРЫ  
РАСЧЕТА****APPLICATION OF THE GRAPH METHOD IN RELIABILITY AND  
CALCULATION EXAMPLES**

А.И. Васильева

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

A. Vasileva

Supervisor – A.L. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье рассматривается применение метода графов в решении задач теории надежности, объясняется принцип построения графов состояний.*

***Abstract:** the article discusses the application of the graph method in solving reliability theory problems, explains the principle of constructing state graphs.*

***Ключевые слова:** теория надежности, метод графов, граф состояния.*

***Keywords:** reliability theory, graph method, state graph.*

**Введение**

Теория надежности изучает закономерности возникновения отказов систем, нормированные критерии и количественные характеристики надежности, методы анализа сложных систем по критериям надежности, методы повышения надежности и методы испытаний на надежность, методы эксплуатации систем с учетом надежности, методы сбора и анализа статистических данных об отказах систем.[1]

**Задача расчета надежности** - определение показателей безотказности системы по данным о надежности элементов и связях между ними.[2] Математический аппарат теории надежности основан на теории вероятностей и математической статистики, в том числе используется теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическая логика, теория графов, теория оптимизации, теория экспертных оценок, теория больших систем.[3]

**Основная часть**

Остановимся на применении теории графов. Целесообразно выделить типовые структуры графа состояний, приведенные в табл. 1. Номера состояний обозначены кодом, в котором число знаков равно числу элементов, место знака соответствует номеру элемента, 1 обозначает работоспособное состояние, 0 обозначает неработоспособное состояние элемента. При равнонадежных элементах соответствующие графы состояний становятся проще. [4]

Алгоритм перехода от логической схемы расчета надежности к графу состояний:



1. В логической схеме расчета надежности выделяют соединения последовательно-параллельные (нагруженные) и параллельные ненагруженные, объединив элементы в соответствующие подсистемы.

2. Строят граф состояний последовательно-параллельной подсистемы, начиная с состояния, соответствующего работоспособности всех элементов.

Таблица 1 (заштрихованы неработоспособные состояния)

Тип соединения на схеме расчета надежности	Графы состояний системы	
	При элементах различной надежности	При равнонадежных элементах

Каждое следующее состояние получается из предыдущего путем применения следующих правил: [4]

- все неработоспособные для данной подсистемы состояния являются конечными (из них нет возврата, т.к. система не восстанавливается);
- все работоспособные для данной подсистемы состояния являются промежуточными;
- каждому промежуточному *i*-му состоянию соответствует ряд следующих состояний, различающихся неработоспособностью одного из элементов, бывших работоспособными при *i*-м состоянии системы;
- новые состояния добавляются до «упора» в конечное;
- одинаковые состояния (т. е. совпадающие по состояниям элементов) объединяются.

3. По данным правилам строят графы состояний отдельно для нагруженных (работающих) подсистем и подсистем, находящихся в ненагруженном резерве.

4. Конечные состояния графа состояний нагруженной (работающей) подсистемы являются начальными вершинами графа состояний для подсистемы, находящейся в ненагруженном резерве. К каждой из этих вершин необходимо подсоединить граф состояний ненагруженного резерва.

Рассмотрим пример построения графа (рисунок 1). [4]

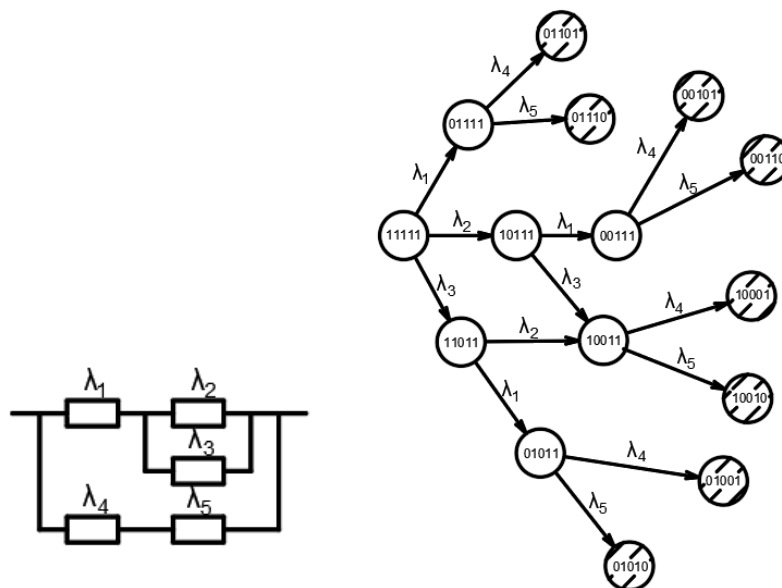


Рисунок 1—Логическая схема расчета надежности и соответствующей ей граф состояний

Под надежностью технологических систем по параметрам производительности понимается их свойство обеспечивать и сохранять ритм выпуска продукции. Для моделирования такой системы используется граф Эрланга (рисунок 2).[5]

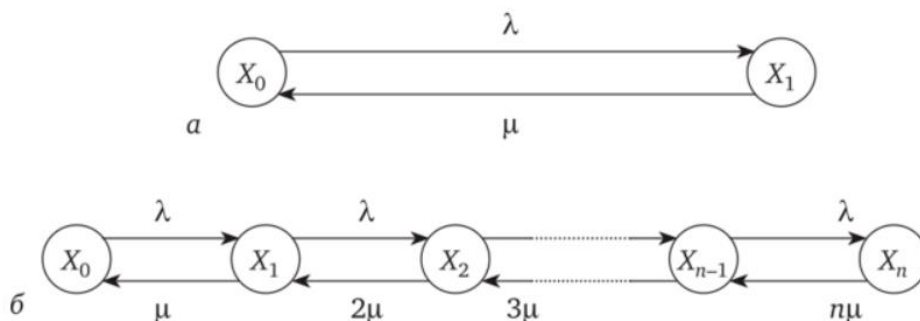


Рисунок 2— Графы состояний одноканальной (а) и многоканальной (б) систем с отказами

По этому графу составляется система дифференциальных уравнений для вероятностей нахождения системы в одном из состояний, определяемых графом и интенсивностями переходов между состояниями:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda + k\mu)P_k(t) + \lambda P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + (k+1)\mu P_{k+1}(t) \\ \frac{dP_n(t)}{dt} = -n\mu P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) \end{cases} \quad (1)$$

Где  $\lambda$  — интенсивность потока отказа элементов,  
 $\mu$  — интенсивность потока восстановления,  
 $P$  — интенсивность потока обслуживания (величина, обратная среднему времени выполнения одной заявки).

Система уравнений (1) дополняется условием

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1 \quad (2)$$

В стационарном состоянии  $\frac{dP_k(t)}{dt} = 0$ , и система (1) становится системой алгебраических уравнений, что позволяет рассчитать вероятности  $P_k$ , среднее число требований в системе и в очереди, среднее число незанятых единиц обслуживания, среднее время ожидания в очереди. [5]

Для многих систем граф состояний переходов может иметь следующий вид (рисунок 3):

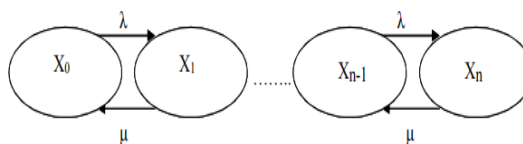


Рисунок 3– Графы состояний систем с отказами

Если все элементы системы имеют одинаковые показатели интенсивностей отказов и восстановлений, то во многих случаях система описывается процессом гибели и размножения. Из любого состояния (кроме крайних) возможен переход только в два соседних с ним состояния: предыдущее и последующее. Такие процессы принято называть «процессами гибели и размножения». [4]

Рассмотрим решение в общем случае для простого процесса: [6]

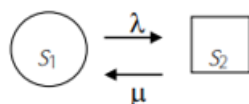


Рисунок 4– Пример схемы для общего случая

$S_1$ -исправен и работает,

$S_2$ -не исправен.

Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} p_1' = \mu p_2 - \lambda p_1 \\ p_2' = \lambda p_1 - \mu p_2 \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases} .$$

И при начальных данных вида  $(p_1(0), p_2(0)) = (1,0)$  решение будет:

$$\begin{aligned} p_1(t) &= \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \frac{\lambda}{\mu+\lambda} e^{-(\mu+\lambda)t} = K_p(t); \\ p_2(t) &= \frac{\lambda}{\mu+\lambda} - \frac{\lambda}{\mu+\lambda} e^{-(\mu+\lambda)t} = K_{от}(t). \end{aligned}$$

При этом  $K_p = \lim_{t \rightarrow \infty} K_p(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda}; K_{от} = \frac{\lambda}{\mu+\lambda}.$

Пример. На прибор в состоянии  $S1$  действует поток отказов с интенсивностью  $\lambda = 1 \frac{\text{отказ}}{\text{сутки}}$ . На прибор в состоянии  $S2$  действует поток восстановлений с интенсивностью  $\mu = 3 \frac{\text{восст.}}{\text{сутки}}$ . Составить граф состояний и решить.

Решение.

Граф будет выглядеть как на рис.4. По формулам (1) и (2):

$$\begin{cases} p_1' = 3p_2 - p_1 \\ p_2' = p_1 - 3p_2 \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} p_1' = 3p_2 - p_1 \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases} .$$

И начальные данные  $(p_1(0), p_2(0)) = (1,0)$ .

Из второго уравнения  $p_2 = 1 - p_1$ . Подставляем это значение в первое уравнение системы:

$p_1' + 4p_1 = 3$  —линейное уравнение.

$p_1 = C_1 \cdot e^{-4t} + \frac{3}{4}$  —общее решение уравнения.

$p_1(0) = 1 \rightarrow p_1(t) = \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cdot e^{-4t}$  — частное решение уравнения.

Тогда  $p_2 = 1 - p_1 = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cdot e^{-4t}.$

Решение системы:

$$\begin{cases} p_1(t) = \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cdot e^{-4t} \\ p_2 = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cdot e^{-4t} \end{cases} .$$

При этом

$K_p = \lim_{t \rightarrow \infty} p_1(t) = \frac{3}{4}; K_{от} = \lim_{t \rightarrow \infty} p_2(t) = \frac{1}{4}$  —финальные вероятности.

### Заключение

Преимущества заключаются в простоте алгоритмов, возможности простого восприятия построенных графов. Недостаток— затрудняется расчет сложных систем.

### Литература

1. Методы расчета надежности [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [kvs-mekhanoshin.narod.ru/tem4.html](http://kvs-mekhanoshin.narod.ru/tem4.html). - Дата доступа : 09.04.2023.
2. Порядок решения задач на надежность [Электронный ресурс] / studfile - Режим доступа : <https://studfile.net/preview/9685834/page:9/>. - Дата доступа : 09.04.2023.
3. Надежность электроустановок и энергетических систем : учеб.- метод. пособие / В. Н. Галушко, С. Г. Додолев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2014. – 154 с.
4. Опорный конспект [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://www.gnedenko.net/library/Dzirkal/dzirkal\\_book2.pdf](https://www.gnedenko.net/library/Dzirkal/dzirkal_book2.pdf). - Дата доступа : 09.04.2023.
5. Метод графов в теории надежности [Электронный ресурс] / Студми. Учебные материалы для студентов.- Режим доступа : [https://studme.org/387643/turizm/metod\\_grafov\\_teorii\\_nadezhnosti](https://studme.org/387643/turizm/metod_grafov_teorii_nadezhnosti). - Дата доступа : 09.04.2023.
6. Элементы математической теории надежности: конспект лекций / А. Н. Рудый. – Минск: БНТУ, 2014. – 131 с.

УДК 621.192

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ  
БЕЗОТКАЗНОСТИ ЛЭП  
MODERN APPROACHES TO INVESTIGATION  
OF RELIABILITY OF PTL**

Е.В. Радюк, И.В. Ковалец

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

E. Radziuk, I. Kovalets

Supervisor – A.L. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** События отказа ЛЭП могут привести к серьезным последствиям, поэтому исследование и обеспечение безотказности этих систем являются важной задачей. Для исследования безотказности ЛЭП используются автоматические системы мониторинга и диагностики, которые обеспечивают оперативный контроль и ремонт, а также использование нейросетей для прогнозирования возможных аварийных ситуаций и генетических алгоритмов для оптимальной работы и проектирования ЛЭП. За счет использования современных подходов можно обеспечить более точный анализ и эффективные решения для предотвращения отказов и обеспечения безотказности ЛЭП.*

***Abstract:** Power line failure events can lead to serious consequences, so investigating and ensuring the reliability of these systems is an important task. Automatic monitoring and diagnostic systems are used to investigate the reliability of power lines, which provide on-line monitoring and repair, as well as the use of neural networks for predicting possible failure situations and genetic algorithms for optimal operation and design of power lines. By using modern approaches, it is possible to provide more accurate analysis and effective solutions to prevent failures and ensure the failure-free operation of transmission lines.*

***Ключевые слова:** ЛЭП, безотказность, надежность, аварийные ситуации, диагностика.*

***Keywords:** power transmission lines, fail-safety, reliability, emergencies, diagnostics.*

### **Введение**

Линии электропередач (ЛЭП) являются одними из основных элементов энергетической инфраструктуры, их функционирование играет ключевую роль в обеспечении надежной и безопасной работы энергосистем.

Однако, даже небольшие отказы в работе ЛЭП могут иметь серьезные последствия, такие как потери электрической мощности, повреждения оборудования и, в некоторых случаях, аварии, которые могут привести к материальным убыткам и потере человеческих жизней. В связи с этим, исследование и обеспечение безотказности ЛЭП становится все более актуальным.

В данном контексте современные подходы для исследования безотказности ЛЭП играют важную роль. Они включают в себя применение новейших методов математического моделирования, компьютерных технологий, систем мониторинга и диагностики. Данные методы позволяют не только определить вероятность отказа тех или иных элементов ЛЭП, но также и разработать эффективные стратегии по их предотвращению.

В данной работе будет рассмотрено несколько современных подходов к исследованию безотказности ЛЭП, их принципы, преимущества и недостатки.

### **Основная часть**

Современные подходы к исследованию безотказности ЛЭП включают в себя использование компьютерного моделирования, методов математической статистики, различных методов испытаний, а также мониторинга и анализа данных по техническому состоянию оборудования.

Компьютерное моделирование позволяет проводить технические расчеты и предсказывать вероятность возникновения аварийных ситуаций на ЛЭП. Математическая статистика используется для анализа полученных данных и определения уровня безотказности системы в целом.

Для проверки работоспособности ЛЭП используются различные методы испытаний, такие как испытания на прочность, тепловые испытания, электроизоляционные испытания, испытания на промерзание и др. Кроме того, проводится мониторинг технического состояния оборудования, который позволяет своевременно выявлять неисправности и принимать меры по их устранению.

Важным элементом современных подходов к исследованию безотказности ЛЭП является анализ данных по аварийным ситуациям и отказам оборудования. Этот анализ позволяет выявлять наиболее часто встречающиеся причины аварий и разрабатывать меры по их устранению.

Анализ данных по аварийным ситуациям и отказам оборудования является важным элементом исследования безотказности ЛЭП. Этот анализ позволяет выявить наиболее вероятные и часто встречающиеся причины отказов оборудования и аварийных ситуаций, а также установить меры по их предотвращению и минимизации возможных последствий.

Для анализа данных используются различные методы, такие как анализ статистических данных, сравнение с аналогичными системами, экспертные оценки и др. Важно учитывать не только факты аварий и отказов, но и данные о плановом техническом обслуживании, причинах поломок и инцидентов, параметрах работы оборудования до нарушений.

После анализа данных по аварийным ситуациям и отказам оборудования, определяются причины аварий и отказов, составляется рейтинг наиболее вероятных и часто встречающихся причин, и разрабатываются мероприятия по предотвращению возможных нарушений в работе ЛЭП.

Важно отметить, что анализ данных по аварийным ситуациям и отказам оборудования является постоянным процессом, который должен проводиться регулярно, чтобы заранее выявлять возможные проблемы в работе ЛЭП и принимать меры по их устранению.

Допустим, анализ данных по аварийным ситуациям и отказам оборудования ЛЭП показал, что наиболее частой причиной аварий и поломок является выход из строя разъединительных выключателей. Причинами могут быть низкое качество оборудования, ошибки при монтаже или нарушения режима эксплуатации.

В результате анализа данных по авариям и отказам разработчики ЛЭП могут принять следующие меры для предотвращения таких ситуаций:

- обновление оборудования и повышение его качества;
- введение дополнительных мер контроля за монтажными работами;
- увеличение частоты технического обслуживания;
- автоматизация процессов управления оборудованием;
- обучение персонала правильной эксплуатации оборудования и взаимодействия с ним;
- мониторинг работоспособности оборудования и быстрое реагирование на возможные нарушения.

В итоге, благодаря анализу данных по аварийным ситуациям и отказам оборудования, можно установить причины нарушений в работе ЛЭП и принять меры для предотвращения их возникновения в будущем.

Один из современных методов расчета безотказности ЛЭП основан на использовании систем динамического анализа событий (Event Driven Dynamic Simulation). Он позволяет моделировать динамику работы системы на основе ее компонентов и процессов, учитывая при этом возможные взаимодействия между компонентами и внешними воздействиями.

Для примера, рассмотрим процесс моделирования динамики работы силовой электрической сети (СЭС). Для начала необходимо создать математическую модель СЭС с учетом всех компонентов, включая генераторы, трансформаторы, выключатели, провода и другие элементы.

Затем на основе этой модели проводятся динамические анализы, используя данные о нагрузке на сеть, условиях работы компонентов и возможных внешних воздействиях (например, гроза или сильный ветер). Результатом такого анализа являются прогнозы вероятности нарушений в работе сети и ожидаемые временные задержки восстановления питания после возможной аварии.

Допустим, мы хотим определить безотказность ЛЭП, состоящей из 10 трансформаторов и 40 км проводов. Для этого используем современный метод моделирования событий.

Для начала мы создадим математическую модель на основе сведений о параметрах компонентов ЛЭП, например, мощность генераторов, напряжение трансформаторов, длина проводов, сопротивление и другие факторы. Затем мы проведем анализ, симулирующий динамическую работу всей сети на основе имеющейся модели.

Для примера, предположим, что при анализе были учтены возможности отказа каждого из компонентов ЛЭП (трансформаторы, выключатели и провода) и воздействия внешних факторов (грозы, ураганы и т.д.).

Результатами анализа стали следующие данные:



- вероятность отказа одного трансформатора за сутки составляет 0,002 ;
- вероятность отказа одного выключателя за сутки составляет 0,005 ;
- вероятность отказа одного километра провода за сутки составляет 0,001 .

Для расчета вероятности отказа всей ЛЭП за сутки необходимо учесть, что отказ может произойти в любом из компонентов сети. Таким образом, используем формулу полной вероятности:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{отказ ЛЭП за сутки}} &= P_{\text{отказ трансформатора}} \cdot P_{\text{остальные компоненты работают}} + \\
 &+ P_{\text{работают все трансформаторы}} \cdot P_{\text{отказ выключателя}} \cdot P_{\text{остальные компоненты работают}} + \\
 &+ P_{\text{работают все трансформаторы и выключатели}} \cdot P_{\text{отказ 1 км провода}} \cdot P_{\text{остальные компоненты работают}} ,
 \end{aligned}$$

где  $P_{\text{остальные компоненты работают}}$  – вероятность того, что все остальные компоненты ЛЭП работают исправно.

Подставляя значения:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{отказ ЛЭП за сутки}} &= 0,002 \cdot (1 - 0,005)^{10} + (1 - 0,002) \cdot 0,005 \cdot (1 - 0,001)^{40} + \\
 &+ (1 - 0,002) \cdot (1 - 0,005) \cdot 0,001^{40} \approx 0,002382.
 \end{aligned}$$

Таким образом, вероятность отказа всей ЛЭП за сутки составляет примерно 0,24%, а безотказность ЛЭП составляет 99,76% за сутки. Данные расчеты могут помочь инженерам определить наиболее вероятные источники отказов и разработать планы по устранению проблем и повышению безопасности работы ЛЭП.

Для повышения безотказности сети можно предпринимать меры, направленные на улучшение компонентов ЛЭП, а также на проведение регулярного технического обслуживания и мониторинга состояния сети.

Можно сделать вывод, что используя метод моделирования событий, мы можем оценить безотказность ЛЭП при различных условиях и разработать меры по ее улучшению.

С использованием современного программного обеспечения и вычислительных методов, моделирование динамики работы ЛЭП может проводиться с высокой точностью, учитывая разнообразные варианты эксплуатации и возможных аварийных ситуаций. Это позволяет своевременно выявлять проблемы и принимать меры по устранению их последствий, повышая тем самым надежность и безопасность работы электрической сети.

Один из самых интересных современных методов расчета безотказности ЛЭП – это использование методов искусственного интеллекта (нейросетей и генетических алгоритмов).

Нейросети используются для анализа больших объемов данных и прогнозирования возможных аварийных ситуаций. С их помощью можно обучить компьютер распознавать входящие сигналы из различных датчиков, определять степень риска и выдавать рекомендации по предотвращению аварий.

Генетические алгоритмы применяются для оптимизации работы ЛЭП и поиска наиболее эффективных решений для обеспечения безотказности. В процессе работы алгоритм создает генетические варианты, которые затем оцениваются по критериям, например, стоимости оборудования, надежности, эффективности и др. В результате выбираются наилучшие варианты и рекомендации для оптимального проектирования и эксплуатации ЛЭП.

Использование методов искусственного интеллекта позволяет повысить точность анализов и обеспечить рациональное решение задачи безотказности ЛЭП. Однако для применения этого метода необходимо иметь большое количество данных и высокопроизводительные вычислительные системы.

### **Заключение**

Современные подходы к исследованию безотказности линий электропередач включают в себя использование компьютерных моделей, анализ данных датчиков и смарт-технологий, которые позволяют оперативно обнаруживать возможные проблемы в работе линий и принимать меры к их устранению. Такие подходы повышают эффективность работ и безопасность электросетей.

### **Литература**

1. Научная электронная библиотека «КиберЛенинка» [Электронный ресурс]/ Повышение эффективности работы воздушных линий электропередачи, работающих в экстремальных метеоусловиях. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-raboty-vozdushnyh-liniy-elektroperedachi-rabotayuschih-v-ekstremalnyh-meteousloviyah/viewer>. – Дата доступа: 01.04.2023.
2. Научно-технический рецензируемый журнал «Надежность и безопасность энергетики» [Электронный ресурс]/ Оценка показателей надежности линий электропередач Нижневолжского региона. – Режим доступа: <https://www.sigma08.ru/jour/article/viewFile/369/366>. – Дата доступа: 01.04.2023.
3. ResearchGate [Электронный ресурс]/ Robust event-driven dynamic simulation using power flow. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-dynamic-simulation-and-event-driven-simulation-of-39-bus-system-25-C\\_fig3\\_343757788](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-dynamic-simulation-and-event-driven-simulation-of-39-bus-system-25-C_fig3_343757788). – Дата доступа: 01.04.2023.

УДК 621.321

**АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ ПО  
УСЕЧЕННОМУ ГРАФУ СОСТОЯНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ  
ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE RESTORABLE SYSTEM  
BY A TRUNCATED STATE GRAPHS**

А.А Бандюкевич, Г.Д. Козин

Научный руководитель – А. Л. Старжинский, к.т.н., доцент.

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

A. Bandziukevich, H. Kozin

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются алгоритм и пример анализа надежности восстанавливаемой системы по усеченному графу состояний*

***Abstract:** this article discusses algorithm and example of analysis of the reliability of the restorable system by a truncated state graphs.*

***Ключевые слова:** энергетика, анализ, надежность, граф, метод.*

***Keywords:** energy, analysis, reliability, graph, method.*

### **Введение**

Анализ надежности восстанавливаемой системы по усеченному графу состояний находит применение в энергетике для оценки надежности различных энергетических систем, таких как электростанции, оборудование для передачи и распределения электроэнергии, системы электроосвещения и другие.

Например, применение анализа надежности по усеченному графу состояний позволяет определить наиболее вероятные участки сбоев и отказов в энергетических системах, а также наиболее эффективные методы и технические решения для улучшения их надежности.

Также использование данного метода позволяет производить комплексный анализ и оптимизацию надежности системы в целом, включая восстановительные механизмы, резервирование, мониторинг и диагностику.

В современных энергетических системах, которые часто работают в условиях переменных нагрузок и экстремальных условий, анализ надежности восстанавливаемой системы по усеченному графу состояний является необходимым инструментом для обеспечения безопасности и эффективности функционирования системы в целом.

### **Основная часть**

Пусть граф состояний состоит из  $N$  узлов и  $k$  уровней. Усечём граф до уровня  $n < k$ , сохранив во всех переходах интенсивности отказов и восстановлений. Выберем уровень  $n$  таким, чтобы в нём был как минимум один узел, который соответствует состоянию отказа системы. Усечение графа эквивалентно предположению, что все элементы, которые в результате отказов переводили систему на уровень  $n+1$ , являются идеальными ( $\lambda=0$ ). Тогда показатели надёж-

ности, вычисленные по усечённому графу, будут являться верхней оценкой надёжности системы.

Последовательность выполнения расчёта показателей по усечённому графу состояний системы:

1. Строится усечённый граф состояний до уровня  $n$ , в котором имеется хотя бы одно состояние отказа
2. Вычисляются показатели надёжности по усечённому графу. Они будут верхними оценками надёжности системы.
3. Все состояния уровня  $n$  принимаются за отказовые и вновь вычисляются показатели надёжности, которые будут нижними оценками надёжности системы.
4. Сравниваются между собой результаты вычислений, при значительных отличиях друг от друга, граф состояний увеличивается на один уровень и заново выполняются расчёты верхней и нижней оценок.

Когда разность между нижней и верхней оценками будет удовлетворять заданной точности расчётов, процедуру расчёта можно прекратить [1].

Рассмотрим данный метод анализа на конкретном примере.

Система состоит из 100 последовательно соединенных элементов, каждый из которых дублирован с постоянно включенным резервом (рисунок 1). Все элементы равнонадежны, интенсивности отказов и восстановления имеют значения :  $\lambda = 0,01 \text{ час}^{-1}$  ,  $\mu = 1 \text{ час}^{-1}$ . Систему обслуживает одна бригада. Необходимо определить коэффициент готовности системы и наработку на отказ.

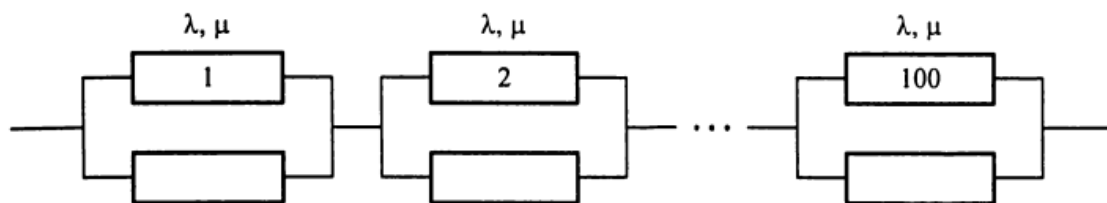


Рисунок 1 – Структурная схема системы

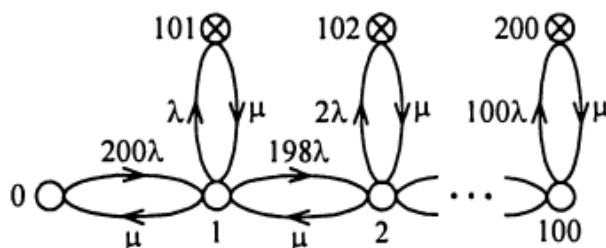


Рисунок 2 – Граф состояний системы

Система состоит из 201 состояния (рисунок 2). Определить точные значения  $K_r$  и  $T$  не просто из-за вычислительных трудностей. Воспользуемся методом усечения графа.

Усечём граф до 2-ого уровня, в котором находится узел 101, соответствующий состоянию отказа системы. Граф имеет вид, показанный на рисунке 3.

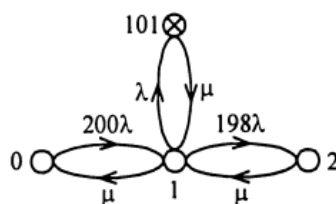


Рисунок 3 – Укороченный граф до второго уровня

Пользуясь топологическим методом, определим коэффициент готовности и наработку на отказ:

$$K_2 = p_0 + p_1 + p_2 = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu}{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu + 200\lambda^2\mu}$$

$$T = \frac{p_0 + p_1 + p_2}{\mu \cdot p_{101}} = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu}{200\lambda^2\mu^2}$$

Подставляя в эти выражения значения λ и μ, получим оценку показателей надёжности сверху:

$$K_2 = 0,997, T = 332 \text{ час.}$$

Принимая состояние (2) за отказовое, получим нижнюю оценку показателей надёжности:

$$K_2 = p_0 + p_1 = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2}{\mu^3 + 200\lambda\mu^2 + 200 \cdot 198\lambda^2\mu + 200\lambda^2\mu}$$

$$T = \frac{p_0 + p_1}{\mu \cdot p_2 + \mu \cdot p_{101}} = \frac{\mu^3 + 200\lambda\mu^2}{200 \cdot 198\lambda^2\mu^2 + 200\lambda^2\mu^2}$$

Подставляя в эти выражения значения λ и μ, получим:

$$K_2 = 0,43, T = 50 \text{ час.}$$

Диапазон значений  $K_T$  и  $T$  слишком большой. Укоротим граф до состояния третьего уровня. Принцип построения состояния графов и расчёты будут аналогичные.

Оценка показателей надёжности для графа, усечённого до третьего уровня следующая: верхняя:  $K_2 = 0,993, T = 148$  час., нижняя:  $K_2 = 0,98, T = 49$  час.

Из результатов расчёта можно заметить значительное сокращение диапазона  $K_T$ , однако диапазон  $T$  остаётся достаточно широким.

Укоротим граф до 4-ого уровня и получим следующие показатели надёжности:  $K_2 = 0,9889, T = 89$  час., а при усечении графа до 5-ого уровня, получим:

$K_2 = 0,982, T = 55$  час. Этот ответ можно принять за конечный, в связи со значительным сокращением диапазонов значений показателей надёжности.

Коэффициент готовности и наработка на отказ находятся в следующих диапазонах:  $K_2 = 0,98 \div 0,982, T = 49 \div 55$  час. При этом укороченный граф состояний имеет 10 узлов вместо 201 в полном графе.

**Заключение**

Анализ надёжности восстанавливаемой системы по усечённому графу состояний является важным инструментом в энергетике. Он позволяет оценить вероятность безотказной работы системы, учитывая возможность её восстановления, т.е. способность к быстрому восстановлению после сбоя или аварии. Использование усечённого графа состояний позволяет уменьшить количество вершин и рёбер графа, что значительно упрощает анализ и вычисления, не меняя при этом существенных характеристик системы.

Анализ надёжности восстанавливаемой системы по усечённому графу состояний позволяет выявить наиболее критичные для надёжности элементы и параметры системы, а также определить наиболее эффективные методы улучшения её надёжности.

#### Литература

1. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008.
2. Саульев, В. К. Математическая теория надёжности и восстановления / В.К. Саульев. - М.: МАИ, 1974.
3. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надёжности / Т.А. Голинкевич. - М.: Высшая школа, 1977.

УДК 621.311

**СТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ  
О НАДЕЖНОСТИ ВЛ И ОБОРУДОВАНИЯ ЭС  
STATIC METHODS FOR PROCESSING INFORMATION  
ON THE RELIABILITY OF OHL AND POWER EQUIPMENT**

В.В. Голуб, М.А. Шешко

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

astarginsky@bntu.by

V. Golub, M. Sheshko

Supervisor – A.L. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** *Статья описывает статические методы обработки информации о надежности высоковольтных линий и оборудовании ЭС. Описываются методы анализа надежности, включая анализ поломок, ремонта и технического обслуживания. В конце статьи представлены примеры применения статических методов в практике.*

**Abstract:** *The article describes static methods for processing information about the reliability of high-voltage lines and PP equipment. Reliability analysis methods are described, including breakdown, repair and maintenance analysis. At the end of the article, examples of the application of static methods in practice are presented.*

**Ключевые слова:** *Анализ, безотказность, надежность, статические методы обработки информации, интенсивность отказов.*

**Keywords:** *Analysis, fail-safety, reliability, emergencies, static information processing methods, failure rate.*

### **Введение**

Законы распределения отказов необходимо знать для решения теоретических и практических задач надежности ЭС и их элементов. Они получаются посредством обобщения статического материала об отказах.

В результате наблюдений за изделиями и оборудованием ЭС в ходе нормальной или опытной эксплуатации, или в результате стендовых испытаний получают статистические данные о надежности изделий и оборудования.

Легче всего получить экспериментальные данные о надежности при помощи нормальной эксплуатации. Но у этого метода есть свои недостатки, такие как, ограниченные возможности активного эксперимента, запаздывание данных, влияние субъективных факторов на объем и содержание информации.

Опытная эксплуатация должна проводиться под наблюдением представителей служб надежности, у которых есть специальная подготовка и которые независимы от воздействия местных субъективных факторов. Стендовые испытания проводятся на заводах-изготовителях или в специальных испытательных центрах.

### **Основная часть**

Статические методы обработки информации о надежности воздушных линий и оборудования ЭС являются методами, которые основываются на статистических данных о работе воздушных линий и оборудования. Они используют информацию о прошлых сбоях и отказах для определения возможных вероятностей отказов в будущем.

Один из таких методов - анализ надежности - позволяет определить вероятность отказа оборудования в условиях его эксплуатации. Этот метод включает в себя анализ и оценку возможных причин отказов, определение факторов, влияющих на надежность, а также оценку последствий отказа в случае его возникновения.

Другой метод статистической обработки информации о надежности - метод мониторинга - позволяет отслеживать изменения в надежности оборудования в течение его эксплуатации. Этот метод включает в себя непрерывное сбор информации о работе оборудования, а также анализ этой информации для выявления динамики изменения надежности и возможных причин сбоев или отказов.

Еще один метод - метод экспертных оценок - основывается на мнениях квалифицированных специалистов в области надежности, которые используют свой опыт и знания для предсказания возможных отказов и сбоев в оборудовании.

Все эти методы имеют свои плюсы и минусы, но в сочетании они могут быть очень эффективными для обеспечения надежности и безопасности воздушных линий и оборудования ЭС.

Для расчета надежности воздушной линии нужно учитывать несколько факторов, включая наличие резервированных компонентов, среднее время между отказами, время восстановления после отказа и т.д.

Приведем пример расчета надежности воздушной линии:

Предположим, что в составе линии находится 5 компонентов, каждый из которых имеет МТBF (среднее время между отказами) в 1000 часов. В линии также присутствует резервирование компонентов, позволяющее быстро восстановить работу линии после отказа.

Время восстановления после отказа составляет 10 часов, что означает что после отказа одного компонента, линия сможет быть восстановлена через 10 часов. Тогда, вероятность отказа всей линии за 1 час вычисляется по формуле:

$$P = (1 - (P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5))^n;$$

где  $P_1$  - вероятность работы компонента 1 за 1 час ( $1/\text{MTBF}_1$ ),  $P_2$  - вероятность работы компонента 2 за 1 час ( $1/\text{MTBF}_2$ ) и т.д. ,

$n$  - количество компонентов в линии (в данном случае 5).

Таким образом,  $P_1 = 0,001$ ,  $P_2 = 0,001$ ,  $P_3 = 0,001$ ,  $P_4 = 0,001$ ,  $P_5 = 0,001$ ,

$$P = (1 - (0,001 \cdot 0,001 \cdot 0,001 \cdot 0,001 \cdot 0,001))^5 = 0,094.$$

Для расчета анализа надежности оборудования электрической сети можно использовать следующие данные:

Общее количество оборудования в сети: 1000 единиц.

Количество отказавших единиц за определенный период: 50 единиц.



Средняя продолжительность безотказной работы оборудования: 1000 часов.

Среднее время восстановления оборудования после отказа: 500 часов.

Тогда можно рассчитать следующие параметры:

Вероятность безотказной работы оборудования:

$$P(T \geq t) = e^{(-\lambda \cdot t)},$$

где  $\lambda$  - интенсивность отказов,

$t$  - время, на которое проверяется надежность (в данном случае 1000 часов).

$$P(T \geq 1000) = e^{(-50 \cdot 1000)} = 0,6065.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы оборудования равна 0.6065.

Вероятность отказа оборудования:

$$P(T < t) = 1 - e^{(-\lambda \cdot t)};$$

$$P(T < 1000) = 1 - e^{(-50 \cdot 1000)} = 0,3935.$$

Таким образом, вероятность отказа оборудования равна 0,3935 или.

Среднее время наработки на отказ:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda};$$

$$MTTF = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ часа или } 72 \text{ секунды.}$$

Это означает, что среднее время наработки на отказ составляет 72 секунды.

Среднее время восстановления после отказа  $MTTR = 500$  часов, где  $MTTR$  - среднее время восстановления после отказа.

Среднее время между отказами:

$$MTBF = MTTF + MTTR;$$

$$MTBF = 0,02 + 500 = 500,02 \text{ часа.}$$

$MTBF$  - среднее время между отказами.

Важность оборудования можно определить на основе его функциональной роли в сети и последствий его отказа. Например, если отказ конкретного оборудования приводит к полной остановке сети, его важность будет очень высокой.

Таким образом, анализ надежности оборудования электрической сети позволяет определить вероятность отказа, среднее время между отказами, важность каждой единицы оборудования и другие характеристики, необходимые для поддержания надежности и безопасности сети.

### Заключение

Использование статических методов обработки информации о надежности ВЛ и оборудования ЭС играет ключевую роль в повышении уровня надежности электроснабжения и обеспечении безопасности электросетей.

Статические методы позволяют анализировать данные и проводить оценку надежности и безопасности ВЛ и оборудования ЭС на основе статистических и математических методов. Это позволяет выявлять тенденции, прогнозировать отказы и сбои в работе оборудования, а также минимизировать риски аварийных ситуаций.

При этом необходимо учитывать, что статические методы не являются панацеей и не могут полностью заменить другие методы контроля и мониторинга систем электроснабжения. Они лишь дополняют имеющиеся методы и позволяют проводить более точный анализ состояния ВЛ и оборудования ЭС.

Таким образом, использование статических методов обработки информации о надежности ВЛ и оборудования ЭС является необходимым условием для обеспечения безопасности и надежности электроснабжения. Однако они должны использоваться в сочетании с другими методами контроля и мониторинга, чтобы обеспечить полную надежность и безопасность работы электросетей.

#### **Литература**

1. Гук Ю. Б. Теория надежности. Введение: учеб. пособие / Ю. Б. Гук, В. В. Карпов, А. А. Лapidус. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 171 с.
2. Фокин Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. - М.: Высш. шк., 1989. - 149 с.
3. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 200 с.

УДК 519.718

**ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.  
ASSESSMENT OF THE INSULATION  
RELIABILITY OF ELECTRICAL EQUIPMENT**

А.В. Манько, Н.Ю. Подоба

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

A. Manko, N. Podoba

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** В данной статье рассмотрены современные методы и технологии контроля надежности изоляции электрооборудования, включая такие методы как: метод оценки интенсивности частичных разрядов, испытания напряжением изоляции и измерение сопротивления изоляции.*

***Annotation:** This article discusses modern methods and technologies for monitoring the reliability of insulation of electrical equipment, including such methods as: a method for assessing the intensity of partial discharges, testing with insulation voltage and measuring insulation resistance.*

***Ключевые слова:** изоляция, надёжность, метод, разряд, напряжение, сопротивление, электрооборудование.*

***Key words:** isolation, reliability, method, discharge, voltage, resistance, electrical equipment.*

### **Введение**

Надежность наиболее распространенного электрооборудования электроэнергетической системы, такого как, силовые трансформаторы, кабели, вводы, электрические машины в значительной степени определяется надежностью их изоляции. Электрическая прочность - основная характеристика изоляции электротехнических изделий, которая зависит от однородности материала. При нагревании токами нагрузок, температурных воздействиях внешней среды, механических нагрузках, низком качестве электроэнергии, при высоких напряжениях электрического поля происходит разрушение изоляции при функционировании электроустановки. Таким образом на срок службы изоляции влияет тепловое, механическое и электрическое старение изоляции.

### **Основная часть**

Примерное распределение отказов опорных маслонаполненных и с литой изоляцией трансформаторов тока следующее: 31 - 48% - пробой литой изоляции, обрывы и замыкания вторичных обмоток, старение изоляции и усталостные явления, пробой бумажно-масляной изоляции; 18% - недостатки эксплуатации (попадание влаги и несвоевременная чистка изоляции, нарушение сроков испытаний и др.) ; 20-26 %- старение изоляции ; 8 – 10%- воздействие перенапряжений .

Отказы трансформаторов напряжения распределяются примерно так: воздействие перенапряжений – 51,9%; недостатки конструкции и изготовления (недостаточная герметичность, витковые замыкания и др.) – 22,9%; старение изоляции и износые явления – 12,3%; недостатки эксплуатации (плохой контроль уплотнений и воздухоосушителей, нарушение сроков ремонтов и испытаний и др.) – 12,9%.

Срок службы изоляции в зависимости от класса изоляции и температуры нагрева равен:

$$T_u = T_0 e^{-\gamma\theta}, \tag{1}$$

где  $T_0$  – срок службы изоляции при температуре перегрева, равной 0;

$\gamma$  – коэффициент, характеризующий степень старения изоляции в зависимости от ее класса;

$\theta$  – температура нагрева изоляции.

В смысле надежности все участки изоляции представляются системой с последовательным соединением элементов, поэтому функцию распределения времени безотказной работы такой системы или вероятность отказа можно представить в виде:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = [1 - Q(t)]^n. \tag{2}$$

В общем случае, когда  $q(t)$  имеет так называемый «порог чувствительности», т.е. элемент гарантированно не откажет в интервале времени  $(0; t_0)$ , вероятность отказа изоляции имеет вид:

$$Q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_0)}, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases}. \tag{3}$$

где  $c$  – постоянный коэффициент. Форма этого закона определяется видом функции распределения на малых интервалах времени. Если зависимость изменения вероятности отказа на каждом интервале нелинейна, то вероятность отказа имеет следующий вид:

$$Q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-c(t-t_0)^\alpha}, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases}. \tag{4}$$

Если распределение не имеет порога чувствительности,  $t_0$ , то вероятность отказа описывается законом Вейбулла:

$$Q_c(t) = \begin{cases} 1 - e^{-ct^\alpha}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}. \tag{5}$$

Частота отказов для данного случая (без порога чувствительности) равна:

$$\omega(t) = \begin{cases} \alpha c t^{\alpha-1} e^{-c t^\alpha}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

а интенсивность отказов определяется как:

$$\lambda(t) = \alpha c t^{\alpha-1}. \quad (7)$$

Среднее время безотказной работы изоляции и дисперсия при распределении по закону Вейбулла равны:

$$\bar{T}_u = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) c^{-\frac{1}{\alpha}}; \quad (8)$$

$$D(T_u) = c^{-\frac{2}{\alpha}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right], \quad (9)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция[6].

При обычном осмотре изоляции не всегда возможно обнаружить мелкие трещины, воздушные включения, проникновение влаги, поэтому необходимо проводить периодические профилактические испытания и различные методы для оценки надёжности изоляции:

1. Метод оценки интенсивности частичных разрядов [1].

Перспективным методом контроля состояния изоляции электрооборудования высокого напряжения без его остановки является метод оценки интенсивности частичных разрядов, которые проявляются в виде искровых разрядов в различных частях изоляционной системы, а также в виде коронного разряда. Частичные разряды возникают в пустотах в твердой изоляции (бумажной или полиэтиленовой), а также в пузырьках газа (в случае жидкой изоляции), в большинстве случаев представляют собой воздушные или масляные промежутки в изоляции.

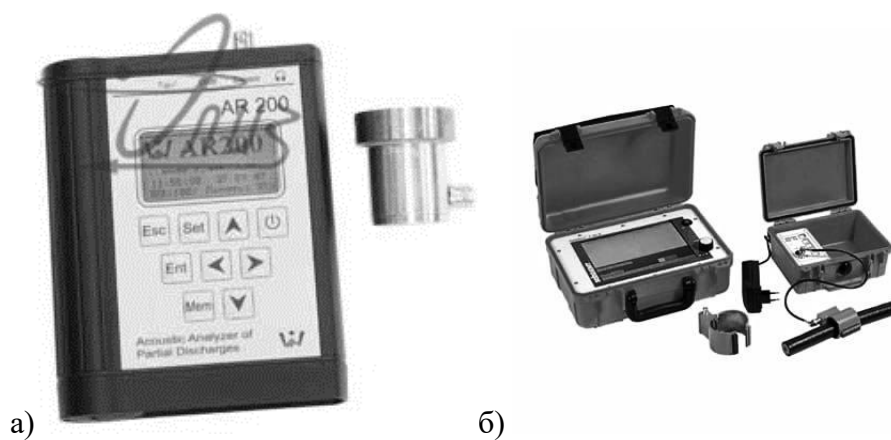


Рисунок 1 а) AR200 - анализ частичных разрядов в изоляции при помощи акустического датчика (AR 200); б) PD LOC — система точной локализации частичных разрядов в кабельных линиях

Для измерения частичных разрядов применяются специальные приборы следующих типов: AR — контроль ЧР в изоляции трансформаторов тока и напряжения (рисунок 1 а); PD LOC — система точной локализации ЧР в кабельных линиях (рисунок 1 б);

2. Акустический метод определения места повреждения кабельной линии [2].

С помощью акустического метода поиска повреждений кабеля можно обнаружить разнообразные виды повреждений, такие как "заплывающие" пробои, однофазные и междуфазные повреждения с различными переходными сопротивлениями, а также обрывы одной или нескольких жил. Однако при полном замыкании с низким переходным сопротивлением метод становится бесполезным. Иногда с помощью этого метода можно обнаружить несколько повреждений на одной кабельной линии.

Для определения местонахождения повреждения кабеля используется звуковой сигнал - щелчок или удар, который возникает при прохождении высоковольтного импульса через поврежденный участок. Этот звуковой сигнал передается через высокочувствительный акустический датчик (микрофон), который преобразует его в электрический сигнал. Переносное приемно-усилительное устройство, оснащенное звуковой и визуальной индикацией, позволяет оператору перемещать микрофон вдоль трассы кабеля и находить точку с максимальным сигналом, указывающим на место повреждения. Таким образом, локализуют место повреждения (рисунок 2).

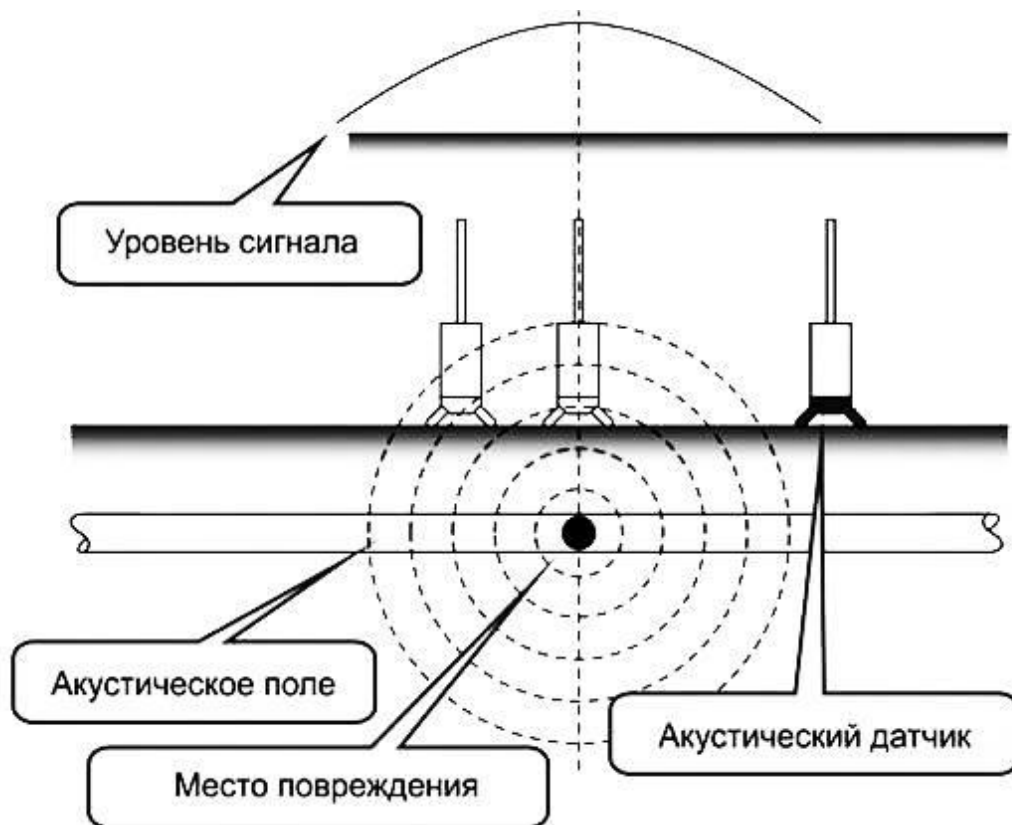


Рисунок 2 - Определение точного местонахождения повреждения в кабельной линии

### 3. Испытания напряжением [3]

Испытания изоляции повышенным напряжением проводят для определения электрической прочности изоляции и выявления возможных дефектов в изоляции.

Уровень испытательных напряжений электрооборудования при вводе его в эксплуатацию ниже заводских испытательных напряжений и составляет  $0,9 \cdot U_{\text{исп.зав}}$ . В качестве испытательного обычно используется напряжение промышленной частоты 50 Гц. Время продолжительности приложения испытательного напряжения ограничивается во избежание появления дефектов в изоляции и преждевременного старения ее от 1 мин до 5 мин.

Недостаток испытания выпрямленным напряжением - неравномерное распределение напряжения по толщине изоляции в зависимости от проводимости отдельных частей ее.

При испытаниях выпрямленным напряжением имеется возможность измерения токов утечки, являющихся дополнительным критерием оценки состояния изоляции. Испытания изоляции выпрямленным составляют от 10 до 20 мин. Когда испытание изоляции производится как переменным, так и выпрямленным напряжением, испытание выпрямленным напряжением должно предшествовать испытанию переменным напряжением.

Для проведения испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты используется повышающий трансформатор, у которого есть регулировочное устройство на стороне низкого напряжения. Схема установки также должна содержать выключатель питания с видимым разрывом и максимальную токовую защиту для отключения питания трансформатора в случае пробоя или перекрытия изоляции объекта. После установленной продолжительности испытания напряжение плавно снижается до значения, не превышающего одной трети испытательного, и отключается. Резкое снятие напряжения допускается в тех случаях, когда это необходимо для безопасности людей или сохранности оборудования. Под продолжительностью испытания подразумевается время приложения полного испытательного напряжения [4].

### 4. Измерения сопротивления изоляции [5]

Измерение сопротивления изоляции – это процедура определения сопротивления изоляции электрических оборудования, кабелей, проводов, электроники и других электрических устройств.

Метод основан на принципе передачи тока через изоляционный материал. При этом ток должен быть достаточно малым, чтобы изоляционный материал не был поврежден. Мегаомметр генерирует постоянное напряжение, которое прикладывается между измеряемым элементом и землей. Затем измеряется ток, протекающий через изоляцию. Измеряемое сопротивление вычисляется. Тестер изоляции, используемый в течение слишком короткого времени, фиксирует лишь емкостный зарядный ток и не будет показывать наличие загрязнений в изоляции. Ток, утекающий через поврежденную изоляцию в нетоковедущие металлические компоненты, называется током утечки. Однако для большей точности диагностики и техобслуживания также необходимо учитывать ток поглощения или поляризации. Некоторые тестеры сопротивления изоляции мож-

но запрограммировать так, чтобы необходимые испытания проводились с учетом всех видов тока.

Таблица 1 -. Рекомендованные значения испытательного напряжения и минимальной изоляции

Номинальное напряжение электрооборудования, В	Минимальное напряжение постоянного тока для проверки сопротивления изоляции, В	Рекомендованное минимальное сопротивление изоляции, МОм
250	500	25
600	1000	100
1000	1000	100
5000	2500	1000
15000	2500	5000

### Заключение

Высокая надежность электротехнических устройств является необходимым условием эффективной работы различных автоматизированных систем, комплексов и оборудования, работающих в различных отраслях промышленности. С помощью современных методов и технологий можно более надежно контролировать состояние изоляции и предотвращать возможные аварии и поломки электрооборудования. В зависимости от целей изучения и возможностей исследователей выбирается наиболее удобный метод для определения надежности изоляции линий электропередачи.

### Литература

1. Контроль частичных разрядов [Электронный ресурс]/контроль частичных разрядов. - Режим доступа: [https://bstudy.net/657307/tehnika/kontrol\\_chastichnyh\\_razryadov/](https://bstudy.net/657307/tehnika/kontrol_chastichnyh_razryadov/). - Дата доступа: 18.04.2023.
2. Акустический метод определения места повреждения кабельной линии [Электронный ресурс]/ акустический метод определения места повреждения кабельной линии - Режим доступа: [https://angstrem.tech/blog/akusticheskiy\\_metod\\_opredeleniya\\_mesta\\_povrezhdeniya/](https://angstrem.tech/blog/akusticheskiy_metod_opredeleniya_mesta_povrezhdeniya/). - Дата доступа: 20.04.2023
3. Испытания изоляции повышенным напряжением [Электронный ресурс]/ испытания изоляции повышенным напряжением - Режим доступа : <https://www.ruscable.ru/doc/documentation/instruction-16.html/>. - Дата доступа: 20.04.2023
4. Испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты [Электронный ресурс]/ испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты - Режим доступа: <https://electricalschool.info/main/naladka/708-ispytanie-izoljicii-povyshennym.html/>. - Дата доступа: 20.04.2023
5. Измерения сопротивления изоляции [Электронный ресурс]/ измерения сопротивления изоляции – Режим доступа : [https://www.icsgroup.ru/library/publications/ommetr\\_choice/](https://www.icsgroup.ru/library/publications/ommetr_choice/). - Дата доступа: 23.04.2023
6. Савина Н.В. Надёжность электроэнергетических систем: учебное пособие / Н.В. Савина. – Благовещенск: Амурский государственный университет , 2014. - 194 с.



УДК 621.314

**АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ****ANALYSIS OF THE REASONS FOR FAILURE AND MEASURES TO INCREASE THE RELIABILITY OF MEASURING TRANSFORMERS**

С.В. Климчук, М.В. Прокопович

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

astarginsky@bntu.by

S. Klimchuk, M. Prokopovich

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Проанализированы причины повреждаемости измерительного маслонаполненного оборудования и внесены предложения по снижению его аварийности в электросетевых предприятиях. Произведенный анализ причин повреждаемости оборудования по его типам указывает на ряд конструктивных недостатков, которыми обладает то или иное оборудование определенного типа. Даны рекомендации по снижению числа отказов данного оборудования, направленные на предотвращение аварийных ситуаций, связанных с отказом высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения.*

***Abstract:** The causes of damage to oil-filled measuring equipment are analyzed and proposals are made to reduce its accident rate in power grid enterprises. The analysis of the causes of equipment damage by its types indicates a number of design flaws that this or that equipment of a certain type has. Recommendations are given to reduce the number of failures of this equipment, aimed at preventing emergency situations associated with the failure of high-voltage measuring current and voltage transformers.*

***Ключевые слова:** высоковольтное измерительное оборудование, трансформаторы тока и напряжения, повреждаемость, анализ причин повреждаемости, снижение числа отказов, трансформатор тока, трансформатор напряжения*

***Keywords:** high-voltage metering equipment, current and voltage transformers, damage, damage cause analysis, failure reduction, current transformer, voltage transformer*

**Введение**

Измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) - электрические аппараты, предназначенные для измерения и контроля тока и напряжения в контролируемой цепи. Используются тогда, когда прямое подключение измерительного прибора невозможно, например, при измерении слишком высоких токов и напряжений. Кроме этого, при помощи ТТ и ТН осуществляется галь-

ваническая развязка первичных и вторичных цепей. Также через измерительные трансформаторы запитываются цепи релейной защиты и автоматики.

Таким образом, повреждения в измерительных трансформаторах приводят к серьезным последствиям. Практически всегда имеют место факты возгорания и взрывы. При аварии, ввиду большого радиуса разлета осколков, часто повреждаются соседние установки. Также, к неправильному действию или несрабатыванию устройств релейной защиты, что может повлечь за собой выход из строя дорогостоящего оборудования.

В настоящее время анализ причин повреждений и отказов трансформаторов тока и напряжения является немаловажной задачей в энергетике.

В данной статье будут рассмотрены некоторые современные способы повышения безотказности измерительных трансформаторов тока и напряжения

### Основная часть

Несмотря на свою важность, назвать измерительные трансформаторы надежным оборудованием в данный момент времени не представляется возможным. Дефекты данного оборудования трудно диагностируются, а развиваются достаточно быстро. Одним из способов предотвращения аварий является постоянный мониторинг состояния изоляции.

В качестве примера, по результатам исследования количества отказов трансформатора напряжения типа НОМ 35 был построен график интенсивности отказов. В данном графике можно выделить 3 характерных участка:

- на первом участке имеют место ранние отказы.
- второй участок соответствует статическим отказам.
- третий участок - окончание срока службы.

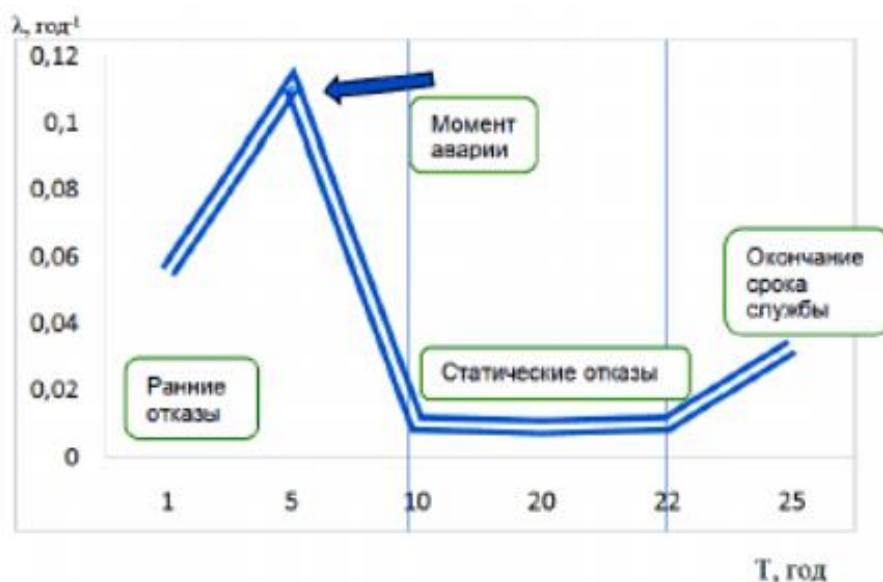


Рисунок 1 - График кривой интенсивности отказов измерительного трансформатора напряжения

Для ТН типа НОМ 35 заводом изготовителем установлен номинальный срок службы 25 лет. Однако для данного срока службы не установлено среднеквадратичное отклонение от этого времени. Поэтому если ориентироваться

именно на срок 25 лет, то, можно считать, что период в 5 лет от начала эксплуатации до момента аварии относится к ранним отказам.

Анализируя график видно, что наименьшая интенсивность отказов, а следовательно, и наибольшая надежность, имеет место на втором участке (статических отказов).

Также в ходе исследований был получен график распределения вероятности безотказной работы измерительного трансформатора тока ТФРМ.

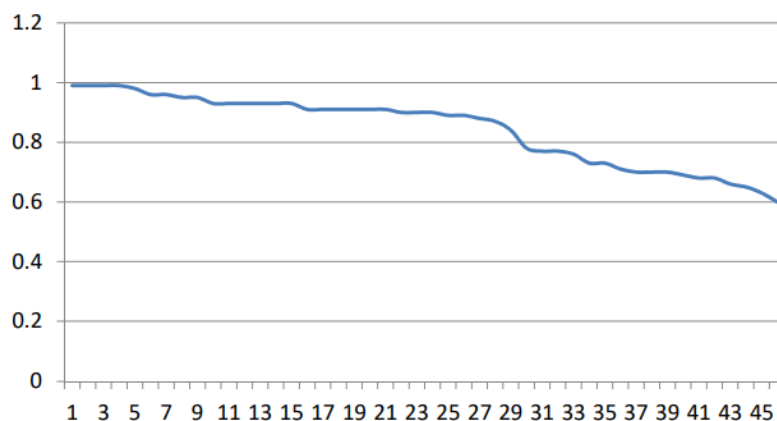


Рисунок 2 - Распределение вероятности безотказной работы трансформатора тока ТФРМ

Анализ графика показал, что для ТФРМ, который находится в эксплуатации 29 лет, значение вероятности безотказной работы составляет 0,78. Далее, с увеличением времени нахождения трансформатора тока в работе, возрастает скорость снижения вероятности безотказной работы аппарата. Так в 45-й год вероятность составит 0,6.

Для выявления процессов, негативно влияющих на работу трансформаторов тока и напряжения, были проведены многочисленные экспериментальные исследования на основе собранной за годы эксплуатации статистики.

Причины отказов измерительного оборудования можно разделить на следующие категории:

1. Повреждение изоляции;
2. Межвитковые замыкания;
3. Феррорезонансные явления;
4. Механические деформации;
5. Заводские неисправности;

Согласно статистике, к наиболее частым факторам выхода из строя ТТ и ТН относят пробой изоляции и ее старение (52 %). Возникают вследствие воздействия частичных разрядов, нагрева прямыми солнечными лучами, а также при протекании токов, значения которых превышают допустимые.

Кроме нагрева изоляции происходит ее постепенное увлажнение, что в свою очередь приводит к увеличению диэлектрических потерь. При резком повышении температуры может происходить выделение растворенного воздуха в свободную газовую фазу в виде пузырьков, в которых развиваются критические частичные разряды, приводящие к пробую бумажно-масляной изоляции. Суще-

ствуется и другой механизм пробоя, который связан с переходом влаги из увлажненной бумаги в масло при резком повышении температуры.

Одним из немаловажных факторов, влияющих на срок службы изоляции, являются частотные перенапряжения. При каждом пробое промежутка между контактами разъединителя в сети возникают затухающие электромагнитные колебания с частотой от 50 до 1000 кГц, длительностью 10-500 мкс. Количество таких процессов за одну коммутацию составляет от нескольких десятков до нескольких тысяч в зависимости от параметров схемы, класса напряжения, скорости движения контактов разъединителя, метеорологических условий. Амплитуда колебаний меняется за коммутацию от сотен вольт при малых размерах межконтактного промежутка до  $3,5 U_{фм}$  при максимальных пробиваемых расстояниях между контактами, что может вывести высоковольтное оборудование из строя.

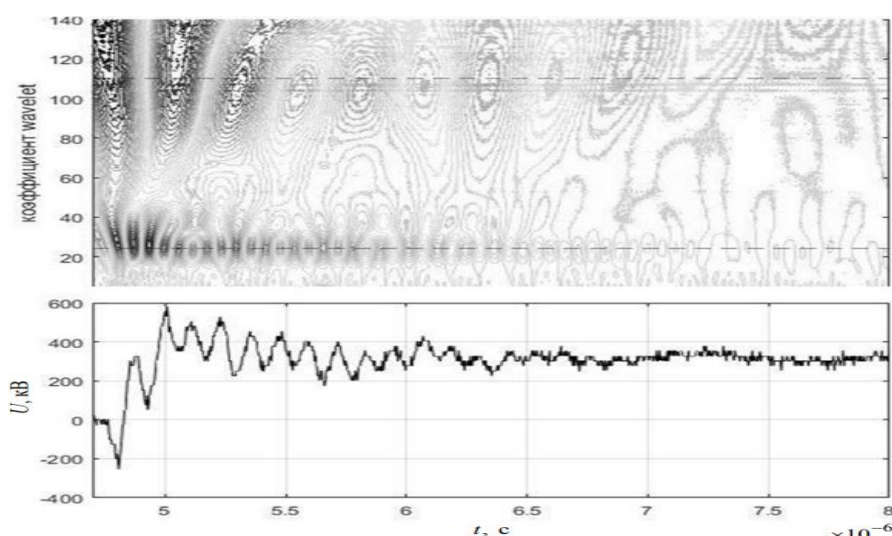


Рисунок 3 - Осциллограмма напряжения и её частотно-временное представление при коммутации

При межвитковых замыканиях (они составляют 32 % от общего количества повреждений) происходит пробой изоляции обмотки, что также приводит к выходу из строя измерительных трансформаторов. Немаловажным фактором считаем учесть, что при протекании токов КЗ по U-образной обмотке, ввиду возникающих электродинамических усилий, происходит повреждение изоляции, что в свою очередь приводит к частичным разрядам. Они ускоряют процесс старения изоляции.

Исходя из приведенного анализа, с целью предотвращения повреждений измерительных трансформаторов тока и напряжения 110 кВ и выше, принимаются следующие меры:

1. Участиль контроль состояния измерительных трансформаторов тока и напряжения, которые работают в особых режимах или тех, длительность эксплуатации которых превышает 15 лет.

2. Осуществлять тепловой контроль ТТ и ТН проводить не реже трех раз в год. А в летний период, когда среднесуточная температура окружающего воздуха превышает  $20^{\circ}\text{C}$ , не реже 1 раза в месяц. Непосредственно для данного

периода года тепловой контроль оборудования следует производить в ночное время суток, спустя два часа после захода солнца.

3. Осуществлять автоматизированный контроль состояния трансформаторного масла для всех ТТ (ТН), дополнительный анализ масла на влагосодержание. Анализ химического состава трансформаторного масла, в том числе определение количества азота и кислорода в нем, позволит сделать вывод о состоянии масла. При превышении концентрации примесей в масле выше допустимых значений, следует проводить испытания в полном объеме.

4. Производить измерение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Данное мероприятие, также как и предыдущее, осуществляется для контроля качества изоляции. Проводят такие измерения при помощи различных испытательных комплексов. Отклонение измеренных величин от нормы не является причиной для вывода измерительного оборудования в ремонт, однако является основанием для проведения испытаний в полном объеме согласно нормативным документам.

5. Для ТТ – снятие характеристики намагничивания для выявления наличия короткозамкнутых витков. Для ТН – измерение сопротивления первичной и вторичных обмоток.

6. Контролировать интенсивность частичных разрядов в изоляции ТТ, начиная с класса напряжения 110 кВ и выше при помощи различных методов.

7. Для трансформаторов напряжения: при перенапряжениях должно производиться оперативное их отключение с последующим выявлением причин возникновения этих перенапряжений. Производить анализ схем подстанций с целью выявления возможных феррорезонансных перенапряжений и разработки специальных мероприятий по их предотвращению.

8. Создание общей информационной базы, в которой приведена статистика отказов вновь устанавливаемого оборудования с предварительной разработкой мероприятий по их предупреждению.

### **Заключение**

В данной статье были рассмотрены основные причины возникновения отказов измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также мероприятия, способствующие повышению безотказности и срока их эксплуатации. Данные подходы позволят в значительной степени повысить надежность электроэнергетических систем.

### **Литература**

1. Фомина, И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения и результаты химического анализа трансформаторного масла // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 4.
2. Хреников, А.Ю., Мажурин, Р.В. Диагностика и мероприятия по снижению аварийности высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения в электрических сетях 110-750 кВ // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. - 2013 - С. 52-54.
3. Швед, Г. А. Высоочастотные перенапряжения / Г. А. Швед ; науч. рук. И. В. Колосова // Актуальные проблемы энергетики : материалы 72-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 300-301.

УДК 621.311

**АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ПО  
КРИТЕРИЮ ВЫШНЕГРАДСКОГО  
ANALYSIS OF THE STATIC STABILITY OF THE SYSTEM SOFT-  
WARE VYSHNEGRADSKY CRITERION**

И.Ю. Аникейчик

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

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

I. Anikeichik

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** проведены расчеты и анализ статической устойчивости электроэнергетической системы по критерию И.А.Вышнеградского.*

***Abstract:** calculations and analysis of the static stability of the electric power system were carried out according to the Vyshnegradsky criterion.*

***Ключевые слова:** статическая устойчивость, анализ системы, критерий устойчивости И. А. Вышнеградского.*

***Keywords:** static stability, system analysis, Vyshnegradsky stability criterion.*

### **Введение**

Под устойчивостью системы понимают ее свойство возвращаться в исходное состояние равновесия при снятии возмущения, которое повлекло к нарушению этого состояния [1].

Известны следующие способы анализа устойчивости:

- по корням характеристического уравнения;
- по критериям устойчивости.

В 1876 г. профессор И.А. Вышнеградский предложил критерий устойчивости для систем автоматического регулирования, описываемых линейным дифференциальным уравнением третьего порядка. Критерий Вышнеградского и его графическая иллюстрация позволяют, не решая дифференциального уравнения, судить об устойчивости системы регулирования и о характере ее переходного режима.

Вышнеградский обосновывает свое правило (критерий) путем:

- 1) рассмотрения неравенств, составленных из коэффициентов характеристического уравнения, предварительно приведенного к виду, в котором коэффициент при старшей производной равен единице;
- 2) перехода к новой переменной характеристического уравнения и к новым его коэффициентам, из которых только два (из четырех) отличны от единицы;
- 3) сопоставления аналогичных неравенств, составленных из старых и новых коэффициентов, и построения кривой, полученной как предельное значение этих неравенств.

**Основная часть**

Несколько проще можно вывести критерий Вышнеградского, пользуясь критерием Рауса — Гурвица или же критерием Михайлова.

Рассмотрим характеристическое уравнение третьего порядка с положительными коэффициентами:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \tag{1}$$

где  $a_0=0,2$ ;  $a_1=1,55$ ;  $a_2=4$ ;  $a_3=0,52$ .

Далее преобразуем уравнение (1) таким образом, чтобы коэффициент при старшей производной соответствующего дифференциального уравнения был равен единице. Для этого разделим его на коэффициент  $a_0$ , получая при этом:

$$p^3 + \frac{a_1}{a_0} p^2 + \frac{a_2}{a_0} p + \frac{a_3}{a_0} = 0, \tag{2}$$

или

$$p^3 + C_1 p^2 + C_2 p + C_3 = 0, \tag{3}$$

где  $C_1 = \frac{a_1}{a_0}$ ;  $C_2 = \frac{a_2}{a_0}$ ;  $C_3 = \frac{a_3}{a_0}$ .

Подставив наши данные в уравнение (2), а затем в уравнение (3), получим:

$$p^3 + \frac{1,55}{0,2} p^2 + \frac{4}{0,2} p + \frac{0,52}{0,2} = 0, \tag{4}$$

где  $C_0 = 1$ ;  $C_1 = 7,75$ ;  $C_2 = 20$ ;  $C_3 = 2,6$ .

Получаем:

$$p^3 + 7,75 p^2 + 20 p + 2,6 = 0. \tag{5}$$

Введем новую переменную, путем деления уравнения (3) на  $C_3 > 0$ :

$$\varphi = \frac{p}{\sqrt[3]{C_3}}, \tag{6}$$

которая отличается от  $p$  лишь положительным множителем, приведем к так называемому нормированному виду, т. е. к виду

$$\varphi^3 \frac{1}{C_3} (\sqrt[3]{C_3})^3 + \varphi^2 \frac{C_1}{C_3} (\sqrt[3]{C_3})^2 + \varphi \frac{C_2}{C_3} \sqrt[3]{C_3} + 1 = 0, \tag{7}$$

или

$$\varphi^3 + \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}} \varphi^2 + \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}} \varphi + 1 = 0, \tag{8}$$

или

$$\varphi^3 + A \varphi^2 + B \varphi + 1 = 0, \tag{9}$$

где безмерные коэффициенты

$$A = \frac{C_1}{\sqrt[3]{C_3}}, B = \frac{C_2}{\sqrt[3]{C_3^2}}. \quad (10)$$

Коэффициенты А и В (10) носят название параметров Вышнеградского. Подставим значения  $C_1, C_2, C_3$ :

$$A = \frac{7,75}{\sqrt[3]{2,6}} = 5,636; B = \frac{20}{\sqrt[3]{2,6^2}} = 10,577.$$

Устойчивость системы кроме положительности коэффициентов характеризуется еще неравенством:

$$AB - 1 > 0 \Rightarrow AB > 1. \quad (11)$$

Неустойчивость системы характеризуется неравенством:

$$AB - 1 < 0 \Rightarrow AB < 1. \quad (12)$$

Граничные условия, характеризующие незатухающие гармонические колебания, должны определяться предельным значением этих неравенств:

$$AB - 1 = 0 \Rightarrow AB = 1. \quad (13)$$

Уравнение (13) представляет собой в осях прямоугольной системы координат А и В равностороннюю гиперболу (рисунок 1), которая делит плоскость А — В на области устойчивости и неустойчивости системы автоматического регулирования. Выше кривой  $AB = 1$  расположена область устойчивости  $AB > 1$ , характеризующая затухающий переходный процесс; ниже этой кривой — область неустойчивости  $AB < 1$ , характеризующая нарастающие колебания.

Анализируя решение уравнения (9), Вышнеградский показал, что область устойчивости  $AB > 1$ , в свою очередь, может быть разделена на области I, II и III, отличающиеся между собой различным расположением корней  $p$  характеристического уравнения в плоскости  $\alpha, j\beta$  корней. Кривые, разграничивающие эти области, построены по уравнениям:

$$A^2 B^2 - 4(A^3 + B^3) + 18AB - 27 = 0, \quad (14)$$

и

$$2A^3 - 9AB + 27 = 0 \text{ (при } A > 3) \quad (15)$$

По уравнению (14) построены кривые SE и SF, расположенные симметрично относительно биссектрисы координатного угла. Эти кривые ограничивают область III, в которой все три корня  $p$  характеристического уравнения вещественные, отрицательные и разные.

По уравнению (15) построена кривая DC, выделяющая область II, в которой один корень вещественный, отрицательный, а два других — комплексные с отрицательной вещественной частью.

В каждой из областей I, II и III показаны примерные переходные процессы  $x(t)$  во времени.



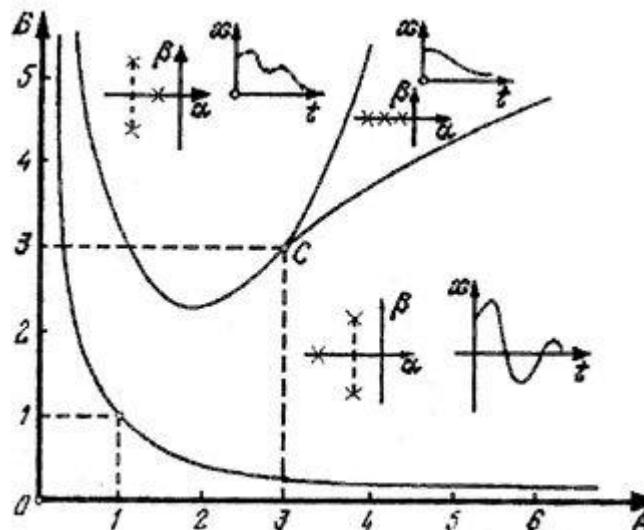


Рисунок 1 - Диаграмма И.А. Вышнеградского

Произведение коэффициентов:

$$AB = 5,636 \cdot 10,577 = 59,612;$$

$$AB = 59,612 > 1.$$

Следовательно, исследуемая система регулирования является устойчивой.

Установим форму переходного процесса. Для этого откладываем на диаграмме (рисунок 1) координаты А и В и находим на плоскости точку, которая оказывается в области II устойчивости. Этой области соответствует характеристическое уравнение, содержащее один корень вещественный, отрицательный, а два других — комплексные с отрицательной вещественной частью. Область II, где хотя и имеются комплексные корни, но они расположены дальше от оси мнимых величин, чем вещественный корень, характеризует монотонный характер переходного процесса, в котором ни величина отклонения, ни ее производная не меняют знака за время затухания переходного процесса.

### Заключение

Критерий Вышнеградского позволяет найти ответ на вопрос, устойчива или неустойчива данная система регулирования, описанная дифференциальным уравнением третьего порядка, не решая этого уравнения. Для этого необходимо иметь характеристическое уравнение (1), преобразовать его к виду (3) и по формулам (10) вычислить коэффициенты А и В. Если при этом неравенство (11) удовлетворяется, т. е. если система регулирования устойчива, то по значениям коэффициентов А и В можно посмотреть, какой точке на диаграмме Вышнеградского (рисунок 1) это соответствует, и по ней установить, какую форму имеет переходный процесс в рассматриваемом случае.

### Литература

1. Калентионук, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионук. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 376 с.
2. Гизила, Е. П. Расчет устройств автоматики энергосистем / Е. П. Гизила. – Издательское объединение «Вища школа», 1974. – 344 с.

УДК 621.311

**ВВОД РЕЗЕРВОВ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ  
INPUT OF POWER PLANT CAPACITY RESERVES  
DURING FREQUENCY CHANGES**

А.А Бандюкевич

Научный руководитель – А. А. Волков, старший преподаватель.

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

A. Bandziukevich

Supervisor – A. Volkov, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной статье рассматриваются классификация и ввод резервов мощности на электростанциях при изменении частоты.*

***Abstract:** this article discusses the classification and input of power reserves at power plants during frequency changes.*

***Ключевые слова:** энергетика, электростанции, резерв мощности, изменение частоты.*

***Keywords:** energy, power plants, power reserve, frequency change.*

### **Введение**

С увеличением потребления электроэнергии и прогрессирующей автоматизацией процессов, вопросы обеспечения надёжности и стабильности работы электростанций становятся все более актуальными. Одним из ключевых факторов, влияющих на работу электростанций, является изменение частоты сети. Введение резервов мощности является одним из методов решения данной проблемы.

Ввод резервов мощности позволяет:

- сократить длительность работы энергосистемы с пониженной частотой;
- ускорить синхронизацию частей энергосистемы при её разделении;
- уменьшить длительность процесса восстановления значения частоты и продолжительность отключений потребителей устройствами АЧР.

### **Основная часть**

Одним из основных способов повышения надёжности электроэнергетической системы является резервирование. Резерв генерирующей мощности - это разность между располагаемой мощностью системы и её потреблением в определённый момент времени.

По функциональному назначению резерв генерирующей мощности делится на ремонтный и оперативный.

Ремонтный резерв используется для компенсации снижения мощности системы при выводе в плановый ремонт основного оборудования.

Оперативный резерв необходим для устранения небаланса между потреблением и генерацией мощности, вызванного непредвиденным отклонением

нагрузки потребителей.

Оперативный резерв делится на аварийный и нагрузочный. Аварийный резерв необходим для восполнения потери мощности, используемой для покрытия нагрузки при аварийных и неплановых простоях основного оборудования электростанций. Нагрузочный резерв предназначен для компенсации небаланса мощности, вызванного отклонением нагрузки от ожидаемой.

По функциональному назначению следует выделить резерв:

- первой очереди (первичное регулирование частоты);
- второй очереди (вторичное регулирование, время ввода - десятки секунд);
- третьей очереди (вторичное регулирование, время ввода - до 5 минут);
- четвертой очереди (третичное регулирование, коррекция режима и перевод в более надёжное состояние, время ввода - до 15-20 минут);
- пятой очереди (дооптимизации за определённый час работы системы).

При возникновении в системе небаланса мощности, регуляторы скорости турбин за несколько секунд вводят резерв первой очереди. Однако первичное регулирование не обеспечивает поддержания требуемого значения частоты.

Восстановление частоты до требуемого значения обеспечивает вторичное регулирование. В это время, агрегаты, которые участвовали в первичном регулировании, возвращаются в исходный режим работы.

Далее выполняется третичное регулирование (быстрая корректировка режима для перевода системы в более надёжное состояние).

Постепенный ввод и замещение резерва предыдущей очереди даёт возможность обеспечить необходимую управляемость электроэнергетической системы.

Агрегаты ТЭС обладают наибольшей приёмистостью по регулированию мощности агрегатов. Процесс изменения мощности агрегата при аварийном изменении частоты с учётом реакции котла, турбины и их систем регулирования представляет сумму двух процессов (рисунок 1):

- изменения мощности за счёт аккумулированной теплоты (1);
- изменения мощности при подаче топлива (2).

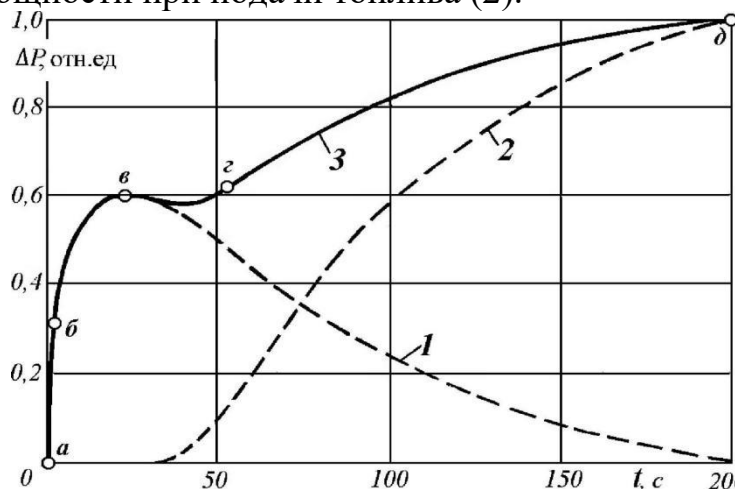


Рисунок 1 - Изменение мощности энергоблока при аварийном снижении частоты

Результирующая кривая (3) состоит из четырёх характерных участков: аб — при быстром открытии регулирующих клапанов турбины мощность

изменяется при одновременном быстром снижении давления перед турбиной. Рост мощности определяется увеличением открытия клапанов в части высокого давления турбины и ограничивается снижением давления перед турбиной;

бв — мощность изменяется монотонно до конечного значения за счёт изменения производительности котла;

вг — давление и соответственно мощность остаются неизменными или несколько снижаются действием топочной части котла;

гд — давление восстанавливается и мощность возрастает по экспоненте постоянной времени котла до установившегося значения.

Агрегаты ГЭС, которые несут нагрузку с резервом мощности, имеют инерционность регулирования гидротурбин намного больше, чем паровых турбин.

В связи с этим, при уменьшении частоты, на многих ГЭС применяются специальные устройства ускорения набора нагрузки (ускорение регуляторов скорости).

Гидроагрегаты, которые работают в режиме синхронных компенсаторов, при уменьшении частоты должны иметь устройства автоматического перевода их в генераторный режим. Ввод их резервной мощности, в зависимости от типа агрегатов, достигается за 10 - 30 с.

Гидроагрегаты, находящиеся в резерве, должны быть в состоянии готовности к немедленному автоматическому пуску из неподвижного состояния с последующим набором мощности. Ввод их резервной мощности, в зависимости от типа агрегата, достигается за 30 - 90 с.

Энергоблоки АЭС обладают достаточно широкими манёвренными характеристиками, обусловленными высокими скоростными показателями системы регулирования ядерного реактора, малым запаздыванием процессов нейтронной кинетики и теплообмена, определяющих изменение мощности энергоблока. Динамические характеристики агрегатов АЭС более благоприятны, чем у блоков ТЭС, удовлетворительное качество переходных процессов при регулировании основных внутри блочных параметров дают возможность привлекать эти агрегаты для управления как нормальными, так и аварийными режимами энергосистем.

Поэтому разработаны различные системы регулирования энергоблоков АЭС как обеспечивающих работу энергоблоков в регулировочном режиме, так и в базисном режиме, не зависящем от уровней изменения частоты.

В первом случае при изменении режимных параметров действием автоматического регулятора мощность реактора изменяется и приводится в соответствие с положением регулирующих клапанов турбины, определяемым действием АРЧВ. Во втором случае мощность реактора в установившемся режиме не зависит от частоты. Она стабилизируется на заданном уровне с помощью автоматического регулятора нейтронной мощности реактора, а режимные параметры поддерживаются с помощью РДС, воздействующих на регулирующие клапаны турбины.

В настоящее время в связи с высокими требованиями радиационной безопасности, АЭС не участвует в первичном регулировании мощности и частоты энергосистемы в нормальных и аварийных режимах. Оперативный резервный

запас мощности на таких станциях, как правило, отсутствует и агрегаты АЭС несут постоянную максимальную нагрузку.

### **Заключение**

Эффективный ввод резервов мощности при изменении частоты на электростанции повышает её надёжность и эффективность, что в свою очередь, обеспечивает более стабильную работу электросистемы в целом. Поэтому, изучение этой темы является важным шагом в обеспечении устойчивости и надёжности энергосистем.

### **Литература**

1. Данильчук, В.Н. Автоматика ограничения изменений частоты энергосистем. Практическое пособие для инженеров по обслуживанию частотных автоматов, блокировок и защит. / В.Н. Данильчук. - Киев: Объединённая энергосистема Украины (ОЭС Украины), 2014. - 440 с.
2. Рабинович, Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем / Р.С. Рабинович. - 2-е изд. перераб. и доп. изд. - М: Энергоатомиздат, 1989. - 352 с.
3. Классификация резервов мощности электроэнергетических систем [Электронный ресурс] / Классификация резервов мощности электроэнергетических систем. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-rezervov-moschnosti-elektroenergeticheskikh-sistem> Дата доступа: 29.04.2023.

УДК 621.311

**ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ  
НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС  
THE EFFECT OF DAMPING  
ON THE ELECTROMECHANICAL TRANSIENT**

А.А. Белоус

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
volkau@bntu.by

A. Belous

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

***Аннотация:** проведен анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы при разных коэффициентах демпфирования.*

***Abstract:** analysis of the dynamic stability of an electric power system at different damping coefficients.*

***Ключевые слова:** устойчивость, анализ системы, коэффициент демпфирования.*

***Keywords:** stability, system analysis, characteristic equation, different damping coefficients.*

### **Введение**

Демпферный коэффициент вводится в уравнение движения синхронной машины в случаях, когда целесообразно упрощенно, без записи дифференциальных уравнений электромагнитных переходных процессов в контурах ротора, отразить влияние этих контуров в режимах асинхронной работы или синхронных электромеханических качаний синхронной машины (СМ).

Демпферный коэффициент связан с механическими и электрическими явлениями. В сложной системе, содержащей несколько несинхронно работающих генераторов, в статоре каждого из них появляются токи и напряжения, содержащие слагающие разных частот.

Эквивалентная мощность демпфирования, отражаемая значением коэффициента  $k_d$  в каждой машине является суммой ряда мощностей [3]:

- 1) обусловленных трением и пропорциональных абсолютной скорости ротора данной машины;
- 2) связанных с действием «собственного момента»;
- 3) вызванных асинхронным эффектом, появляющимся в связи с взаимодействием токов в короткозамкнутых обмотках ротора и результирующего магнитного потока.

### **Основная часть**

Выполним оценку влияния коэффициента  $k_d$  на динамическую устойчивость.

В качестве возмущения для исследования динамической устойчивости примем:

- 1) отключение линии Л4;
- 2) короткое замыкание на линии Л4 вблизи узла 2 и последующее её отключение.

Расчеты проводим в программе Mustang. Исходные данные и результаты расчета исходного установившегося режима представлены на рисунке 1.

Название	N	Код	Устарт	Урасч	dU	Pн0	Qн0	Unorm	Nсхн	Unом	Pr	Qr	Yша	Yшр	Qmin	Qmax
БУ	1	1100	110,00	110,00				110,00		110,00	-72,9	241,2			-5000	5000
	2	11	347,00	324,34	0,4	100,00	80,00	347,00		347,00						
	3	11	347,00	312,94	1,0			347,00		347,00						
	4	11	10,50	8,97	-4,1	120,00	60,00	10,50		10,50						
	5	11	347,00	319,04	3,9			347,00		347,00						
	6	1010	15,75	15,75	7,7			15,75		15,75	400,0	-54,4			-5000	5000
	7	11	347,00	304,61	1,5	95,00	85,00	347,00		347,00						
Г	8	1010	20,00	20,00				20,00		20,00	300,0	193,8			-5000	5000
	9	11	20,00	20,00				20,00		20,00						
СТ	10	1010	17,65	17,65				17,65		17,65	400,0	129,5			-5000	5000

Название Ni	Название Nj	Ni	Nj	Nп	Название R	X	G	B	Kт
	БУ	2	1	Т2	0,190	10,512	6,8	36,6	3,017
		2	3	Л5	3,800	32,300	2,0	-346,0	
		2	5	Л4	5,520	37,720	3,1	-392,1	
		3	4	Т3	2,528	70,079	3,2	11,0	33,048
		3	7	Л3	3,000	32,000	1,5	350,0	
		5	3	Л1	6,000	41,000	3,4	-426,2	
		5	6	Т1	0,042	16,554	7,3	29,9	20,030
	СТ	6	10	СТ		0,163			
		7	5	Л2	38,065	38,065	3,4	-388,7	
	Г	7	8	Т4	0,609	33,112	3,0	13,3	17,350
	Г	9	8	Г		0,340			

Рисунок 1 – Исходные данные и результаты расчета режима

Далее в разделе «Автоматика» моделируем желаемый процесс. Через 0,2 с сработала автоматика, которая отключила линию (рисунок 2).

Стандартные	АЛАР	Программируемые					
Пояснение	N	Логика	Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка
			Т2	Ni	Nj	Nп	Парам1
			Время				
			0,200	2	5		
			Отключить связь				

Рисунок 2 – Ввод действий автоматике

Затем заполним раздел «Генераторы» (рисунок 3).

Название	N	Блок	Uгном	Pгном	COS(φ)	D	Mj/Tj	X'd	X
ЭС	1		110,00					0,399	
Ст	6		15,75	400,00	0,850	18,00	2720,00	0,163	
Г	8		20,00	300,00	0,850	18,00	2100,00	0,340	

Рисунок 3 – Ввод данных о генераторах

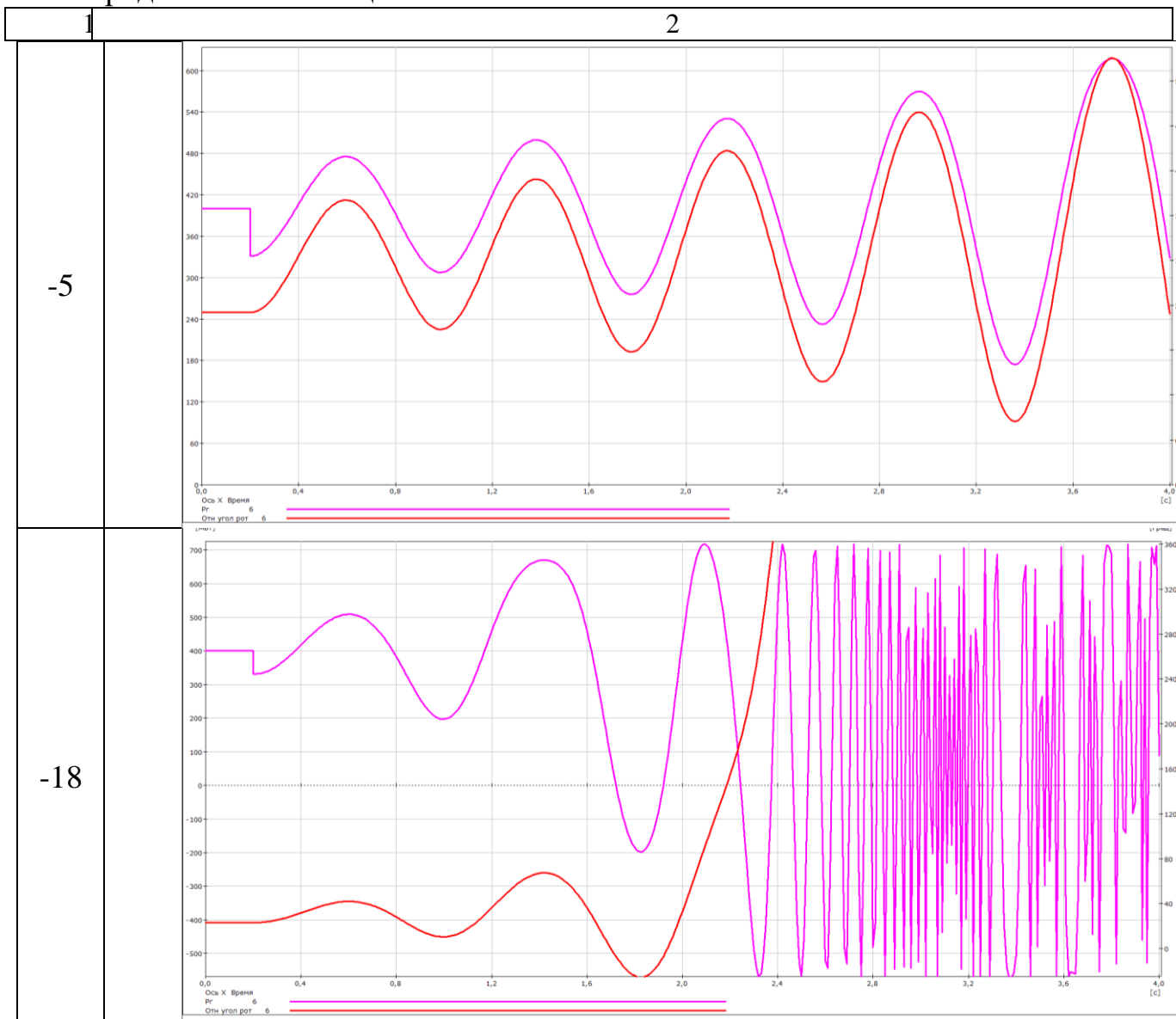
Далее в таблице 1 покажем графики зависимостей  $P_{Г6}$ ,  $\delta_6$  от времени при изменении коэффициента демпфирования.

Таблица 1 – Зависимость  $\delta_6$  и  $P_{Г6}$  от времени при отключении Л4

$k_d$	Характер изменения параметров
1	2
18	<p>The graph for <math>k_d = 18</math> shows the time response of power <math>P_{Г6}</math> (red line) and angle <math>\delta_6</math> (magenta line) after a disturbance. The x-axis represents time in seconds from 0.0 to 4.0. The left y-axis is power in MW (0 to 450), and the right y-axis is angle in degrees (0 to 36). Both variables start at a steady state, then exhibit a transient peak around 0.6s before settling to a new steady state value.</p>
5	<p>The graph for <math>k_d = 5</math> shows the time response of power <math>P_{Г6}</math> (red line) and angle <math>\delta_6</math> (magenta line). The curves exhibit several damped oscillations before settling to a steady state. The oscillations are more pronounced than in the <math>k_d = 18</math> case.</p>
0,001	<p>The graph for <math>k_d = 0,001</math> shows the time response of power <math>P_{Г6}</math> (red line) and angle <math>\delta_6</math> (magenta line). The curves exhibit sustained, high-frequency oscillations that do not decay over the 4-second period shown.</p>



Продолжение таблицы 1



Далее в разделе «Автоматика» моделируем следующее возмущение. Считаем, что в момент времени 0,2 с на линии Л4 вблизи 2-го узла произошло 3-х фазное КЗ. Через 0,2 с сработала автоматика, которая отключила линию (рисунок 4).

Пояснение	N	Логика	Фактор	Ni	Nj	Nп	Уставка	T1	Кв	
			T2	Действие	Ni	Nj	Nп	Парам1	Парам2	Пар
				Время						
			0,100	Шунт	2			0,001		
			0,200	Отключить связь	2	5				
			0,200	Шунт	2			-0,001		

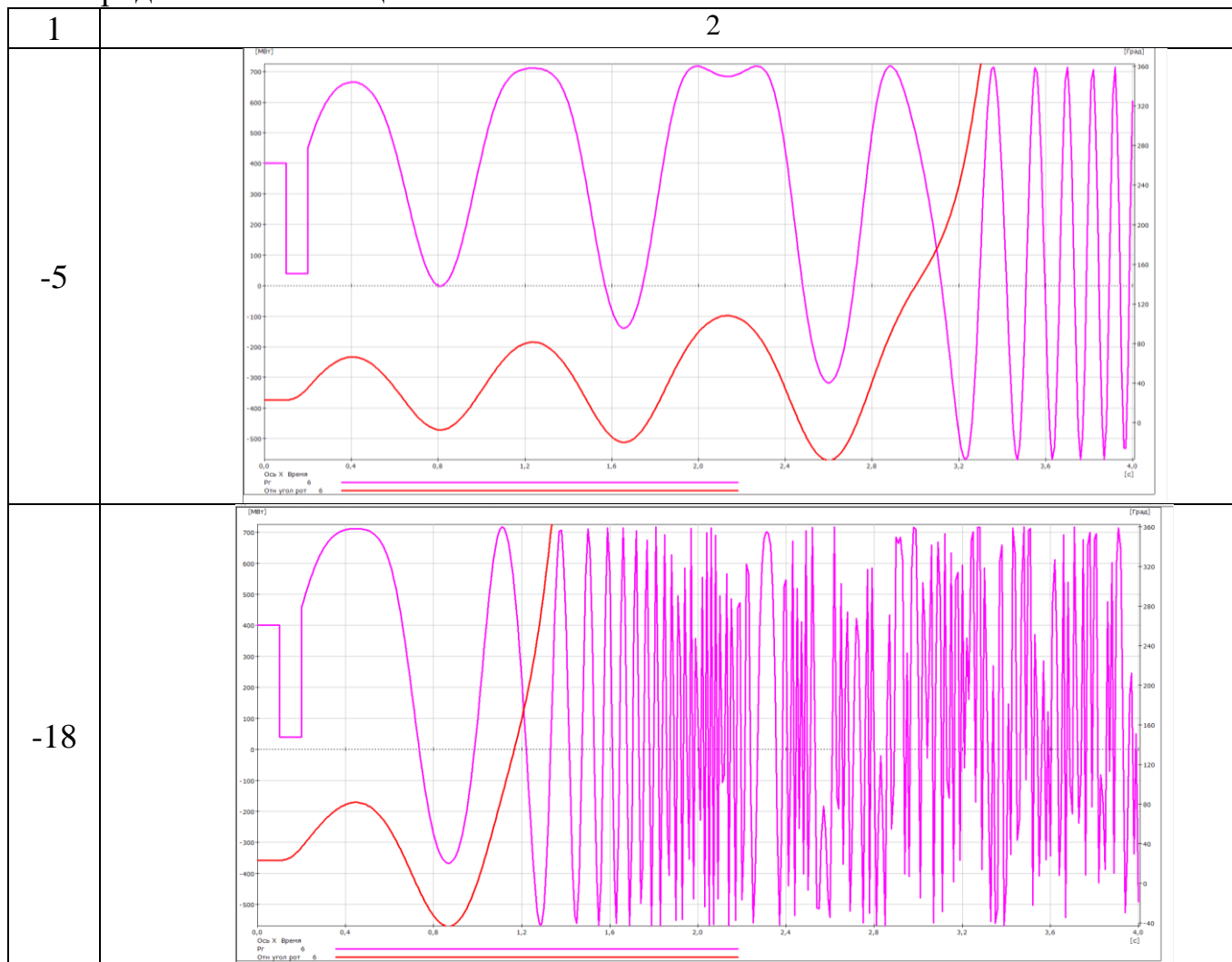
Рисунок 4 – Ввод действий автоматике

Далее в таблице 2 покажем графики зависимостей  $R_{Г6}$ ,  $\delta_6$  от времени при изменении коэффициента демпфирования.

Таблица 2 – Зависимость  $\delta_6$  и  $P_{Г6}$  от времени при КЗ и отключении Л4

$k_d$	Характер изменения параметров
1	2
18	
5	
0,001	

Продолжение таблицы 2



**Заключение**

Изменение коэффициента демпфирования  $k_d$  приводит к изменению характера переходного процесса. При коэффициенте демпфирования  $k_d = 18$  колебания режимных параметров носят затухающий характер. При уменьшении коэффициента демпфирования система теряет устойчивость. Таким образом, демпфирование положительно влияет на устойчивость системы и превращает незатухающие колебания, возникающие при возмущениях в системе, в затухающие. В случае, когда эквивалентный коэффициент демпфирования принимает отрицательное значение, устойчивость системы ухудшается, и любое малое возмущение в такой системе вызывает ее нарушение.

**Литература**

1. Калентионюк, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 376 с.
2. Гуревич, Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. / М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
3. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. – Изд. 4-е. / М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

УДК 621.311

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА И АНАЛИЗА  
УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
USING OF THE CUT-SET MATRIX FOR CALCULATION AND  
ANALYSIS OF THE STEADY-STATE MODE OF  
THE ELECTRICAL SYSTEM**

И.А. Болбат, Е.Ч. Рутько

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

I. Bolbat, E. Rulko

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной работе рассмотрен расчет электрической сети постоянного тока с использованием матрицы сечений и контурной матрицы.*

***Abstract:** in the course of the work the calculation of a DC electrical network using a cut-set matrix and a loop-set matrix is considered.*

***Ключевые слова:** матрица сечений, матрица контуров, закон Кирхгофа, дерево, ветви.*

***Key words:** cut-set matrix, loop-set matrix, Kirchhoff's law, tree, branches.*

### **Введение**

Расчет режима сети матричным методом может осуществляться с помощью различных матриц. Обычно для записи первого закона Кирхгофа используется первая матрица соединений «узлы-ветви». В данной работе мы будем использовать вместо неё матрицу сечений, которая в определенном случае будет обладать следующим преимуществом: для расчёта сетей с большим количеством потребителей нам достаточно знать величину нагрузки только одного общего потребителя или генерацию электрической станции.

### **Основная часть**

Для составления матрицы сечений  $C_{n \times m}$  нужно подготовить граф электрической сети. Визуально нужно выделить определённые сечения по следующим правилам:

- 1) замкнутая кривая пересекает только единственную ветвь дерева и может пересекать сколько угодно хорд;
- 2) при определении сечения нельзя 2 раза проходить через одну и ту же ветвь (хорду);
- 3) замкнутая кривая не должна охватывать часть графа, где находится балансирующий узел.

Пример выбора сечений указан на рисунке 1.

Далее заготавливается таблица, состоящая из  $n$  строк (по числу ветвей дерева) и  $m$  столбцов (по числу ветвей).

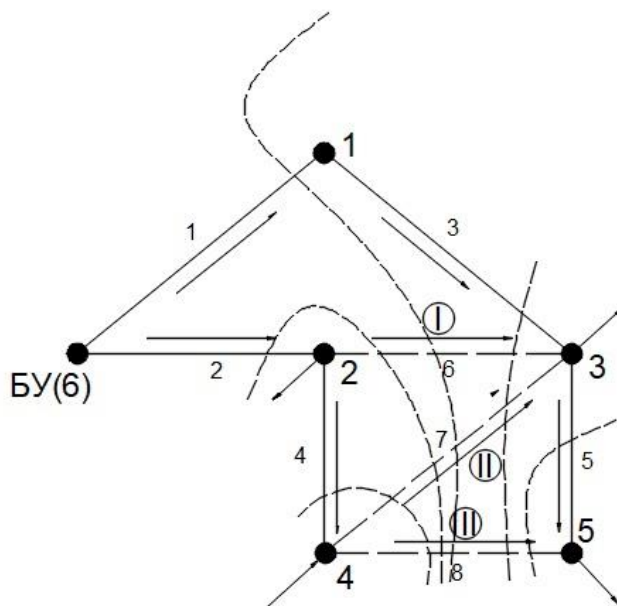


Рисунок 1 - Связанный направленный граф с указанными сечениями

Номер строки матрицы соответствует номеру рассматриваемой ветви дерева  $i$  и следовательно  $i$ -му сечению дерева. Номер столбца  $j$  соответствует номеру рассматриваемой ветви. Элемент  $c_{i,j}$  матрицы, принадлежащий  $i$ -й строке и  $j$ -му столбцу, может принимать одно из трёх значений:  $+1, -1, 0$ :

$c_{i,j} = 1$ , если ветвь или хорда, которое пересекает заданное сечение, входит в  $i$ -е сечение и ориентирована согласно направлению сечения (за положительное направление сечения принимают направление ветви дерева, входящей в него):

$c_{i,j} = -1$ , если ветвь или хорда ориентирована противоположно направлению сечения ;

$c_{i,j} = 0$ , если ветвь  $j$  или хорда не входит в  $i$ -е сечение ;

Правило знаков о направлениях для подтекающих и оттекающих ветвей можно принять любое, но одно для решаемой задачи.

Составим таблицу из пяти строк и восемь столбцов (таблица 1).

Таблица 1 - Матрица сечений

$C_m$ -хорды			$C_n$ -ветви					Ветви Ветви дерева
8	7	6	5	4	3	2	1	
1	0	0	1	0	0	0	0	5
-1	-1	0	0	1	0	0	0	4
1	1	1	0	0	1	0	0	3
-1	-1	-1	0	0	0	1	0	2
1	1	1	0	0	0	0	1	1

Поясним заполнение третьей строки матрицы  $C$  для 3 ветви дерева. Подматрица  $C_n$  - матрица ветвей дерева. Двигаемся с право налево. Сечение для 3-й ветви дерева проходит через 3-ю ветвь,  $c_{n3,3} = 1$ ; все остальные элементы не относятся к этому сечению соответственно:  $c_{n3,1} = 0, c_{n3,2} = 0, c_{n3,4} = 0, c_{n3,5} = 0$ .

Подматрица  $C_m$  - матрица хорд. Кривая “идущая” к этой ветви “задевает” хорды 8, 7, 6, направление токов в этих хордах совпадает с направлением тока в 3-й ветви,  $c_{m3,6} = 1, c_{m3,7} = 1, c_{m3,8} = 1$ .

$$C = [C_m C_n]$$

Составим матрицу  $K_{t \times n}$  «сечения-узлы». Она состоит из  $n$  строк (число сечений) и  $t$  столбцов (число узлов). Номер  $i$ -го узла матрицы соответствует номеру рассматриваемого сечения. Номер  $j$ -го узла матрицы соответствует номеру рассматриваемого узла. Каждая  $i$ -я строка матрицы  $K$  показывает к какому сечению относится заданная в узле нагрузка.

Элемент  $k_{i,j}$  матрицы, принадлежащий  $i$ -й строке и  $j$ -му столбцу, может принимать одно из двух значений: 1, 0:

$k_{i,j} = 1$ , если в  $i$ -ое сечение входит  $j$ -й узел;

$k_{i,j} = 0$ , если в  $i$ -ое сечение не входит  $j$ -й узел;

Таблица 2 - Матрица «сечения-узлы»

5	4	3	2	1	Узлы / Сечение
1	0	0	0	0	5
0	1	0	0	0	4
1	0	1	0	0	3
0	1	0	1	0	2
1	0	1	0	1	1

Поясним заполнение третьей строки матрицы  $K$  для третьего сечения.

В сечение 3 (как видно из рисунка) входят узлы 3 и 5. Следовательно элементы матрицы  $K$  примут значения  $k_{3,5} = 1$  и  $k_{3,3} = 1$ ; все остальные элементы не относятся к этому сечению соответственно:  $k_{3,4} = 0, k_{3,2} = 0, k_{3,1} = 0$ .

Каждая  $i$ -я строка матрицы  $C$  показывает, какие ветви входят в данное  $i$ -ое сечение. Введём в рассмотрение вектор-столбец токов-ветвей  $I_g$ , где  $I_g = [I_m, I_{m-1}, I_{m-2}, \dots, I_1]^T$ . Произведение  $i$ -й строки матрицы  $C$  на вектор-столбец токов  $I_g$  даст алгебраическую сумму токов, находящимся в  $i$ -ом сечении и эта сумма должна быть равна произведению  $i$ -й строки матрицы  $K$  на вектор-

столбец задающих токов в независимых узлах  $J_y = [J_n, J_{n-1}, J_{n-2}, \dots, J_1]^T$ , т.е. получаем выражение 1-го закона Кирхгофа для соответствующих узлов k:

$$\sum_{j=1}^m c_{i,j} I_j + \sum_{j=1}^l k_{i,j} J_{yj} = 0 \tag{1}$$

Если такое выражение выполнить для всех строк матриц C и K, то получим запись 1-го закона Кирхгофа в целом:

$$C \cdot I_e + K \cdot J_y = 0 \tag{2}$$

Для составления матрицы контуров  $L_{m \times l}$  заготавливается таблица, состоящая из m строк (по числу независимых контуров) и l столбцов (по числу ветвей). Здесь нужно понимать, что под независимым контуром называется контур который замыкается одной хордой (рисунок 2).

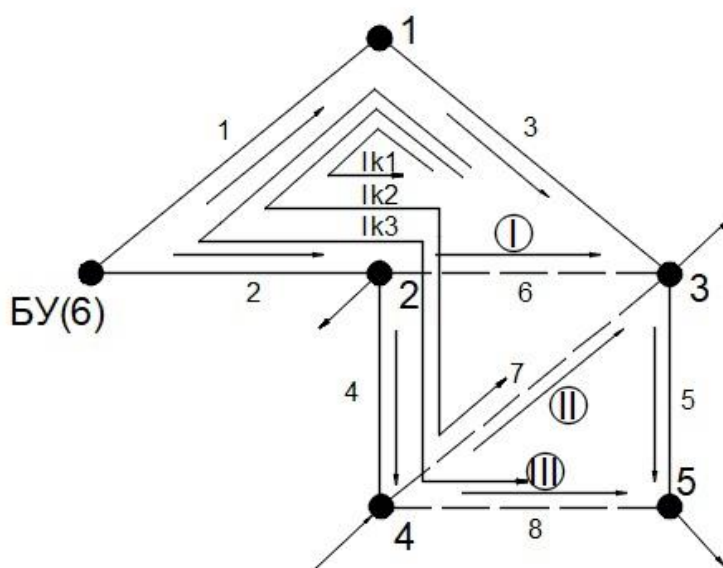


Рисунок 2 – Связанный направленный граф трёхконтурной сети

Номер строки матрицы i соответствует независимому контуру. Номер столбца j соответствует номеру рассматриваемой ветви.

Элемент  $l_{i,j}$  матрицы, принадлежащий i-й строке и j-му столбцу, может принимать одно из трёх значений: +1, -1, 0:

$l_{i,j} = 1$ , если ветвь j входит в состав контура i и их направления совпадают;

$l_{i,j} = -1$ , если ветвь j входит в состав контура i и их направления противоположны;

$l_{i,j} = 0$ , если ветвь j не входит в контур i;

Составим таблицу из пяти строк и восемь столбцов (таблица 3).

Таблица 3 - Матрица контуров

$L_m$ - хорды			$L_n$ -ветви					Ветви Контур
8	7	6	5	4	3	2	1	
1	0	0	-1	1	-1	1	-1	3
0	1	0	0	1	-1	1	-1	2
0	0	1	0	0	-1	1	-1	1

Поясним заполнение первой строки матрицы  $L$  для 1-ого контура дерева. Подматрица  $L_n$  - матрица дерева. 1-я, 3-я ветви дерева входят в состав 1-ого контура, и их направление не совпадает:  $l_{n38} = -1, l_{n36} = -1$ ; 2-я ветвь дерева также входит в состав 1-ого контура и ее направление совпадает:  $l_{n37} = 1$ . Остальные ветви дерева не входят в первый контур, поэтому первую строку подматрицы  $L_n$  завершаем нулями.

Подматрица  $L_m$  - матрица хорд . 1-я хорда дерева входит в состав 1-ого контура, и её направление совпадает:  $l_{m33} = 1$ ; 2-я и 3-я хорды дерева не входят в первый контур, поэтому  $l_{m31} = 0, l_{m32} = 0$

$$L = [L_m L_n]$$

Матрица  $L$  позволяет записать для электрической сети в целом систему взаимно независимых уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

алгебраическая сумма падений напряжений по ветвям замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС или в данном случае равна нулю (отсутствует ЭДС в ветвях):

$$L \cdot U_e = 0 \tag{3}$$

Где  $U_e = [U_m, U_{m-1}, \dots, U_1]^T$  - вектор-столбец падений напряжений на ветвях схемы.

Также 2-ой закон Кирхгофа можно записать основываясь на законе Оме:

$$L \cdot dZ_e \cdot I_e = 0 \tag{4}$$

Далее будет приведён расчёт режима электрической сети по законам Кирхгофа для данного примера. Расчёт режима электрической сети будет выполнен в программе MathCad.

Схема электрической сети содержит 8 линий электропередачи. Известны сопротивления линий и нагрузки в узлах. Номинальное напряжение электрической сети 110 кВ. Напряжение в балансирующем узле 119 кВ.

Составим матрицу коэффициентов системы уравнений состояний сети по законам Кирхгофа:

$$A = \left[ \frac{C}{L \cdot dZ_e} \right] \tag{5}$$



$$A := \text{stack}(C, L \cdot dZ_{\text{в}}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 7.92 & 0 & 0 & -24.824 & 16.218 & -9.72 & 4.356 & -9.072 \\ 0 & 3.025 & 0 & 0 & 16.218 & -9.72 & 4.356 & -9.072 \\ 0 & 0 & 6.93 & 0 & 0 & -9.72 & 4.356 & -9.072 \end{pmatrix}$$

и матрицу  $F$  :

$$F = \begin{bmatrix} K \cdot J \\ Ek \end{bmatrix} \tag{6}$$

где  $Ek$  - вектор-столбец ЭДС ветвей.

$$F := \text{stack}(-K \cdot J, Ek) = \begin{pmatrix} 0.327 \\ -0.536 \\ 0.555 \\ -0.345 \\ 0.555 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Токи в ветвях найдем из выражений (5) и (6):

$$\begin{bmatrix} C \\ L \cdot dZ_{\text{в}} \end{bmatrix} \cdot I_{\text{в}} = \begin{bmatrix} K \cdot J \\ Ek \end{bmatrix} \tag{7}$$

Отсюда находим токораспределение:

$$I_{\text{в}} = A^{-1} \cdot F \tag{8}$$

$$I_{\text{в}} := A^{-1} \cdot F = \begin{pmatrix} 0.269 \\ 0.23 \\ 0.013 \\ 0.058 \\ -0.037 \\ 0.043 \\ 0.166 \\ 0.043 \end{pmatrix} \text{ кА}$$

По найденному токораспределению  $I_{\text{в}}$  и известному напряжению в балансирующем узле  $U_{\text{БВ}}$  далее могут быть найдены падения напряжения на ветвях  $U_{\text{в}}$  и напряжения остальных узлов сети  $U_{\Delta}, U_{\gamma}$ .

**Заключение**

В данной работе был произведен расчет установившегося режима сети матричным методом с помощью матрицы сечений. Полученные параметры при

расчете с помощью другой матрицы, например, первой матрицы соединений, являются идентичными.

Целесообразное использование матрицы сечений проявляется при расчёте сложно-замкнутых и протяженных сетей.

### Литература

1. Применение матричных методов расчёта и анализа режимов электрических сетей: методическое пособие по выполнению курсовой работы и изучению дисциплины «Математические модели в энергетике» для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / Т.А. Шиманская – Семёнова. – Минск: БНТУ, 2010. -158 с.

2. Колос, А. Математические модели систем электрических сетей: заметки к лекциям / Польша – Варшава : Варшавский технологический университет, 2017. – 105 с.

УДК 621.316

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ВКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗОК  
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ. ЧАСТОТНОЕ АПВ  
FREQUENCY RECOVERY AND SWITCHING ON CONSUMER  
LOADS. FREQUENCY AR**

А.И. Васильева

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
volkau@bntu.by

A. Vasileva

Supervisor – A. Volkov, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** рассмотрено средство регулирования частоты в виде АЧР, категории АЧР, восстановление частоты и включение потребителей.*

***Abstract:** a means of frequency control in the form of an AR, an AR category, frequency recovery and consumer inclusion are considered.*

***Ключевые слова:** автоматическая аварийная разгрузка по частоте, восстановление частоты, отключение и включение потребителей.*

***Keywords:** automatic emergency unloading by frequency, frequency recovery, disconnection and switching on of consumers.*

### **Введение**

Установившийся режим энергосистемы характеризуется балансом мощностей. При нарушении баланса происходит изменение частоты системы. Если рассогласование мощностей небольшое, то отклонения получаются незначительные и с этим справляются регулирующие станции системы. Длительная работа с пониженной частотой не допустима и если восстановление частоты не может быть достигнуто нормальными средствами регулирования частоты, то прибегают к АЧР- автоматическая аварийная разгрузка по частоте. Это вынужденное мероприятие заключается в отключении потребителей с целью поддержания частоты энергосистемы близкой к номинальной. Должна применяться если все внутренние резервы системы исчерпаны, а частота продолжает снижаться. Пока частота на уровне 49 Гц и выше не следует прибегать к отключению потребителей.

Разгрузить энергосистему означает не опускать частоту ниже 45 Гц и поднять ее до номинального значения. Разгрузка осуществляется с помощью автоматики и называют аварийной частотной разгрузкой. [1]

### **Основная часть**

Различают несколько категорий АЧР:

1) АЧР1 - быстродействующая разгрузка, имеющая различные уставки по частоте, служит для прекращения процесса снижения частоты;

- 2) АЧРП - медленнодействующая разгрузка с близкими по частоте и разными уставками по времени, служит для подъема частоты после действия устройств АЧРІ;
- 3) дополнительная - действующая при больших дефицитах мощности и предназначенная для ускорения отключения потребителей и увеличения объема отключаемой нагрузки. [2]

Граничные уставки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уставки по времени и частоте

Уставки по	времени		частоте	
	начальная	конечная	верхняя	нижняя
АЧРІ	минимальная (по условиям предотвращения ложной работы реле частоты);		на 0,2 Гц ниже соответствующего верхнего уровня АЧРП;	не ниже 46,5 Гц
АЧРП	5-10 с	60 с	от 48,8 до 48,6 Гц	на 0,3 Гц ниже верхнего уровня
ЧАПВ	10-20 с	Различная исходя из конкретных условий	—	—

АЧРІ нужно для прекращения снижения частоты после возникновения дефицита мощности. При снижении частоты срабатывают очереди разгрузки (1'-6') с более низкими уставками по частоте, а скорость их снижается (рисунок 1). После чего частота становится  $f_{min}$ , которая является минимально допустимой. Действие АЧРІ заканчивается. Ступени уставок по частоте очередей АЧРІ могут быть приняты до 0,1 Гц.

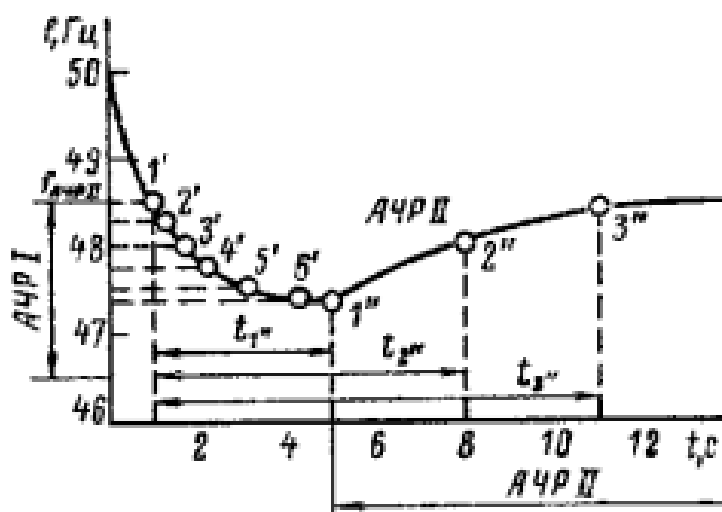


Рисунок 1 – Изменение частоты при действии АЧР

После осуществляется подъем частоты посредством АЧРП, когда глубокое снижение частоты предотвращено. АЧРП начинает действовать при частоте  $f_{\text{АЧРП}}$ , которое примерно равно верхней уставке АЧР и первая очередь сработает через время  $t_1$ " после запуска, вторая — через время  $t_2$ " и т. д. Подъем частоты происходит по экспоненциальному закону. При быстром снижении частоты АЧРП запускаются примерно одновременно и тогда нужно чтобы срабатывание последующих очередей АЧРП происходило после того, как произойдет восстановление частоты в результате работы предыдущей очереди. Так же количество очередей лучше увеличивать, так как требования к уставкам по времени будут менее жесткими.

Восстановление будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнута уставка возврата очередей АЧРП. То есть частота примерно восстановится до 48,6–49,2 Гц с учетом того, что спецмеры не принимаются. В некоторых энергосистемах после действия в АЧР, чтобы восполнить дефицит мощности используют устройства автоматического включения нагрузки по частоте (ЧАПВ), которые осуществляют обратное включение потребителей [2].

К устройствам ЧАПВ подключаются:

- 1) высокоответственные потребители;
- 2) потребители, которые при возникновении дефицита мощности отключаются первыми;
- 3) потребители, которые включаются вручную и требуют большого времени.

Очередность включения потребителей устройствами ЧАПВ должна быть обратной очередности отключения их устройствами АЧР. В дефицитных энергосистемах, где питание можно восстановить включением межсистемной связи, целесообразно увеличивать число ЧАПВ. Тогда при восстановлении параллельной работы энергосистемы с ОЭС можно автоматически восстановить питание всех отключенных потребителей.

Частота после действия АЧР составляет 49 - 49,2 Гц, а уставки по частоте устройств ЧАПВ должны быть несколько больше, что предотвращает дефицит мощности и можно обратно включать потребителей. Для «сильных» связей (параллельная работа с крупной энергосистемой) диапазон уставок ЧАПВ в интервале 49,2 - 50 Гц, а при восстановлении питания по «слабым» связям диапазон уставок ЧАПВ в интервале 49,8 - 50 Гц.

Последовательность срабатывания осуществляется с помощью уставок по времени для одной уставки по частоте. Если же уставки по частоте различны, то для предоставления заданной последовательности потребители с более высокими уставками по частоте выполняются с большими уставками по времени.

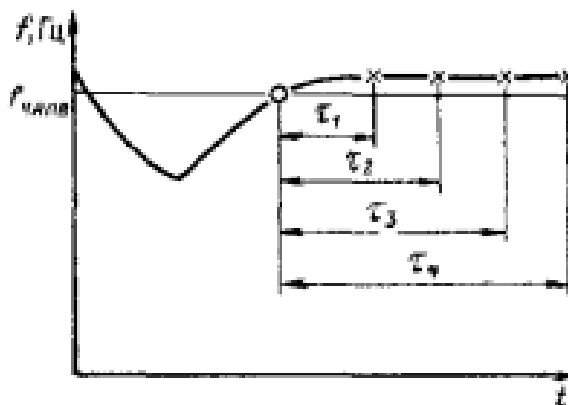


Рисунок 2 – Процесс успешного действия ЧАПВ при ликвидации дефицита мощности

При восстановлении частоты до уставки  $f_{\text{ЧАПВ}}$  начинают срабатывать очереди. Первая очередь сработает через время  $\tau_1$ , вторая — через  $\tau_2$  и т. д. Интервал времени между смежными очередями ЧАПВ составляет не менее 5 с. Он должен превышать время снижения частоты, чтобы исключить срабатывание последующей очереди ЧАПВ, если частота после включения нагрузки повторно стала снижаться. Если  $\tau_1$  такое, что обратное включение произошло раньше, чем дефицитный район синхронизировался с энергосистемой, то действие ЧАПВ приведет к повторному снижению частоты, что может привести к развитию аварии.

**Заключение**

АЧР используется для предотвращения аварий и лавины частоты, который возникает в случае нарушения баланса мощностей. Нужно соблюдать требования к уставкам по времени во избежание аварий.

**Литература**

1. Павлов Г. М., Меркурьев А. Г. Аварийная частотная разгрузка энергосистем. Издательство Северо-Западный филиал АО «ГВЦ-Энергетики» РАО «ЕЭС России», Санкт-Петербург, 1998.—52 с.
2. Р. С. Рабинович. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем /Р. С. Рабинович.— 2-е изд. перераб. и доп. изд.— М: Энергоатомиздат,1989.— 352 с.

УДК 621.311

**РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ВЕТВЕЙ ИЗ СЕТИ  
CALCULATION OF THE PARAMETERS  
OF THE STEADY-STATE MODE OF THE ELECTRICAL NETWORK  
WHEN DISCONNECTING BRANCHES FROM THE NETWORK**

К.Д. Сырцов

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

volkau@bntu.by

K. Sirtsov

Supervisor – A. Volkov, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной работе рассматриваются методы пересчета параметров режима при отключении ветвей из электрической сети.*

***Abstract:** this article examines the methods of recalculation of the mode parameters when disconnecting branches from the electrical network.*

***Ключевые слова:** пересчет режима, электрическая сеть, матрицы, отключение ветвей, методы пересчета.*

***Key words:** mode recalculation, electrical network, matrices, branch disconnection, recalculation methods.*

### **Введение**

При эксплуатации электрической сети могут возникать случаи, при которых требуется отключение её ветвей из цепи. Например, отключения могут производиться при проведении ремонтных работ, при авариях в системе энергоснабжения, в результате плохих погодных условий и т. д. Для того, чтобы определить, является ли возможным вывод рассматриваемых участков электропередачи из работы на длительное время, а также оценить параметры нового установившегося режима, требуется произвести пересчет исходной цепи, учитывая внесенные в нее изменения [1].

### **Основная часть.**

Рассмотрим методы пересчета параметров режима сети на примере некоторой цепи, содержащей 5 узлов и 8 ветвей, с уже известными параметрами передачи (рисунок 1) и разработанным в программе MathCAD алгоритмом расчета.

В качестве примера возьмем случай с отключением из сети ветви №2. Во всех рассматриваемых методах напряжения в узлах сети определим по заданным нагрузкам в узлах с помощью итераций по методу Ньютона. Число необходимых итераций определим из условия, что относительный небаланс мощностей не должен превышать 1% [2].

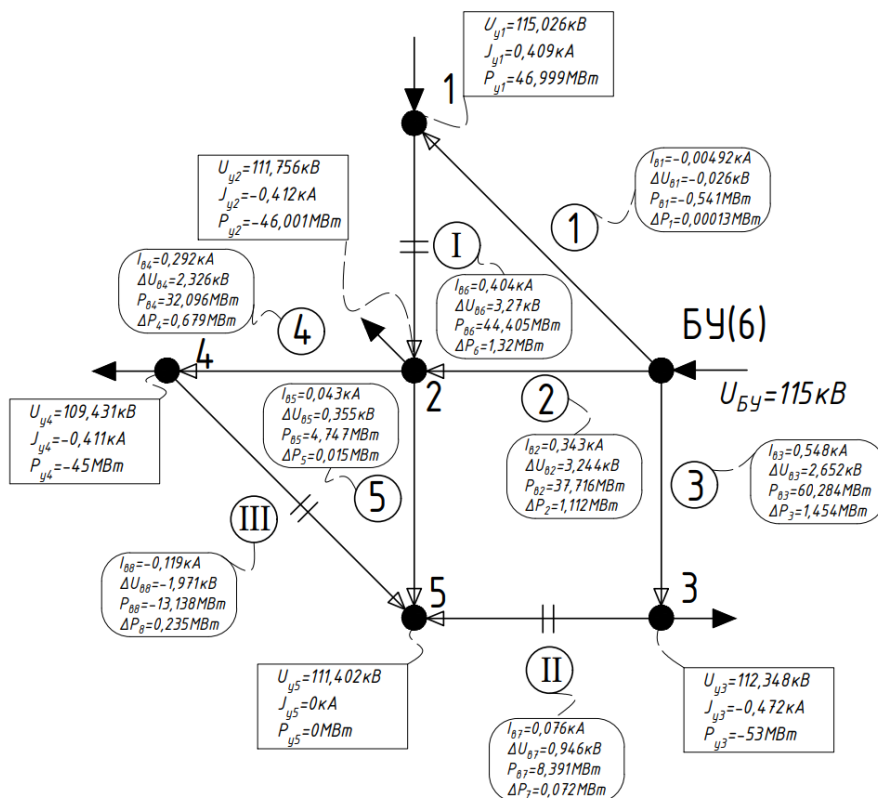


Рисунок 1 - Схема исследуемой цепи с параметрами нормального режима

### 1. Метод пересчета с использованием матриц соединений.

В данном методе столбцы матриц соединений, соответствующие по номеру отключаемой ветви, заменяются столбцами с нулевыми элементами.

Таким образом новые первая и вторая матрицы инциденций примут в рассматриваемом примере следующий вид:

$$M_{\Sigma} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad N = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Далее производится расчет режима, например, по уравнениям узловых напряжений.

### 2. Метод пересчета с использованием параллельной ветви с отрицательным сопротивлением.

В данном методе расчет нового установившегося режима производится согласно схеме замещения цепи, где параллельно выводимой из работы ветви подключают другую ветвь с таким же сопротивлением, но обратным по знаку. При этом, начало и конец обеих ветвей будут совпадать.

Следовательно, для расчета требуется добавить в первую и вторую матрицы инциденций дополнительный столбец, аналогичный столбцу, соответствующему по номеру отключаемой линии. В данном примере:



$$M_{\Sigma} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad N = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Кроме того, необходимо добавить учесть в матрице сопротивлений  $dZ_B$  дополнительный элемент  $-Z_2$ :

$$dZ_B := \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_8 \end{pmatrix}, \text{ Ом.}$$

Линии с сопротивлениями  $Z_2$  и  $-Z_2$  передают одинаковую мощность, но разную по знаку. То есть, они взаимно компенсируют друг друга, что эквивалентно отключению ветви  $Z_2$  в первичной цепи.

С использованием полученных матриц производится дальнейший расчет.

**3. Метод пересчета с использованием бесконечно большого сопротивления.**

Отключенной из сети линии можно поставить в соответствие бесконечно большое сопротивление, включенное между начальным и конечным узлами выводимой из работы ветви. Таким образом, требуется заменить в исходном алгоритме расчета сопротивление отключаемой ветви на бесконечно большое (или значительно большее, относительно других ветвей) и произвести дальнейшие расчеты аналогично ранее записанным:

$$Z_2 = 1 \times 10^{307}, \text{ Ом.}$$

По окончанию пересчета были найдены параметры нового режима по трем вышерассмотренным методам. В каждом из них до достижения необходимой точности потребовалось две итерации.

Результаты, полученные с использованием различных методов, сошлись, что свидетельствует о правильности проделанной работы. Нанесем параметры режима на схему (рисунок 2) для более наглядного представления и произведем анализ.

Определим, насколько изменилось напряжение узлов ( $U_{у.пер}$ ) по сравнению с напряжениями при нормальном режиме работы ( $U_{у.норм}$ ) и определим относительное его отклонение от номинального:

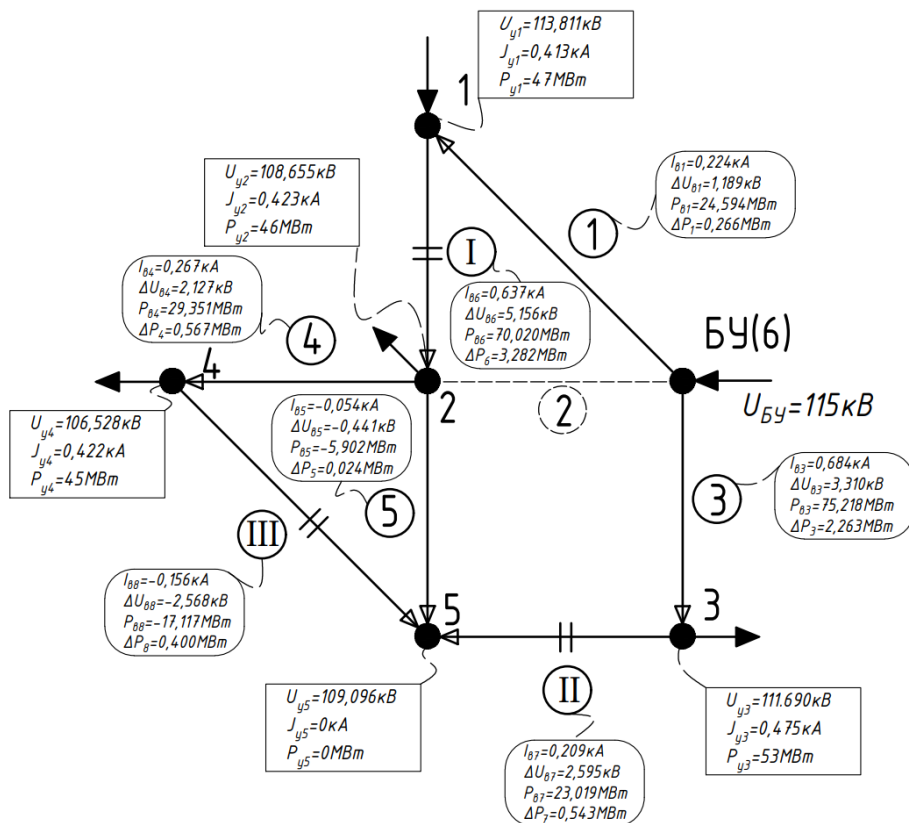


Рисунок 2 - Схема исследуемой цепи с нанесенными параметрами ремонтного режима

$$U_{у.пер} - U_{у.норм} = \begin{pmatrix} -1.215 \\ -3.101 \\ -0.657 \\ -2.903 \\ -2.305 \end{pmatrix}, \text{ кВ}; \quad \Delta U_{\text{откл}} := \frac{U_{у.пер} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = \begin{pmatrix} 3.465 \\ -1.223 \\ 1.536 \\ -3.156 \\ -0.822 \end{pmatrix}, \%$$

Как видно, напряжение в узлах значительно упало, но осталось в пределах допустимых отклонений в 5%.

Проанализируем значение токов в ветвях ( $I_{в.пер}$ ), сравнив их с длительно допустимыми по нагреву значениями ( $I_{д}$ ).

$$I_{в.пер} = \begin{pmatrix} 0.224 \\ 0 \\ 0.684 \\ 0.267 \\ -0.054 \\ 0.637 \\ 0.209 \\ -0.156 \end{pmatrix}, \text{ кА}; \quad I_{д} = \begin{pmatrix} 0.605 \\ 0.39 \\ 0.605 \\ 0.39 \\ 0.39 \\ 0.51 \\ 0.265 \\ 0.33 \end{pmatrix}, \text{ кА}.$$

Линии №3 и №6 оказались загружены током на 113% и 125% соответственно относительно предельно допустимых значений.

Потери мощности в ремонтном режиме ( $\Delta P_{в\Sigma.пер}$ ) возросли в  $k=1,5$  раза относительно потерь нормального режима сети ( $\Delta P_{в\Sigma.норм}$ );

$$\Delta P_{в\Sigma.пер} = 7.345, \text{ МВт};$$

$$\Delta P_{в\Sigma.норм} = 4.888, \text{ МВт};$$

$$k = \frac{\Delta P_{в\Sigma.пер}}{\Delta P_{в\Sigma.норм}} = 1.503.$$

Рассмотренный режим не является длительно допустимым по причине токовой перегрузки линий.

Аналогично рассмотренному примеру можно произвести пересчет режима электрической сети любой конфигурации и сделать выводы о допустимости данного режима.

### Заключение

Отключение ветви из электроэнергетической сети ведет к неизбежным изменениям параметров передачи энергии. Оценить влияние процесса можно с помощью пересчета параметров режима по одному из трех рассмотренных в работе методов. Операции по пересчету удобно выполнять с применением ЭВМ, заменяя определенные вводные данные соответственно выбранному методу. По окончании расчетов, результаты сравниваются с условиями оптимальной работы и делаются заключения о возможных последствиях отключения.

### Литература

1. Гурский, С. К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике / С. К. Гурский. - Минск. : Наука и техника, 1977. – 368 с.
2. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Изд. 2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715 с.

УДК 621.311

**ОПИСАНИЕ ТРЕНАЖЕРОВ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 - 10 КВ  
DESCRIPTION OF OPERATIONAL SWITCHING SIMULATORS  
IN THE 0.4 - 10 KV ELECTRICAL NETWORK**

И.Н. Адамович, В.Ю. Докутович, К.Д. Сырцов  
Научный руководитель – Д.А. Секацкий, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
sekatski@bntu.by

I. Adamovich, V. Dokutovich, K. Syrtsov  
Supervisor – D. Sekatsky, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в данной работе рассматриваются принцип работы, устройство и функции тренажеров оперативных переключений в электрических сетях.*

***Abstract:** this article examines the principle of operation, device and functions of simulators of operational switching in electrical networks.*

***Ключевые слова:** тренажер, обучение персонала, оперативные переключения, компьютерная программа, виртуальная реальность, электрические сети.*

***Keywords:** simulator, staff training, operational switching, computer program, virtual reality, electrical networks.*

### **Введение**

Оперативные переключения в электросети 0,4 - 10 кВ — это процедуры переключения электрических цепей на другие источники питания или отключения их для проведения работ в сети. Переключения нужны для обеспечения надежной, безопасной и устойчивой работы оборудования.

Они могут быть реализованы вручную или автоматически с помощью релейной защиты. В процессе переключения могут применяться разные устройства: выключатели, разъединители, трансформаторы и т. д.

Переключения могут производиться как планоно, так и в экстренных случаях, например, при обрыве цепи или перегрузке. В любом случае, при проведении операторных переключений необходимо соблюдать все требования безопасности и правила работы с электрооборудованием.

Для приобретения навыков оперативных переключений и отработки нестандартных ситуаций целесообразна разработка различных тренажерных программ и систем.

### **Основная часть**

Тренажеры оперативного переключения предназначены для проведения тренировок и экзаменов по плановым или аварийным оперативным переключениям в специально подготовленных тренажерных программах.

После получения данных и выбора инструментов для визуализации можно начать создавать программу, которая будет отображать действия в понятном виде и иметь возможность максимально приблизить к реальному процесс переключений. В целом, разработка тренажера оперативных переключений в электросети является сложным процессом, который требует тщательной подготовки, изучения огромного теоретического материала и постоянного совершенствования, ведь с каждым годом появляется более новое и технологичное оборудование.

Самые распространённые тренажеры, это специальные программы для компьютера. Они содержат в себе некоторые метабазы знаний, в которых описаны основные правила типовых инструкций по переключениям в электроустановках [1, с. 102]. Эти тренажеры можно использовать как в учебных целях и в производственных условиях, так и в проведении конкурсов оперативного персонала диспетчерской службы энергосистем, МЭС, ПЭС и электростанций.

Любой тренажер представляет собой графическую оболочку с разнообразным количеством модулей, которые можно дополнительно внедрять из вне в программу. Каждый модуль - это отдельное устройство электростанций и подстанций, например, устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) [2, с. 340]. Графический редактор встроенный в тренажер позволяет пользователям получить визуальное представление самой схемы и наблюдать процессы происходящий при том или ином выборе.

Рассмотрим типовой российский тренажер TWR 12. По нынешнее время он разрабатывается и дополняется новыми функциями. Этот тренажер позволяет моделировать энергообъекты различного уровня – от городских и распределительных сетей до электростанций и энергосистем.

Предназначен тренажер для:

- диспетчеров ЦДУ, РРС, ОДУ, РДУ, МЭС, МРСК, ПЭС;
- дежурных подстанций ОВБ;
- сотрудников электроцехов электрической станции;
- диспетчеров распределительных и городских сетей;
- сотрудников энергетических служб промышленных предприятий, железной дороги и т. д.

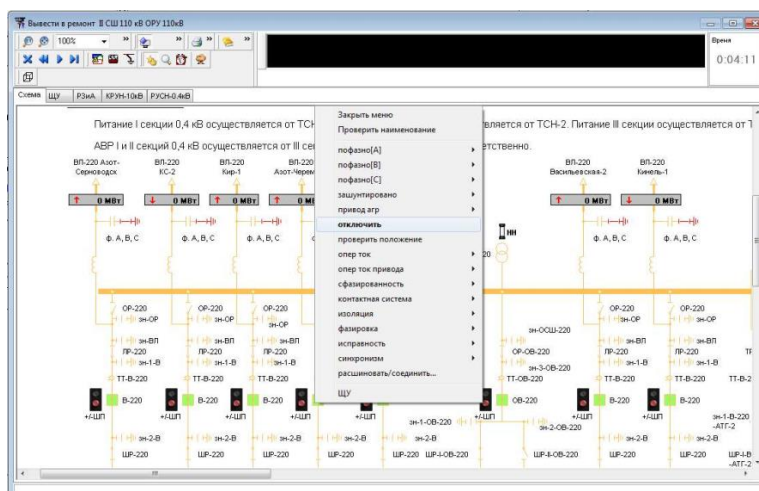


Рисунок 1 - Интерфейс тренинга

У этого тренажера есть графическая оболочка в виде электронного макета (рисунок 1), представляющего схему энергообъекта или сети энергоснабжения, панелей релейной защиты и автоматики, изображения щитов управления, а также анимированных изображений реального основного оборудования ОРУ, ячеек КРУ, моделей АРМ и терминалов микропроцессорных защит [1, с. 102].

В нем есть как набор готовых тренингов, так и есть графический редактор для симуляции реальных энергообъектов.

TWR 12 имитирует следующие виды работ [1]:

- Коммутации (Работа на открытом распределительном устройстве);
- Управление оборудованием (выключателем и др.);
- Работа с релейной защитой и автоматикой (рисунок 2);
- Проверка исправности оборудования, показаний приборов;
- Выполнение действий через АРМ.

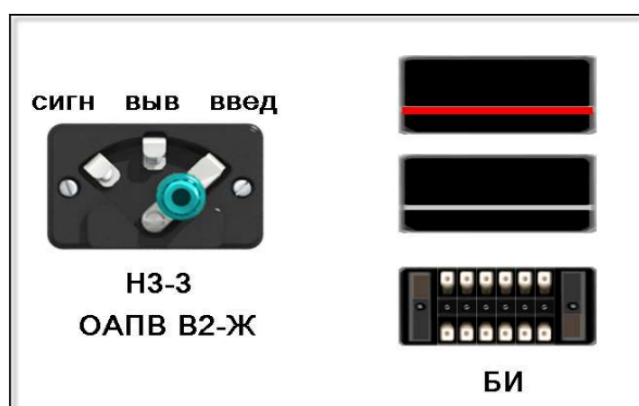


Рисунок 2 - РЗиА

Тренажер имеет несколько режимов: создание тренировки, редактирование тренировки, проведение теста (с возможностью вывода подсказок), тренировка с оценкой [1, с. 103].

Проблемы большинства тренажеров - это наглядность и осязаемость. Однако благодаря развитию технологий эти проблемы частично решены: с помощью видео и аудио дорожек элементов схемы (модулей).

Для начала тренинга необходимо, сначала создать этот тренинг в графической оболочке программы с помощью модулей. Ввести все параметры элементов схемы, смоделировать аварию, отключением некоторых модулей или смоделированием поломок в модулях и расставить правильный порядок переключения элементов схемы.

В этом и есть еще одна проблема тренажеров: они не могут сами точно определить, что необходимо сделать при аварии. Тренажер может лишь примерно понять в чем проблема, но точных ответов не выводит. Для решения этой проблемы можно подключить отдельный модуль с искусственным интеллектом (ИИ), который будет продолжать обучаться при обучении персонала. Достигаться это будет путем создания тренировочных схем персоналом и порядком отключения, которое запрограммировал специалист по оперативным переключениям. По этим схемам будет обучаться ИИ. Так как на данный момент мы живем в период развития цифровых технологий, то ИИ можно подключить к другим электростанциям через интернет и объединить в один сервер. Такой ИИ

сможет в будущем создавать, проверять и возможно даже заменить человека в простых процедурах оперативного переключения.

Несмотря на то, что тренажеры постоянно совершенствуются и позволяют довольно точно смоделировать оперативные переключения, существует ряд недостатков, которые значительно снижают эффективность обучения [3, с. 55].

Первым и главным недостатком является не адекватное отражение манипуляций, производимых над щитами управления и схемами распределительных устройств из-за использования примитивной 2D графики.

Во-вторых, большинство операций могут быть произведены в пару кликов мыши, в то время как в действительности они занимают больше времени и усилий. К примерам таких операций можно отнести вывеску плакатов, проверку и использование средств индивидуальной защиты, перемещение по энергообъекту (навигация).

В-третьих, конфигурация интерфейса программного обеспечения тренажера может служить как подсказка к последующим действиям и, как следствие, упрощать задачу обучаемому, снижая эффективность обучения.

Ввиду всех этих недостатков можно заключить, что используемые в повсеместной практике тренажеры формируют по большей части теоретическое представление о переключениях, при этом полностью отсутствует эффект присутствия, что может привести к непредсказуемым действиям персонала в настоящей нештатной ситуации. Существующие тренажеры более подходят для диспетчеров. Для электромонтеров же необходимо проводить более наглядные тренировки, отражающие их непосредственные задачи, где, в первую очередь, оттачиваются умение быстрого и безошибочного действия согласно бланкам переключений.

В связи с развитием технологий виртуальной реальности (VR) актуальной стала возможность их использования в том числе в сфере энергетике [3, с. 56]. VR-тренажеры позволяют создать виртуальные прототипы, полностью соответствующие реальным энергообъектам, а, благодаря таким новейшим разработкам, как VR-шлемы, 3D-кубы, достигается полное погружение в процесс обучения и устраняются недостатки, приведенные выше. Поэтому, всё более часто VR-технологии используются как средство обучения и тренировки оперативного и оперативно-ремонтного персонала подстанций.

Существующие на сегодняшний день тренажеры позволяют создавать различные сценарии, затрагивающие широкий спектр задач, и включают следующие виды сценариев [4, с. 31]:

- 1) сложные оперативные переключения с большим количеством действий, осуществляемых по бланкам задач: вывод в ремонт трансформаторов, линий электропередач и т. д.;

- 2) операторные переключения при возникновении нештатной ситуации: короткого замыкания на линии, выхода из работы выключателя и пр.;

- 3) сценарии допуска: подготовка рабочего места в соответствии с правилами техники безопасности, осмотр места проведения аварийно-восстановительных работ и т. д.

Тренажер виртуальной реальности (рисунок 3) в общем случае включает в себя следующие элементы [5, с. 8]:

1) персональный компьютер с машиночитаемым носителем (включает в себя монитор 16 и системный блок рабочей станции тренажера 15). Он отвечает за логическую часть тренажера и содержит графическую трехмерную оболочку. Логическая часть в свою очередь включает модуль защиты, модуль оценки, модуль расчета режима и коммутационный модуль.

2) периферийные устройства, подключаемые к ПК и обеспечивающие навигацию в виртуальной среде. К ним относятся VR-шлем (11), джойстики, инфракрасная камера (13), трекеры мелкой моторики и положения рук (12) и специальная беговая дорожка (14).

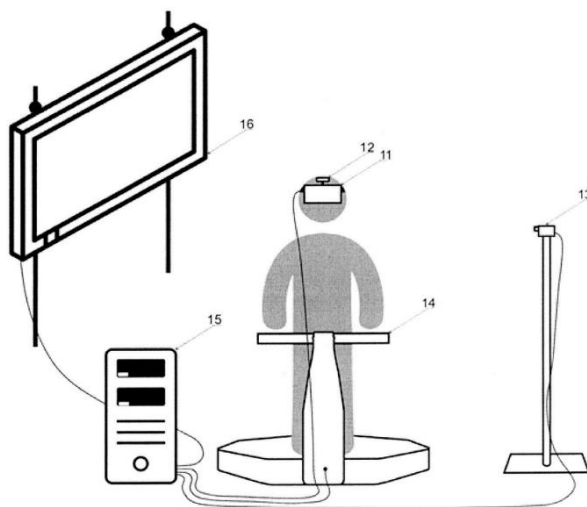


Рисунок 3 - Принципиальная схема тренажера

Способ тренировки может быть описан следующим алгоритмом [5, с. 5]:

1) посредством программного обеспечения создается визуализация макета подстанции;

2) обучаемый, взаимодействуя с прототипом подстанции через периферийные устройства (рисунок 4), выполняет оперативные переключения на тренажере согласно полученным бланкам по оперативным переключениям (в зависимости от сценария);

3) логическая часть тренажера производит пересчет режима и производит оценку действий оператора, а затем передает результаты в графическую оболочку тренажера.

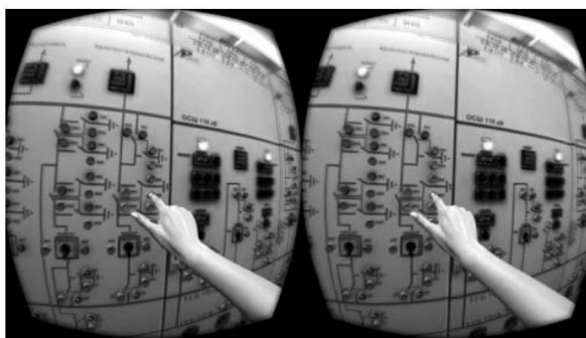


Рисунок 4 - Вид щита управления через шлем виртуальной реальности



### **Заключение**

Таким образом, VR-тренажеры являются наилучшими и наиболее перспективными тренажерами, разработанными на сегодняшний день. Помимо гарантии безопасности обучающегося во время тренировки и исключения возможности повреждения материальных объектов во время выполнения работ, они позволяют наиболее точно и достоверно воссоздать ситуации, возможные в действительности. Эффект погружения обеспечивает максимальную эффективность обучения и вовлеченность обучающихся в процесс.

На данный момент существует небольшое количество готовых технологических решений, однако с появлением универсальных программ применение данных тренажеров будет значительно более широким.

### **Литература**

1. Г.В. Меркурьев. Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами/ Г.В. Меркурьев. // Методическое пособие: Санкт-Петербург, 2002. – С. 102-06
2. Оперативное управление в энергосистемах: учеб. пособие / Е.В. Калентионок, В.Г. Прокопенко, В.Т. Федин; под общ. ред. В.Т. Федина. – Минск: Выш. Шк., 2019. -351 с. : ил.
3. Новые подходы к тренировкам оперативного персонала подстанций / Насыров Р. Р. [и др.] // Электричество. - 2015. - № 8. - С. 52-58.
4. Виртуальный тренажер оперативных переключений / Насыров Р. Р. [и др.]. // Электричество. - 2016. - № 3. - С. 27-32.
5. Тренажер оперативного и эксплуатационного персонала на основе моделей виртуальной реальности трансформаторной подстанции // Описание изобретения к патенту // Федеральная служба по интеллектуальной собственности 2016.

УДК 620.92

## АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМАССЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ THE RELEVANCE OF THE USE OF BIOMASS IN THE ENERGY SECTOR

П.Е.Касатая, А.С.Мелькова

Научный руководитель – Е.А.Кравчук, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

P.Kasataya, A.Melkova

Supervisor – E.Kravchuk, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** Потребность в энергии постоянно растет, что приводит к необходимости поиска новых методов ее получения. Все большую популярность приобретают возобновляемые источники энергии, ведь они позволяют производить энергию, не загрязняя окружающую среду. В данной статье мы рассмотрим такой возобновляемый источник энергии, как биомасса. Определим, как биомассу используют в энергетике, почему она является актуальным источником энергии и насколько ее использование перспективно.

**Abstract** The need for energy is constantly growing, which leads to the need to find new methods of obtaining it. Renewable energy sources are becoming increasingly popular, because they allow you to produce energy without polluting the environment. In this article, we will consider such a renewable energy source as biomass. We will determine how biomass is used in the energy sector, why it is an actual source of energy and how promising its use is.

**Ключевые слова:** биомасса, топливо, биоэнергетика, парниковые газы, утилизация, декарбонизация.

**Keywords:** biomass, fuel, bioenergy, greenhouse gases, recycling, decarbonation.

Биомассой называют возобновляемый источник энергии, который получают путем сжигания древесины, растений и других органических материалов, таких как навоз или бытовые отходы. Они выделяют углекислый газ при сгорании, но значительно меньше, чем ископаемое топливо. Даже дымовые газы, содержащие метан, можно использовать в качестве источника энергии из биомассы. Биомасса может использоваться для производства топлива, выработки электроэнергии и производства продуктов, которые в противном случае производились бы из ископаемого топлива.

Биомасса была крупнейшим источником общего годового потребления энергии в США до середины 1800-х годов [1]. Она всё ещё продолжает оставаться важным топливом во многих странах, например, для приготовления пищи и отопления.

Биомасса является широко доступным источником энергии. Источниками являются сельское хозяйство, лесное хозяйство, рыболовство, водоросли и отходы. Многие эксперты в области энергетики сходятся во мнении, что при сочетании экономического и экологического характера источников энергии биомасса занимает первое место в списке как один из лучших источников энергии.

Во многих странах биоэнергетика используется для сокращения использования ископаемого топлива и повышения надежности снабжения, сокращения выбросов парниковых газов и создания новых рабочих мест. Современная биомасса может быть дороже ископаемых ресурсов, однако есть свидетельства того, что они могут иметь значительные негативные экологические и социально-экономические последствия.

В больших масштабах биомасса производит меньше выбросов, чем сжигание угля. Но ни одна система генерации не является полностью безуглеродной, а некоторые системы производства менее устойчивы, чем другие. Однако в действительности нет никаких реальных причин, по которым это производство не может быть устойчивым. Более важными являются вопросы о том, откуда именно поступает топливо, как оно производится и транспортируется, и сколько углерода выделяется по пути.

Очевидно, что биологические источники будут играть важную роль в будущем энергетике, однако существуют различные мнения о том, как это должно происходить. Но когда биомасса берется из источников отходов, она может оказаться убедительной частью системы управления отходами. Анализ цепочек поставок и долгосрочный взгляд на ситуацию будут иметь решающее значение для обеспечения того, чтобы биомасса была максимально устойчивым вариантом.

Энергия биомассы поддерживает сельскохозяйственную и лесопромышленную отрасли. Основным сырьем для производства электроэнергии являются отходы бумажных фабрик, обрезки пиломатериалов и отходы, образующиеся в результате деятельности домашних хозяйств. Для производства топлива из биомассы сегодня чаще всего используется зерно кукурузы (для этанола) и соевые бобы (для биодизеля). В ближайшем будущем планируют также использование сельскохозяйственных отходов, таких как кукурузный жом и пшеничная солома. В долгосрочных планах - выращивание и использование специальных энергетических культур, таких как быстрорастущие деревья и травы, а также водоросли. Эти виды сырья могут устойчиво произрастать на землях, которые не будут поддерживать интенсивное выращивание продовольственных культур.

Биомасса имеет множество преимуществ, главным из которых является то, что она не может быть истощена, как ископаемое топливо. При изобилии растений на Земле биомасса может стать основным источником возобновляемой энергии, которая используется в качестве устойчивой альтернативы ископаемому топливу. Также одним из преимуществ является то, что она может быть получена на месте, что способствует как безопасности поставок, так и их низкой цене.

Энергия биомассы помогает очистить нашу окружающую среду. Население мира постоянно увеличивается с увеличением количества отходов, которые необходимо правильно утилизировать. Многие отходы попадают в водные ресурсы, нанося вред экосистемам и оказывая негативное влияние на здоровье человека. Этот мусор можно было бы использовать для повышения ценности и производства энергии, биоудобрений и других продуктов.

Биомасса считается возобновляемым источником энергии. Деревья поглощают углекислый газ из атмосферы и превращают его в биомассу, а когда они умирают, он выбрасывается обратно в атмосферу. Независимо от того, сжигаются ли деревья или разлагаются ли они естественным путем, они выделяют в атмосферу одинаковое количество углекислого газа. Идея состоит в том, что, если деревья, собранные в качестве биомассы, пересаживать так же быстро, как древесина сгорает, новые деревья поглощают углерод, образующийся при сгорании, углеродный цикл теоретически остается в равновесии, и в атмосферный баланс не добавляется дополнительный углерод, поэтому биомасса, возможно, считается «углеродно-нейтральной» [2].

Биоэнергетика является важной опорой декарбонизации при переходе от энергии к топливу с почти нулевым уровнем выбросов. Биоэнергия полезна, потому что существует гибкость в контекстах и секторах, в которых она может использоваться, от твердой биоэнергии и биогазов, сжигаемых для производства электроэнергии и тепла в домах и на промышленных предприятиях, до жидкого биотоплива, используемого в автомобилях, кораблях и самолетах. Биоэнергия поступает из множества различных источников. Однако чаще всего её получают из специально выращенных сельскохозяйственных культур или деревьев в процессе, требующем больших затрат земли по сравнению с другими формами энергии. Неустойчивое производство биоэнергии может иметь социальные последствия, такие как влияние на цены на продукты питания и конкуренцию за землепользование, а также негативные внешние эффекты, такие как ухудшение биоразнообразия и чистое увеличение выбросов.

### Литература

1. Объяснение биомассы [Электронный ресурс]. <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>. Дата доступа: 16.04.2023.
2. Is Biomass Really Renewable? [Электронный ресурс]. <https://news.climate.columbia.edu/2011/08/18/is-biomass-really-renewable/>. Дата доступа: 16.04.2023.

УДК 620.92

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД К НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ  
ENERGY TRANSITION TO LOW-CARBON ENERGY**

А.С.Мелькова, П.Е.Касатая

Научный руководитель – Е.А.Кравчук, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A.Melkova, P.Kasataya

Supervisor – E.Kravchuk, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** В современном мире колоссальными темпами развивается промышленность, что негативно влияет на устоявшиеся экосистемы и климат. Чтобы снизить это влияние необходимо постепенно перейти к низкоуглеродной энергетике. В данной статье мы рассмотрим, что такое низкоуглеродная энергетика, основные технологии осуществления энергетического перехода, как разные страны и фирмы изменили свою стратегию в пользу этого перехода и к каким последствиям это приведет.

**Abstract:** In the modern world, industry is developing at a tremendous pace, which negatively affects established ecosystems and the climate. To reduce this impact, it is necessary to gradually switch to low-carbon energy. In this article, we will look at what low-carbon energy is, the main technologies for implementing an energy transition, how different countries and firms have changed their strategy in favor of this transition, and what consequences this will lead to.

**Ключевые слова:** низкоуглеродная энергетика, энергетический переход, солнечная энергетика, литий-ионные аккумуляторы, водород.

**Keywords:** low-carbon energy, energy transition, solar energy, lithium-ion batteries, hydrogen.

Низкоуглеродная энергия – тип энергии, заменяющий высокоуглеродную энергию, который относится к энергопродуктам с низким или нулевым выбросом парниковых газов. Внедрение такой энергетике требует инноваций в промышленной системе. Это означает сокращение выбросов тепловой энергии, промышленное энергосбережение и энергосбережение в зданиях, энергосберегающие материалы и т.д. Развитие низкоуглеродной энергетике имеет прямое отношение к развитию чистой энергии, включая энергию солнечную, ядерную энергию, энергию биомассы и ветра.

В наше время на ископаемое топливо приходится около 70% парниковых газов, что является одной из причин изменения климата. Эти выбросы необходимо резко сокращать, однако все больше и больше энергии требуется обществу в связи с ростом населения, благосостояния и урбанизации. Некоторые страны уже имеют низкоуглеродную экономику. Чтобы избежать изменения климата, государства, имеющие высокую плотность населения и углеродоемкие экономики, должны стремиться к нулевому уровню выбросов углерода.

Энергетический переход является сложным комплексным явлением, которое предполагает повышение энергоэффективности, сокращение добычи ресур-

сов, развитие цифровых технологий. Переход повлияет на трудовые ресурсы: по некоторым оценкам к 2050 году более 100 миллионов человек будут работать в сфере возобновляемых источников энергии, Хотя мировой ВВП из-за этого и увеличится на 2,5 %, страны, которые сейчас зависят от ископаемого топлива, будут испытывать проблемы в занятости кадров.

Чтобы преодолеть возможные риски при энергетическом переходе, стоит обеспечить его устойчивость. Устойчивость энергетического перехода – это его способность поглощать, восстанавливаться и адаптироваться к сбоям и продолжать идти по пути обеспечения безопасного, устойчивого, доступного и инклюзивного низкоуглеродного будущего [1]. Для достижения устойчивости должны быть вовлечены все слои общества, откорректированы законы и политика.

На сегодняшний день одной из наиболее перспективных отраслей считается солнечная энергетика. Многие компании вкладывают средства, как и в расширение производственных мощностей, так и в разработки и исследование новых технологий. Однако большим недостатком солнечной энергии является её зависимость от погодных условий, из-за чего нельзя гарантировать стабильную подачу тока. Одним из вариантов решения такой проблемы может быть технология накопления энергии, но для этого необходимо дорогое оборудование в виде мощных аккумуляторных батарей.

Сейчас лидерами среди производства аккумуляторов являются литий-ионные аккумуляторы. Китай добился значительных успехов в этой области, и он вкладывает значительные средства в НИОКР, в том числе в альтернативную химию для достижения максимально низких затрат и высокой емкости батарей. Например, AmpereX, один из крупнейших производителей таких аккумуляторов, занимается строительством центра для разработок батарей стоимостью 450 млн долл.

Наблюдается конкуренция между Китаем, США и Европейским союзом. Страны, члены ЕС, активно делают финансовые вложения в эти технологии. Активно разрабатываются планы не только по улучшению методов создания, но и по экологичной утилизации.

Пандемия COVID19 ускорила процесс создания литий-ионных аккумуляторов. По данным 2020 года общее количество гигафабрик<sup>1</sup> в мире составляет 181 (из них в Китае – 136, в США – 10, в Европе – 16). Увеличение масштабов производства аккумуляторов приводит к уменьшению цены на них.

Но в последнее время тенденция по снижению цен приостановилась, это связано с тем, что около 70% всех затрат при производстве, составляют затраты на сырье. То есть возникает прямая зависимость от добычи необходимых минералов (никель, литий, кобальт, медь, марганец, графит). В связи с этим ученые считают, что в будущем привлекательность такой технологии снизится. Более перспективным выглядит создание конструкций с использованием цинка, натрия или ванадия.

В современном мире страны все больше стремятся к нулевому показателю выброса парниковых газов, и все большую симпатию завоевывает водород в качестве энергоносителя для декарбонизации труднодоступных для электрифи-

кации секторов, например, тяжелой промышленности и дальнемагистрального транспорта.

Водород стабильнее ветра и солнца, так как он может обеспечить снабжение энергией и теплом в любое время, не зависимо от природных условий. А также водородная энергетика является экологически чистой, а ее цена при массовом использовании снизится и станет вполне доступной. Если аккумуляторы обеспечивают хранение энергии ограниченное время, то для водорода этой проблемы не существует. Так же в отличие от газа и нефти его можно производить в любой точке мира.

Эксперты считают, что место водорода в промышленной революции очень значимо и он сможет повлиять на трансграничные цепочки создания стоимости. По недавним расчетам, к 2050 году водородная энергетика сможет удовлетворить более 18% всех потребностей в энергетике. А продажи такого оборудования как водородные заправочные станции, электролизеры, топливные элементы будут составлять 2,5 трин долл в год и создадут 30 млн рабочих мест.

Уже сейчас ряд стран, таких как, например, Корея, Германия, Япония готовятся стать крупными импортерами водорода, который в свою очередь будет экспортироваться из Омана, Австралии, Марокко и Чили и тд. Это внесет изменение в установившуюся географию торговли энергоносителями.

Существуют разные способы получения водорода, а именно: «серый», «зеленый» и «голубой».

«Серый водород» является ископаемым топливом, следовательно, он оставляет углеродный след. А это как раз то, от чего весь мир хочет отказаться.

«Голубой водород» производят из угля или газа, и он также оставляет углеродный след (5-15%), однако этот способ получения водорода считается наиболее приемлемым, и он спокойно конкурирует с «зеленым водородом».

«Зеленый водород» - самый перспективный из трех способ, так как производится с помощью возобновляемых источников энергии. И, если цены на эти источники будут доступными, то у этого способа есть все шансы добиться нулевых выбросов CO<sub>2</sub>.

На теперешний день, Китай – самый крупный производитель водорода. Больше всего он производит «серого водорода», который используется как сырье на заводах аммиака. Сейчас стремятся к разработке водородных аспектов на основе возобновляемых источников энергии, что должно привести к увеличению доли производимого «зеленого водорода», так как на данный момент она составляет лишь 3%. Китай также старается коммерциализировать транспортные средства, работающие на водородных топливных элементах, с целью уменьшения растущей зависимости от поставок нефти.

Европейский союз, соперничающий с Китаем в этой области, запустил «Водородную стратегию», общая стоимость которой 470 млрд евро. Одна из целей этого проекта – это использование «зеленого водорода» в тяжелой промышленности. Чтобы экспортировать водород в ЕС, европейским промышленным альянсом был разработан план по строительству одного электролизера мощностью 40ГВт в Европе и еще одного такого же в соседних регионах. Практически все страны ЕС предусматривают выделения достаточно крупных сумм

на водород, но мнения насчет того, какой метод его производства расходятся. Например, Нидерланды и Норвегия предпочитают «голубой водород», а Германия с Францией – «зеленый». Не отстает и Россия и в 2020 год утверждает «дорожную карту» по развитию водородной энергетики в стране до 2024 года[2]. В этот план действий входит создание опытных полигонов для производства водорода, а также развитие атомноводородной энергетики.

Водород перспективен в абсолютно разных областях. Так им интересуются в производстве оборудования (компрессоров, электролизеров, регуляторов, клапанов, кранов и тд), в авиастроении, автомобильной промышленности и тд. Среди компаний, которые инвестируют в водородную энергетику, такие компании как Hydrogenics, ITM Power, Siemens, Ballard Power Systems, Swagelok и Nel Hydrogen. Некоторые большие компании, например, SSAB и Primetal Technologies проводят эксперименты с водородом, чтобы заменить им ископаемое сырье в доменных печах. Опасаясь, что спрос на природный газ снижается, компании, занимающиеся транспортировкой этого газа, инвестируют в водородную энергетику. Когда добывается и перерабатывается углеводороды, остается углеродный след, с чем активно борются добывающие компании. Для уменьшения этого следа компании начинают также инвестировать в «зеленый» водород.

Исходя из приведенной выше информации можно сделать вывод, что энергетический переход уже начал происходить, однако для его завершения, потребуется изменение многих устоявшихся мировых систем. Стоит задача провести эти изменения, при этом максимально сократив возможные риски.

### Литература

1. Иванова Н. А. Переход к низкоуглеродной экономике: особенности и дальнейшее развитие. 2022.
2. Коданева С. И. Перспективы устойчивого развития: переход к низкоуглеродной энергетике. 2021.



УДК 620.92:338.47

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТРАНСПОРТНОМ СЕКТОРЕ  
ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT  
EFFICIENCY IN THE TRANSPORT SECTOR**

А.С. Коледа, К.А. Габимова

Научный руководитель – Д.А. Лапченко, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
lapchenko\_d@mail.ru

A. Koleda, K. Gabimova

Supervisor – D. Lapchenko, Senior Lecture  
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** рассмотрены способы повышения энергоэффективности в транспортном секторе, определено их влияние на развитие экономики и общества, выделены особенности внедрения энергосберегающих технологий на различных видах транспорта.*

***Annotation:** the ways of increasing energy efficiency in the transport sector are considered, their impact on the development of the economy and society is determined, the features of the introduction of energy-saving technologies on various modes of transport are highlighted.*

***Ключевые слова:** транспорт, энергосбережение, энергоэффективность, экологическая безопасность, электрификация, беспилотные технологии.*

***Key words:** transport, energy saving, energy efficiency, ecological safety, electrification, unmanned technologies.*

### **Введение**

Транспортный сектор является одним из основных потребителей энергии, поэтому вопросы энергосбережения на транспорте приобретают все большую актуальность. Разработка специальных мероприятий по повышению энергоэффективности в транспортном секторе ориентирована не только на снижение потребления топливно-энергетических ресурсов, но и на минимизацию негативного влияния на окружающую среду из-за выбросов вредных веществ в атмосферу.

### **Основная часть**

В условиях постоянно растущего спроса на энергию и постоянного повышения цен на энергоносители энергетический кризис становится все более заметным. Достижение целей устойчивого развития экономики и сохранение окружающей среды возможно за счет комплексного осуществления мер по энергосбережению и сокращению выбросов вредных веществ. Транспорт является сектором конечного потребления, на который приходится около трети общего мирового расхода энергии. Во всем мире страны разрабатывают и реализуют различные программы, позволяющие уменьшить расход топливно-энергетических ресурсов и потреблять энергию более рационально и эконо-

мично, используя альтернативные источники энергии и совершенствуя существующие технологии.

Одним из общемировых трендов сегодня является электрификация транспорта, основными характеристиками которой выступают энергоэффективность и экологичность. Помимо высокой и постоянно растущей стоимости на нефть, недостатком традиционного транспорта является загрязнение воздуха, именно поэтому электромобили уже стали отличной альтернативой, обеспечивая бесшумную и эффективную работу, малое загрязнение окружающей среды, презентабельный вид [1]. Традиционный парк средств пассажирских перевозок с двигателями внутреннего сгорания вполне может перейти на сторону «зеленой энергетики» путем замены на гибридные электромобили. В электромобилях с батарейным типом питания основным источником энергии является аккумулятор, у которого есть одна проблема – нехватка мест для его зарядки. Однако и эта проблема решаема: можно использовать вместо них электрохимические батареи, ионисторы, импеллеры. Также можно применять реостатное торможение как один из видов работы электродвигателя, при котором кинетическая энергия преобразовывается в электрическую и запасается в аккумуляторе. Такой вид торможения хорошо используется при проездах неровностей на дорогах. В ходе торможения появляется перебор электрической энергии, который через батарею поступает обратно в сеть конденсаторов, что говорит об экономичности такого режима работы.

Энергосбережение на железнодорожном транспорте предполагает реализацию комплекса технических решений, совершенствование технологических процессов и переход к оптимизационным формам управления. Сокращение эксплуатационных расходов данного вида транспорта достигается за счет уменьшения энергоемкости перевозочных процессов, используя новые, более эффективные, надежные локомотивы с повышенным КПД двигателей, усовершенствованной системой охлаждения и меньшими расходами энергии, ремонт которых значительно дешевле. Электрификация железных дорог позволяет уменьшить стоимость электроэнергии за счет ее производства на электростанции. При электрической тяге возможен возврат электроэнергии в питающую сеть, а при электроторможении реализуются большие мощности и скорости движения. Также для уменьшения расходов на перевозимый груз по железным дорогам можно улучшить логистику перевозок, использовать тепловые насосы, монополизировать теплоснабжение железнодорожных станций и узлов, увеличить напряжение передачи энергии к поездам электрифицированных железных дорог, применить «пирогенную» сверхпроводимость в движущей и неподвижной энергетике, что также позволит снизить себестоимость перевозок и установить конкурентный приоритет как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

Относительно новым направлением совершенствования транспорта является использование беспилотных технологий на различных его видах, минимизирующих участие человека с одновременным повышением производительности транспортных систем, одним из существенных эффектов внедрения которых выступает сокращение энерго-топливного потребления и снижение требований к путевой инфраструктуре. Рассматривая применение беспилотных лета-

тельных аппаратов, в настоящее время наблюдается заметное отставание коммерческого их использования от применения в военно-технической сфере, однако потенциал значителен. Например, беспилотные летательные аппараты можно использовать при обслуживании линий электропередач [2]. Для этого в данных устройствах должны быть оборудованы системы навигации и связи, средства обмена данными, технические наземные средства передачи и получения данных. Внедрение беспилотных воздушных судов позволяет повысить производительность труда персонала за счет инновационных технологий и автоматизации процессов, перейти на совершенно иной уровень проверки объектов электроснабжения, сократить время на диагностику, увеличить скорость обходов участков до 30 раз, снизить травматизм рабочих и увеличить безопасность работ, провести качественный анализ обнаруженных проблем. Самым явным недостатком введения беспилотных аппаратов является дороговизна. Однако, сопоставляя технико-экономические расчеты с затратами и эффективностью использования, можно сделать вывод, что использование беспилотных аппаратов вполне перспективное направление, которое может окупиться примерно за 2-3 года.

Наконец, рассмотрим цепочку поставок топливно-энергетических ресурсов – систему процессов, определяющую формирование информационных, материальных и финансовых потоков от поставщиков до конечных потребителей, устойчивое развитие которой может обеспечить баланс экономических, экологических и социальных выгод. В цепочке поставок нефти и газа применяются четыре вида транспорта: трубопроводный, автомобильный, железнодорожный и водный. Используемые меры – снижение транспортных расходов и повышение эффективности для оптимизации цепочки поставок нефти и газа – могут способствовать энергосбережению и сокращению выбросов. Внедрение стандартизации и совместного использования ресурсов также помогает топливно-энергетическому комплексу ориентироваться на экологичную и устойчивую цепочку поставок.

Многие отраженные в современной литературе исследования сосредоточены на снижении общих транспортных расходов с целью снижения расхода топлива. Учитывая влияние спроса на нефть и неопределенности цен на планирование цепочки поставок нефти, разработан метод, сочетающий анализ временных рядов, сценарный подход и многоступенчатое стохастическое программирование. Результаты показали, что метод позволяет правильно справляться с неопределенностью, снижать транспортные расходы и максимизировать прибыльность. Предложенная модель линейного целочисленного программирования для повышения гибкости транспортировки продукта учитывает несколько сбоев маршрута во время транспортировки и определяет запасной план маршрута транспортировки. В результате этого решения удалось снизить транспортные расходы почти на 35% [3].

### **Заключение**

Без транспорта невозможна жизнь в современном обществе, поэтому более 75 % спроса на энергоносители приходится на содержание транспортных средств промышленного и личного использования. Конструктивное внедрение

мероприятий, направленных на увеличение энергоэффективности экономики, будут способствовать снижению энергоемкости транспортного сектора и экологической безопасности. Применение прогрессивной элементной базы и передовой схмотехники существенно уменьшат объем, величину и стоимость преобразовательных устройств и конечной единицы электротранспорта, что окажет кардинальное влияние на уровень экономической эффективности перевозок.

### Литература

1. Электрификация транспорта: на пути к углеродной нейтральности // Techinsider [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.techinsider.ru/technologies/788333-elektrifikaciya-transporta-na-puti-k-uglerodnoy-neutralnosti/>. – Дата доступа: 12.04.2023.
2. Энергосбережение на транспорте // Энергоаудит [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energo-audit.com/energoberezhenie-na-transporte>. – Дата доступа: 15.04.2023.
3. Сокращение энергопотребления и устойчивое развитие в области транспорта и хранения нефти и газа // MDPI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1775>. – Дата доступа: 19.04.2023.

УДК 574.56

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN ENERGY

П.Г.Назарова, Недоруев М.С.

Научный руководитель – Е.П. Корсак, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

P. Nazarova, M. Nedoruev

Supervisor – E. Korsak, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** В статье описано применение нейронных сетей в энергетике. Расписаны примеры применения, а также актуальность применения на сегодняшний момент.

**Abstract:** The article describes the use of neural networks in the energy sector. Painted examples of application, as well as the relevance of the application at the moment.

**Ключевые слова:** нейронные сети, нейронные сети в энергетике, применение, актуальность, энергосистема, энергетика.

**Keywords:** neural networks, neural networks in energy, application, relevance, energy system, energy.

### Введение

Искусственная нейросеть (нейронная сеть) — это программа, которая повторяет модель человеческих нейронных связей. На основе нейросетей создают обучаемые программы, которые можно научить распознавать или генерировать контент [1].

Принцип действия нейросети не похож на классическую программу. Такой сети не дают четкого алгоритма: ее обучают, чтобы она могла самостоятельно выполнять ту или иную задачу. В результате деятельность программы становится менее предсказуемой, но более вариативной и даже творческой.

Благодаря такому подходу современные мощные нейросети умеют рисовать картины, писать стихи и отвечать на сложные вопросы. Они используются в огромном количестве программных продуктов: от роботов-помощников до сложных медицинских систем диагностики [2].

### Основная часть

Современные технологии нейросетей позволяют применять их во внешних источниках, включая энергетику. Нейросети использовали для аналитической работы энергосистемы, выявления эффективности, а также для прогнозирования производства и предотвращения аварий.

Одной из наиболее распространенных задач, в которых применяются нейросети в энергетике, является прогнозирование нагрузки на электросети. Для этого используются интересы, такие как временные изменения погоды, данные о производственных процессах и потребление. На основе этих данных можно обучать нейросеть, которая будет предсказывать будущую нагрузку на энергосистему. Это позволяет регулировать производство электроэнергии более

эффективно, что, в свою очередь, может снизить потребление и повысить качество энергоснабжения.

Кроме того, нейросети организовала российскую организацию для работы электрических систем. Например, они могут помочь в выборе наиболее эффективного распределения энергии между источниками и пользователями. Это особенно актуально в условиях использования долей природных источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, которые могут изменяться в зависимости от природных ресурсов.

Кроме того, нейросети сообщает об аварийных ситуациях и их предотвращении. Например, они могут анализировать данные о состоянии оборудования и определять возможные проблемы до того, как они ведут к стихийным бедствиям. Это позволяет быстро принимать меры для предотвращения чрезвычайных ситуаций и минимизации рисков для работников и потребителей.

Несмотря на то, что использование нейросетей в энергетике имеет преимущество, оно также связано с некоторыми ограничениями. Например, нейросети требуют большого объема данных для обучения, что может быть затруднительно в условиях, когда доступ к данным ограничен.

### **Заключение**

Благодаря внедрению нейронных сетей можно достичь полного перехода ручного труда на предприятиях энергосистемы на механизированный. Тем самым увеличить надежность энергогенерирующего оборудования, его диагностику, локализацию аварийных ситуаций, прогнозирование цен на электроэнергию, оптимизировать распределение нагрузки, а также использовать для решения других технологических и экономических задач, стоящих перед электроэнергетическими компаниями.

### **Литература**

1. Искусственная нейросеть [Электронный ресурс]/ нейронная сеть Режим доступа: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/nejronnaya-set/> – Дата доступа: 29.03.2023
2. Принцип действия нейронных сетей [Электронный ресурс]/ нейронная сеть Режим доступа: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/nejronnaya-set/> – Дата доступа: 29.03.2023

УДК 620.92

**ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ОФФШОРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF USING OFFSHORE  
ENERGY**

М. Р. Пильковская

Научный руководитель – Е.П. Корсак, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

M. Pilkovskaya

Supervisor – E. Korsak, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** В этой статье представлен обзор оффшорной ветроэнергетики, насколько это эффективный способ и как технология возобновляемых источников энергии, которая будет необходима, сделает мир лучше.*

***Abstract:** This article provides an overview of offshore wind power how efficient it is and how the renewable energy technology that will be needed will make the world a better place.*

***Ключевые слова:** ветроэнергетика, оффшорная ветроэнергетика, ветер, электростанция, ветровые турбины.*

***Keywords:** wind power, offshore wind power, wind, power plant, wind turbines.*

### **Введение**

Растущие экологические проблемы в сочетании с растущим спросом на энергию заставили общество перейти от традиционных источников к возобновляемым источникам энергии.

Использование ископаемого топлива загрязняет нашу окружающую среду, например, выбросы углекислого газа способствуют глобальному потеплению, а оксиды серы и азота вызывают кислотные дожди.

Чтобы найти решения для этого, специалисты в области энергетики постоянно изучают множество возможностей. Именно в этом контексте все больше внимания уделяется ветроэнергетике.

Ветроэнергетика - это отрасль энергетической техники, специализирующаяся на преобразовании кинетической энергии газовых масс в атмосфере в энергию, пригодную для народного хозяйства, например, электрическую, механическую или тепловую. Это преобразование может осуществляться такими устройствами, как ветрогенераторы (для производства электроэнергии), ветряные турбины (для преобразования в механическую энергию) и паруса (для транспортировки) [1].

Энергия ветра - это непостоянный и очень сложный ресурс. На него сильно влияют географические факторы, такие как ландшафт и почвенный покров (деревья и здания) [2].

Объекты ветроэнергетики должны располагаться вдали от препятствий, поскольку они обычно снижают скорость ветра, вызывают турбулентность и, таким образом, ограничивают улавливание энергии.

В зависимости от месторасположения, ветроэнергетика подразделяется на наземную и оффшорную. По сравнению с наземной ветровой энергией оффшорная ветроэнергетика имеет преимущества плавного ветра, высокой степени использования турбин, отсутствия захвата земли и беспокойства населения.

Оффшорная ветроэнергетика -это использование ветряных электростанций, построенных в океане (традиционно на мелководном континентальном шельфе) для сбора энергии ветра для выработки электроэнергии. Освоение более мелководных (обычно до 60 м глубины) прибрежных районов с использованием переходных несъемных донных конструкций на сегодняшний день является доминирующим направлением. В настоящее время также исследуются глубоководные районы, где можно было бы использовать плавучие ветряные турбины. Эта плавучая технология становится все более осуществимой по мере повышения уровня технической готовности и внедрения более масштабных разработок.

Таблица 1- Преимущества и недостатки оффшорной ветроэнергетики

Преимущества	Недостатки
Изобилие пространства на шельфе.	Морские сооружения и подводные электрические кабели должны выдерживать суровые условия морской среды, а строительство и техническое обслуживание в море требуют специального оборудования и навыков.
Более высокие и менее турбулентные ветровые ресурсы на море по сравнению с наземными, следовательно, более высокая выработка электроэнергии на единицу установленной мощности.	Морская ветроэнергетика в настоящее время обходится дороже, чем более совершенные технологии производства электроэнергии.
Более низкие уровни турбулентности морского ветра приводят к более высоким коэффициентам мощности (обычно на 40% выше, чем при береговом ветре).	Недостатком оффшорной ветроэнергетики является ее прерывистость, поэтому, если все ветряные турбины производят больше, чем требуется, сеть технически не может принять этот избыток электроэнергии.
Противодействие оффшорным ветряным электростанциям, как правило, ниже из-за их расположения в море и удаленности от населенных пунктов, а также меньшего визуального воздействия.	



### **Нидерланды**

Нидерланды подключили 1493 МВт, что составляет более половины (51,1%) мощности, введенной в эксплуатацию в Европе в 2020 году, завершив установку всех турбин на ветряной электростанции Borssele Фермерская зона. Зона состоит из трех ветроэлектростанций Borssele 1 и 2 (752 МВт), Borssele 3 и 4 (732 МВт) и Borssele 5 (19 МВт), все они были приобретены в 2016 и 2017 годах аукционы для различных консорциумов. Голландская TSO Tennet отвечала за подключение к электросети и досрочно установила платформы Borssele Alpha и Beta. Borssele 1 и 2 полностью готовы к эксплуатации, в то время как Borssele 3 и 4 подключат последнюю турбину в этом году. На инновационной площадке Borssele 5 компания Van Oord в настоящее время тестирует скользящее соединение между фундаментом и переходной деталью.

### **Бельгия**

Бельгия подключила 706 МВт (24,2%), почти удвоив свои мощности по сравнению с прошлогодним рекордом. Северо-западный 2 (218 МВт) и Seamide (487 МВт) в настоящее время полностью функционируют, и последняя становится крупнейшей морской ветроэлектростанцией в Бельгии.

### **Великобритания**

Великобритания подключила 483 МВт (16,6%), что является самым низким показателем с 2016 год, когда только одна ветроэлектростанция подключила турбины к электросети. Первая станция East Anglia One (714 МВт) полностью заработала в течение первого полугодия. Но работы на шельфе начались в Kincardine (50 МВт), Triton Knoll (857 МВт), Moray East (950 МВт) и Hornsea Two (1386 МВт). Четыре проекта вместе обеспечат дополнительные 3 ГВт электроэнергии в течение следующих трех лет.

### **Германия**

Германия подключила 219 МВт (7,5%), что является самым низким показателем почти за 10 лет. Самой удаленной действующей ветроэлектростанцией стала EnBW Albatros (112 МВт), расположенная в 105 км от побережья Северного моря Германии. Ветропарк Trianel Borkum 2 (203 МВт) также была полностью введена в эксплуатацию в первой половине года с установкой последних установок Senvion в Европе.

### **Португалия**

Португалия подключила 17 МВт (0,6%), завершив установку двух турбин V164 мощностью 8,4 МВт, крупнейших действующих плавучих ветряных турбин в мире. Плывущий по ветру Atlantic (25 МВт) использует полупогружную технологию и расположен в 30 км от побережья Виана-ду-Каштелу с глубиной воды, достигающей 100 м.

### **Франция**

В 2018 году во Франции был запущен демонстрационный проект Floatgen, направленный на проверку потенциала плавучих технологий в Атлантическом океане. Успех Floatgen означает, что в 2021 году ожидается публичный тендер во Франции на начало производства энергии ветра на шельфе с использованием плавучих технологий.

### Дания

Оффшорная ветряная электростанция Thor, расположенная в Северном море, в 20 км от фьорда Ниссум. Морская ветряная электростанция Thor является первой из трех крупных морских ветряных электростанций, которые будут построены в Дании до 2030 года.

Ветряная электростанция с минимальной мощностью 800 МВт и максимальной 1000 МВт будет подключена к сети в период с 2025 по 2027 год. Участок занимает площадь 440 км<sup>2</sup> и обеспечивает среднюю скорость ветра 10,3 метра.

Управляемый Датским энергетическим агентством и Energinet, он назван “Thor” в честь Торсминде, ближайшей деревни на берегу.

### Норвегия

Норвегия открыла для полномасштабного освоения плавучих и донных стационарных морских ветроэнергетических установок общей мощностью до 4,5 ГВт в июне 2020 года и разрешила разработчикам подавать заявки на получение лицензий на проекты с января 2021. По данным Министерства нефти и энергетики, процесс присуждения премии floating wind начнется к концу года. Правительство предлагает выделить по меньшей мере три участка мощностью до 500 МВт каждый в Утсире Северный район. Правительство планирует провести аукцион на участки в Sørlige Nordsjø II в первом квартале 2022 года.

На рисунке 1 представлена динамика изменения использования оффшорной ветроэнергетики в мире.



Рисунок 1- График рынка оффшорной ветроэнергетики

Как мы видим, Европа сохраняет свой статус крупнейшего регионального рынка оффшорной ветроэнергетики по состоянию на конец 2023 года, но новые установки за пределами Европы, преимущественно в Азия уже впервые превзошла Европу в прошлом году. Такая ситуация, вероятно, сохранится до

2030 года, хотя ежегодные установки в Европе могут преодолеть рубеж в 10 ГВт в 2026 году. В ближайшей перспективе (2021-2023), большая часть роста за пределами Европы будет обеспечиваться за счет Азии – в первую очередь Китай, Тайвань и Вьетнам, при участии США. Значение Японии и Южной Кореи возрастет с 2024 года.

### **Заключение**

Оффшорная ветроэнергетика - это молодая, быстро развивающаяся технология, которая гораздо менее развита, чем другие технологии, такие как, например, береговая ветроэнергетика. Политика, которую предстоит разработать, должна будет сыграть роль ускорителя этой зрелости, в частности, посредством активной поддержки исследований и разработок. Но такая политика также должна обеспечивать поддержание очень тесного диалога между различными заинтересованными сторонами, заинтересованными во внедрении этой технологии.

Оффшорная ветроэнергетика не является возобновляемой энергией, как любая другая. В долгосрочной перспективе именно она, несомненно, внесет наибольший вклад в производство электроэнергии из возобновляемых источников энергии. Сегодня в стадии разработки находятся проекты «мега-морских ветряных электростанций» мощностью почти в один гигаватт. Таким образом, оффшорная ферма может рассматриваться как электростанция наравне с атомной электростанцией или электростанцией, работающей на угле.

Несомненно, что реализация потенциала оффшорной ветроэнергетики в мире, где нет чистой энергии, потребует постепенного изменения политической воли. Но это также потребует более тесного сотрудничества между директивными органами, промышленными потребителями, государственными спонсорами, гражданским обществом и самой отраслью, чтобы извлечь уроки из последнего десятилетия развития оффшорной ветроэнергетики и способствовать более устойчивому, заметному, амбициозному и совместному будущему росту.

### **Литература**

1. Оффшорная ветроэнергетика [Электронный ресурс]/ оффшорная ветроэнергетика.-Режим доступа: Ветроэнергетика — Википедия (wikipedia.org) /.-Дата доступа:05.04.2023.
2. Оффшорная ветроэнергетика [Электронный ресурс]/ оффшорная ветроэнергетика.-Режим доступа: <https://www.choisir.com/energie/articles/143273/energie-eolienne-comment-produire-de-lelectricite-avec-le-vent/>.- Дата доступа:05.04.2023.

УДК 621.311

**ОСОБЕННОСТИ МАРКЕТИНГА В ЭНЕРГЕТИКЕ  
FEATURES OF MARKETING IN THE ENERGY SECTOR**

Д.М. Райко

Научный руководитель – Е.П. Корсак, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

chyzh@bntu.by

D.M. Raiko

Supervisor – E.P. Korsak, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** В данной работе показаны особенности маркетинга в энергетической деятельности, маркетинг по основным элементам – товар, сбыт, продвижение, а также основной комплекс маркетинговой деятельности.

**Abstract:** In this work shows the features of marketing in energy activities, marketing by the main elements – product, sales, promotion, as well as the main complex of marketing activities.

**Ключевые слова:** маркетинг в энергетике, тепловая энергия, электроэнергия, рыночные отношения, особенности маркетинга.

**Keywords:** marketing in the energy sector, thermal energy, electricity, market relations, marketing features.

**Введение**

Маркетинг проявляется в условиях очень конкурентной рыночной экономики, где у компаний возникают серьезные проблемы со сбытом продукции. Изначально под маркетингом понималась деятельность компании по обеспечению сбыта производимой продукции на рынке. Маркетинг проходит несколько этапов процесса разработки, на каждом этапе доминирует определенный взгляд на содержание и цели маркетинговой деятельности.

Согласно определению Филипа Котлера, маркетинг - это деятельность, направленная на монетизацию путем удовлетворения потребностей клиентов [1].

Основной целью маркетинга является продажа товара и увеличение доли предприятия на рынке. Рост продаж является одним из главных условий увеличения корпоративной прибыли.

**Основная часть**

Концепция энергомаркетинга предполагает сотрудничество и взаимодействие предприятий, государственных и коммерческих организаций и потребителей в энергетическом секторе. Благодаря роли определенных маркетинговых инструментов был ускорен цикл производства и технологии, повышена точность управленческих решений, привлечены инвесторы и оказана социальная поддержка инновациям [2].

Самое важное в маркетинге - это понимать потребителя, его требования и предпочтения. Ожидания потребителей формируют впечатления, полученные

от сервиса, и общую оценку услуг энергетической компании. На энергетическом рынке предоставление услуг, которые могут максимально удовлетворить потребителей и приносить прибыль бизнесу, является очень сложной задачей.

Энергетический сектор сложен и разнообразен. Маркетинг организаций, работающих в энергетическом секторе, сильно отличается. Это объясняется специфической ситуацией в энергетическом секторе национальной экономики.

Энергетическая отрасль характеризуется двумя направлениями: маркетингом предприятий энергетического сектора и маркетингом потребителей энергии.

Основная часть энергетического сектора занимается производством электрической и тепловой энергии, управлением электроснабжением, услугами по передаче, эксплуатацией и диспетчеризацией, продажей и организацией купли-продажи электроэнергии - все эти сферы деятельности требуют маркетинга.

Особенностью производства электроэнергии является неразрывная связь между генераторной установкой и потреблением, что создает проблемы с оптимальным использованием генерирующих мощностей для производства. Нерегулярное потребление требует производства электроэнергии с использованием экономически обоснованных моделей, учитывающих наличие резервов и ремонт оборудования.

Следующая особенность маркетинга в энергетическом секторе определяется слаженностью работы субъектов оптового рынка.

Рыночные отношения создали необходимость выполнения маркетинга в абсолютно всех направлениях экономики, а также включая энергетику.

Энергетика производит, преобразует, распределяет, а также отпускает потребителям электрическую и тепловую энергию.

Такая связь с потребителями формирует вопрос оптимизации энергопотребления. Система показывает заинтересованность в оптимизации собственных отношений вместе с потребителями, для того чтобы никак не поддерживать расходы в формировании мощностей с невысокой степенью использования.

Вследствие происходит различие между режимами деятельности различных потребителей энергии, а также результат применения её в разных обстоятельствах, в таком случае следует распределение тарифов на электрическую и тепловую энергию. Присутствие данной концепции тарифов, на электрическую энергию, вместе со всеми её преобразованиями обязана постоянно стримиться к совершенству. Так как в энергетической промышленности изготавливается один продукт, цены представляют значительную значимость, нежели в иных секторах экономики. Это является одной из отличительных черт маркетинга в энергетике.

За счёт того, что энергетические системы получают доход с продажи продукции на рынке, а промышленность совершает монотипную продукцию, электрическую и тепловую, по этой причине введение новых технологий, а также нового электрооборудования считается одним из течений маркетинга. Введение новизны зачастую связано с масштабами использования электроэнергии в экономике. В данных взаимоотношениях немаловажную значимость сыграла об-

шая деятельность отраслевых исследований в формировании рынка. Исследования в экономике формирует требования оптимизации структуры и увеличения пользования [2].

Взаимоотношения с поставщиками топлива, на которых приходится доля расходов, является одной из конфигураций маркетинга в урегулировании рыночных отношений. Система коммерциализация обязана содержать в себе выбор поставщика, условий поставки, согласование цен.

Не менее важная модель маркетинга в энергетике: Наблюдение за эффективностью и целесообразностью применения электроэнергии потребителями, не только с целью экономии расходов потребителей, но а также целью оптимизации применения определённой мощности.

Продажи в энергетике объединено вместе с обновлением, а также инновациями. Весьма значительное воздействие на окружающую среду производят энергетические установки, тем самым неся неблагоприятный характер. Тем самым на рынке происходит конкуренция за внедрение и разработку экологических программ для технических процессов в создании энергии [2].

### **Заключение**

Тем не менее при наличии конкуренции на рынке, маркетинг усовершенствовал разработку энергетических технологий для удовлетворения потребителей электрической и тепловой энергии. Значимость сфер увеличивается за счёт того как мы выходим на рынок.

### **Литература**

1. Котлер, Филип Основы маркетинга, Краткий курс.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2012. – 496 с.: ил. – Парал. тит. англ.
2. Гительман, Л.Д. Энергетические компании: Экономика, Менеджмент. Реформирование: В 2 т. Т. 1. / Л.Д. Гительман, Б.Е. Ратников, Л.М. Гительман – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2001. – 376 с.

УДК 621.311.001.57

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ  
ДВОЙНИКОВ**  
**INTELLECTUALIZATION OF POWER ENGINEERING ON THE BA-  
SIS OF DIGITAL DOUBLES**

Д.Н. Романюк

Научный руководитель – Т.Ф. Манцерова, к.э.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
[dmitritrom@gmail.com](mailto:dmitritrom@gmail.com)

D. Romaniuk

Supervisor – T. Mantserova, candidate of economic sciences, associate professor,  
the head of department «Economics and organization of power engineering»  
Belarusian national technical university  
Minsk, the Republic of Belarus

***Аннотация:** В работе рассмотрена модель «цифровой двойник» как один из актуальных трендов в области цифровизации энергетики. Определены принципы работы, преимущества и перспективы внедрения системы в Республике Беларусь.*

***Abstract:** The article considers the model of «digital double» as one of the actual trends in the field of digitalization of energy. The principles, advantages and prospects of the system introduction in the Republic of Belarus have been determined.*

***Ключевые слова:** энергетика, цифровизация, интеллектуализация, цифровой двойник, СИМ.*

***Key words:** power engineering, digitalization, intellectualization, digital double, СИМ.*

### **Введение**

В условиях полномасштабного перехода национальной экономики к инновационному развитию актуальность приобретает внедрение информационных технологий в организацию деятельности различных комплексов. Одним из основополагающих видов экономической деятельности в Республике Беларусь является энергетика, что обуславливает необходимость оптимизации её деятельности на базе современных цифровых решений.

Целью данной работы является определение перспектив создания цифрового двойника энергосистемы Республики Беларусь в целях интеллектуализации производственных процессов предприятий энергетического комплекса.

### **Основная часть**

Процесс цифровизации для экономики в целом определён как системный подход к использованию информационных технологий, цифровых ресурсов и потоков данных для увеличения производительности труда и повышения экономической эффективности деятельности. Отдельные элементы цифровых систем активно внедряются в деятельность различных сфер экономики. Однако

наиболее актуальным считается комплексное управление цепочкой создания стоимости на протяжении всего жизненного цикла продукции.

Цифровой двойник – модель, отображающая совокупность компонентов системы в их взаимосвязи в жизненном цикле продукции с использованием физических данных реального объекта, виртуальных данных и данных их взаимодействия.

Создание цифровых двойников построено на принципах цифровой обработки данных.



Рисунок 1 – Принцип построения цифровых двойников

Данные, получаемые от объекта, в режиме реального времени используются математической моделью для точного описания работы, моделирования режимов с целью оптимизации управления. Для этого используются технологии машинного обучения, элементы искусственного интеллекта и компьютерной аналитики. Развитие технологии «цифровой двойник» обусловило формирование нескольких типов: цифровой двойник объекта, цифровой двойник процесса, цифровой двойник системы.

Целью создания цифрового двойника энергосистемы является объединение данных об отдельных элементах системы для их синхронизации, обработки и обеспечения принятия оптимальных решений с учётом текущего состояния сети для обеспечения её нормального функционирования и управления.

Специфика деятельности энергетики и энергии как результата деятельности определяет принципы формирования цифровых двойников систем. Отличия в технологических процессах на различных этапах цепи «генерация-преобразование-передача-распределение-потребление» требует унификации используемых данных. Ядром цифрового двойника энергосистемы является Common Information Model (CIM) – набор открытых стандартов для описания электроэнергетических систем. Данная модель описывает основные элементы системы, их свойства и связи между ними в виде общих определений и понятий. Внедрение данной системы обеспечивает ликвидацию разнородности данных и улучшение качества предоставляемой информации об оборудовании объ-



ектов, а также позволяет интегрировать различные программные комплексы в единую систему. СИМ утверждена Международной электротехнической комиссией в 2005 г. в виде стандартов МЭК 61970/61968. Первые шаги по внедрению СИМ в Республике Беларусь предприняты в 2022 г. путём утверждения СТП 33240.01.108-22 «Определение единой информационной модели электрической сети в сочетании с единой системой идентификации объектов модели и единой системой управления нормативно-справочной информацией». Данный документ является основой создания СИМ Белорусской энергосистемы.

Интеграция данных при помощи СИМ с автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП) и автоматизированными системами диспетчерского управления (АСДУ) позволяет осуществлять интеллектуальное управление активами, режимами сети, повысить устойчивость работы технологического оборудования путём внедрения возможности предикативного анализа на базе трендов, раннего обнаружения нарушений в нормальной работе, планирования ремонтов и др. В условиях формирования межгосударственных рынков большую актуальность приобретает внедрение систем автоматического регулирования частоты и перетоков мощности (САРЧМ) для поддержания сальдо перетоков с учётом режимов работы. В результате обеспечивается высокая степень надёжности деятельности системы, и как результат, устойчивое снабжение конечных потребителей электроэнергией соответствующего качества.

Алгоритм создания цифрового двойника энергетической системы представляет собой четырёхэтапный процесс: концепция, подготовка, реализация, внедрение. (рисунок 2).

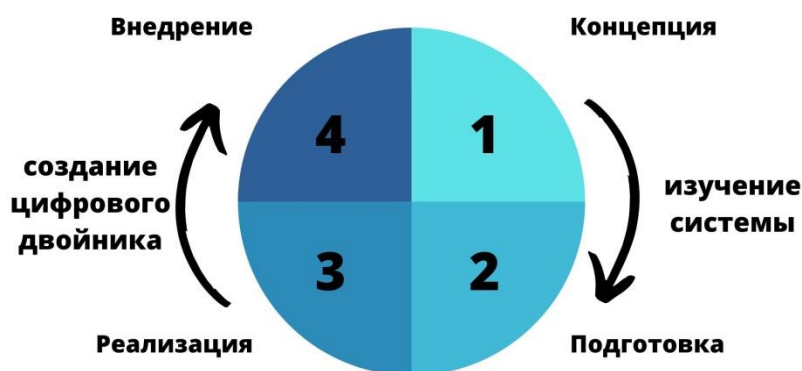


Рисунок 2 – Алгоритм создания цифрового двойника

Первый этап заключается в обозначении целей создания цифрового двойника, определении форм и концепта его реализации, проведении анализа рынка программного обеспечения (ПО) и оборудования, составлении плана разработки и внедрения цифрового двойника. Результатом данной стадии является определение технического задания для разработки системы и её технико-экономических показателей. Второй этап представляет собой создание структуры системы, разработку первичных элементов и установление структурной свя-

зи между ними, что позволяет определить конкретные требования к ПО и оборудованию. На третьем этапе на основе уже реализованных решений система готова к опытной эксплуатации, анализу работы и устранения нарушений, после чего система вводится в промышленную эксплуатацию в интеграции с реальными объектами. На данный момент создание цифровых двойников в энергосистеме Республики Беларусь находится на этапе разработке концепции и формировании нормативных основ для функционирования комплекса.

Преимущества использования цифрового двойника:

- Высокая эксплуатационная надёжность и устойчивость;
- Интеллектуальное управление активами;
- Оптимизация эксплуатационных расходов;
- Повышение эффективности использования ресурсов;
- Повышение эффективности технологических процессов;
- Повышение эффективности управления и операционной аналитики;
- Устранение дублирования функций.

### **Заключение**

Таким образом, можно сделать вывод о том, что внедрение технологии цифровых двойников в деятельность Белорусской энергосистемы – необходимый шаг для обеспечения её устойчивого развития. Применение системного подхода к его формированию позволит в значительной мере оптимизировать работу оборудования, снизить издержки на эксплуатацию и управление, что приведёт к повышению устойчивости системы.

### **Литература**

1. Булатов, Ю. Н. Применение технологий цифровых двойников в энергетике / Ю. Н. Булатов, К. Е. Короткова // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2021. – Т. 1. – С. 103-112.
2. Мухлина, Е. С. Будущее цифровых двойников в энергетике / Е. С. Мухлина, А. Г. Логачева // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : Материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 21–22 октября 2020 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 354-356.

УДК 330

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАГРУЗКАМИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А. В. Тарасюк

Научный руководитель – Корсак Е. П., м.э.н., старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

Tarasyuk A.V. - student

Supervisor - E. Korsak., M.E. PhD, Senior Lecturer  
Department of Economics and Organization of Energy,  
Belarusian National Technical University,  
Minsk, Republic of Belarus

**Аннотация:** Данная статья рассматривает вопрос систем интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии, их применение, преимущества и актуальность использования в различных сферах. Также рассмотрены примеры использования систем интеллектуального управления нагрузками на промышленных предприятиях в Республике Беларусь.

**Abstract:** This article discusses the issue of intelligent load management systems for electricity consumers, their applications, advantages, and relevance in various fields. It also examines examples of using intelligent load management systems in industrial enterprises in the Republic of Belarus.

**Ключевые слова:** интеллектуальное управление нагрузками, потребители электроэнергии, энергоэффективность, снижение выбросов.

**Key words:** intelligent load management, electricity consumers, energy efficiency, emissions reduction.

### Введение

Современный мир невозможно представить без электроэнергии, которая является важнейшим ресурсом для жизни и производства. Однако, с увеличением числа потребителей и объёмов потребления, энергосистемы часто сталкиваются с проблемами перегрузок и нестабильной работы. Для решения этих проблем были разработаны системы интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии, которые позволяют эффективно использовать энергию, сокращать затраты на электроэнергию и улучшать качество жизни людей.

### Основная часть

Интеллектуальное управление нагрузками потребителей электроэнергии основано на использовании данных о потреблении энергии и информации о состоянии энергосистемы для эффективного управления нагрузками. Например, система может использовать данные о потреблении. Кроме того, система может управлять нагрузками, используя информацию о потреблении энергии в реальном времени, например, от умных счётчиков и устройств управления нагрузками, чтобы снизить нагрузку на сеть в периоды пикового потребления. [1]

Для успешной реализации системы интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии необходимо учесть предпочтения и потребности потребителей. Например, система может предоставлять возможность выбирать, какие устройства должны быть отключены во время периодов пиковой нагрузки. Это может помочь повысить удовлетворённость потребителей и улучшить эффективность системы.

Для обеспечения надёжности и безопасности системы необходимо использовать современные технологии и защитные механизмы, такие как алгоритмы распознавания аномалий, шифрование и защиту от кибератак.

Интеллектуальное управление нагрузками потребителей электроэнергии может привести к значительной экономии энергии, снижению затрат на электроэнергию и уменьшению воздействия на окружающую среду. Кроме того, это может повысить надёжность и безопасность энергосистемы, улучшить качество энергоснабжения и повысить удовлетворённость потребителей.

Системы интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии могут использоваться в различных областях, включая:

1. Домашнее использование: системы управления нагрузками могут использоваться для управления освещением, кондиционированием воздуха, отоплением, стиральными машинами, посудомоечными машинами и другими бытовыми приборами в домах, квартирах и других жилых помещениях.

2. Коммерческие здания: системы управления нагрузками могут использоваться для управления освещением, системами безопасности, системами отопления и другими приборами в офисах, магазинах, ресторанах и других коммерческих зданиях.

3. Промышленность: системы управления могут использоваться для управления нагрузками на производственных линиях и других электрооборудовании в промышленных предприятиях.

4. Сети электроснабжения: системы управления нагрузками могут использоваться для управления нагрузками в энергосистемах, включая сети передачи и распределения электроэнергии.

Примеры конкретных устройств, использующих системы интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии, включают умные термостаты, умные розетки, умные счетчики электроэнергии и другие. Все эти устройства позволяют управлять потреблением энергии, снижать затраты на электроэнергию и уменьшать влияние на окружающую среду.[2]

В Республике Беларусь также существуют различные примеры использования систем интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии:

1. Применение smart-счётчиков в жилых домах и квартирах. Такие счётчики могут определять потребление электроэнергии в реальном времени и передавать данные на специальные платформы, которые позволяют потребителям мониторить свое потребление и снижать расходы на энергию.

2. Использование систем управления нагрузками в промышленности. Например, в Республике Беларусь на ряде предприятий, таких как ОАО "Нафтан" и ОАО "Беларуськалий", внедрены системы автоматического управ-

ления технологическими процессами, которые позволяют сократить энергопотребление и улучшить качество производства.

3. Внедрение системы "умный дом". Например, в Минске уже существуют жилые комплексы, в которых используются технологии умного дома, позволяющие автоматически управлять освещением, отоплением, кондиционированием и другими устройствами. Это позволяет сократить затраты на энергию и улучшить удобство жильцов.

4. Оптимизация работы муниципальных объектов. В городах Республики Беларусь также внедряются системы управления энергопотреблением на муниципальных объектах, таких как уличное освещение, общественный транспорт, и другие городские объекты. Это позволяет снизить расходы на энергию и повысить уровень комфорта для граждан. [3]

### **Заключение**

В целом, системы интеллектуального управления нагрузками потребителей электроэнергии - это важный инструмент для оптимизации энергопотребления в различных сферах. Они позволяют управлять потреблением энергии с помощью автоматизированных систем, оптимизировать расходы на электроэнергию, уменьшать нагрузку на электросеть и сокращать выбросы углекислого газа в атмосферу. В Республике Беларусь также существует множество примеров использования систем интеллектуального управления нагрузками, которые уже доказали свою эффективность и актуальность. Разработка и внедрение таких систем является важным шагом в направлении повышения энергоэффективности и снижения влияния на окружающую среду.

### **Литература**

1. Белкин, М.В., Рябинин, Д.А., Гаврилов, М.Н., Кутепов, Д.Ю. и др. Интеллектуальное управление нагрузками потребителей электроэнергии // Вестник УГТУ-УПИ. - 2018. - № 3. - С. 22-30.
2. Залетин, С.Ф., Глазков, К.В., Матвеева, О.В. Интеллектуальное управление нагрузками в энергосистемах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. - 2019. - № 5. - С. 14-34.
3. Гаврилов, М.Н. и Шабалин, А.С. (2020). Интеллектуальное управление нагрузками электросетей на основе системы «умный дом». Промышленность и инновации, (4), 18-23.

УДК 621.22

## РАЗВИТИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ THE DEVELOPMENT OF HYDROPOWER WORLDWIDE

А. Д. Фальченко, М. В. Наталевич

Научный руководитель – Е.А. Кравчук, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A. Falchenko, M. Natalevich

Supervisor – E.Kravchuk, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** в данной статье рассмотрены понятия гидроэнергетики, исследовано развитие мировой гидроэнергетики, а также рассмотрены крупнейшие ГЭС.

**Abstract:** This article examines the concepts of hydropower, examines the development of global hydropower, and looks at the largest hydropower plants. This article examines the concepts of hydropower, examines the development of global hydropower, and looks at the largest hydropower plants.

**Ключевые слова:** ГЭС, гидроэнергетика, электроэнергия, мощность, источник энергии

**Keywords:** hydropower, electricity, power, energy source

Гидроэнергетика - это электроэнергия, вырабатываемая движением воды. Использование гидроэнергетики началось еще в древние времена, когда водяные колеса использовались для приведения в действие мельниц и лесопилок. Сегодня гидроэнергетика является одним из наиболее важных источников возобновляемой энергии в мире. Это чистый, надежный и возобновляемый источник энергии, который будет способствовать снижению выбросов парниковых газов.

Развитие гидроэнергетики в мире можно проследить с 19 века, когда в Европе и Северной Америке были построены небольшие гидроэлектростанции. Однако только в 20 веке гидроэнергетика стала значительным источником электроэнергии. Первой крупной гидроэлектростанцией была Ниагарская водопадная электростанция, построенная в 1895 году.

В настоящее время крупными производителями гидроэнергии (в том числе гидроаккумулирующие станции) в большинстве своём являются Китай, Канада, Бразилия, а также США. Российская федерация находится в этом списке на пятой позиции. Лидируют в выработке гидроэнергии на душу населения – Исландия, не уступает выше перечисленным странам Норвегия (а именно часть ГЭС в итоговой выработке – 98 %), а также Швеция.

В развитых странах ранее освоена значительная доля экономически подходящего гидропотенциала:

- в Европе - это 75%,
- в Северной Америке – приблизительно 70 %, но способности постройки больших гидроэлектростанций почти исчерпаны,

- Африка – 21% доли всемирных гидроэнергетических ресурсов,
- Восток - 39 %,
- Южная Америка и Австралия - 11 %.

Таким образом можно сказать, что крупные гидроэлектростанции в перспективе будут создаваться в Африке, Азии, а также Южной Америке. Это в полной мере поспособствует развитию мировой гидроэнергетики.

Данные заключения подтверждаются вместе с тем, то что крупнейшие гидроэлектростанции общества пребывают непосредственно в данных ареалах (табл. 1)

Таблица 1 – Крупнейшие ГЭС мира

Страна	Крупнейшая ГЭС	Мощность, ГВт
Китай	«Три ущелья»	22,4
Граница между Бразилией и Парагваем	«Итайпу»	14,0
Венесуэла	«Гури» (ГЭС им. Симона Боливара)	10,3



Рисунок 1 - Гидроэлектростанция «Три ущелья»

Без сомнения, данные достижения инженерной мысли угасают перед гидроэлектростанцией «Гранд Инга». Предполагается, что перепад высот, объем и скорость потока воды на этом участке могут поддерживать ряд гидроэлектростанций, каждая с генерирующей мощностью от 4 до 8 ГВт, в общей сложности 40 ГВт для всего комплекса. Проект будет расположен на другом берегу реки Конго, примерно в 150 километрах (93 миль), вверх по течению от того места, где река впадает в Атлантический океан. Она находится примерно в 225 километрах (140 миль) к юго-западу от Киншасы, столицы и крупнейшего города ДР Конго. В случае успеха план «Гранд Инга» вдвое превысит «Три ущелья».

Общий счет на строительство Гранд-Инга, по расчетам, достигнет 80 миллиардов долларов. В 2016 году Всемирный банк прекратил свою поддержку проекта Гранд-Инга. Ожидается, что строительство электростанций будет осуществляться в рамках проекта государственно-частного партнерства. В июне

2020 года правительство Демократической Республики Конго приняло решение представить проект главам государств региона и изучить рынок вырабатываемой электроэнергии на континенте. Они привлекли Африканский союз и Новое партнерство в интересах развития Африки к своим усилиям по строительству электростанции. Южная Африка заявила о готовности приобрести 2,5 ГВт мощности плотины. Нигерия заинтересована в покупке 3 ГВт, а конголезские шахты в провинции Катанга заинтересованы в 1,3 ГВт.

Гидроэнергия может вырабатываться как в рамках крупномасштабных, так и мелкомасштабных проектов. Крупномасштабные проекты включают плотины и водохранилища, а мелкомасштабные проекты включают водохранилища и насосные станции. Крупномасштабные гидроэнергетические проекты являются предметом споров из-за их воздействия на окружающую среду и перемещения населения. Однако проекты малой гидроэнергетики завоевали популярность благодаря их низкому воздействию на окружающую среду и способности обеспечивать электроэнергией отдаленные населенные пункты.

Будущее гидроэнергетики выглядит многообещающим, поскольку многие страны инвестируют в развитие новых гидроэнергетических проектов. В частности, развивающиеся страны рассматривают гидроэнергетику как средство обеспечения электроэнергией своих граждан. Однако существуют и опасения по поводу воздействия гидроэнергетики на окружающую среду, особенно на пресноводные экосистемы.

Гидроэнергетика прошла долгий путь с момента своего скромного зарождения в качестве источника механической энергии. Сегодня это жизненно важный источник электроэнергии, который помогает сократить выбросы парниковых газов и способствует устойчивому развитию. Будущее гидроэнергетики выглядит многообещающим, но важно учитывать воздействие гидроэнергетических проектов на окружающую среду и обеспечивать их устойчивое и ответственное развитие.

### Литература

1. Мировая гидроэнергетика настоящее и будущее [Электронный ресурс]/Гидроэнергетика. –Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/epr/189/13648.htm> .- Дата доступа: 03.04.2023.
2. Мировая гидроэнергетика настоящее и будущее [Электронный ресурс]/Гидроэнергетика. –Режим доступа: <https://subscribe.ru/archive/media.news.press.epr/201212/17110227.html> .- Дата доступа: 03.04.2023



УДК 620.9

**АНАЛИЗ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**  
**ANALYSES OF FUEL AND ENERGY RESOURCES IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

М. В. Наталевич, А. Д. Фальченко

Научный руководитель – Е. А. Кравчук, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь le-  
na.kravchuk.777@mail.ru

A. Falchenko, M. Natalevich

Supervisor – E. Kravchuk, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** в данной статье осуществлен анализ и состояние топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь, выявлены перспективы его развития.

**Abstract:** This article analyzes the state of the fuel and energy complex of the Republic of Belarus and identifies the prospects for its development.

**Ключевые слова:** топливно-энергетический комплекс, ресурс, баланс, топливо, нефть, торф.

**Keywords:** fuel and energy complex, resource, balance, fuel, oil, peat

Республика Беларусь - страна, расположенная в Восточной Европе, которая хорошо известна своим топливно-энергетическим комплексом (ТЭК). Беларусь неизменно является одной из ведущих стран региона по объему производства и потребления энергии. Однако в условиях меняющегося глобального энергетического ландшафта Беларуси необходимо пересмотреть свою энергетическую стратегию и найти новые способы оставаться конкурентоспособной.

По прогнозам на 2023 год ТЭК Республики Беларусь продолжит расти, при этом страна будет инвестировать в усовершенствование новых источников энергии. Республика Беларусь активно развивает возобновляемые источники энергии (СЭС, ВЭС, АЭС). Страна поставила перед собой цель к 2030 году обеспечить поступление 30% от общего объема потребляемой энергии из возобновляемых источников.

Республика Беларусь планирует внедрить ряд мероприятий, способствующих развитию альтернативных источников энергии. Одно из таких мероприятий – льготный тариф, который обеспечивает финансирование производства энергии, что впоследствии приведет к появлению новых проектов в области возобновляемых источников энергии в стране, особенно в секторах ветровой и солнечной энергетики.

ТЭК Республики Беларусь, составляющие которого представлены на рис. 1 способствует безопасному обеспечению энергопотребителей страны ресурсами вместе с использованием более эффективных научно-технических, а также промышленных решений.

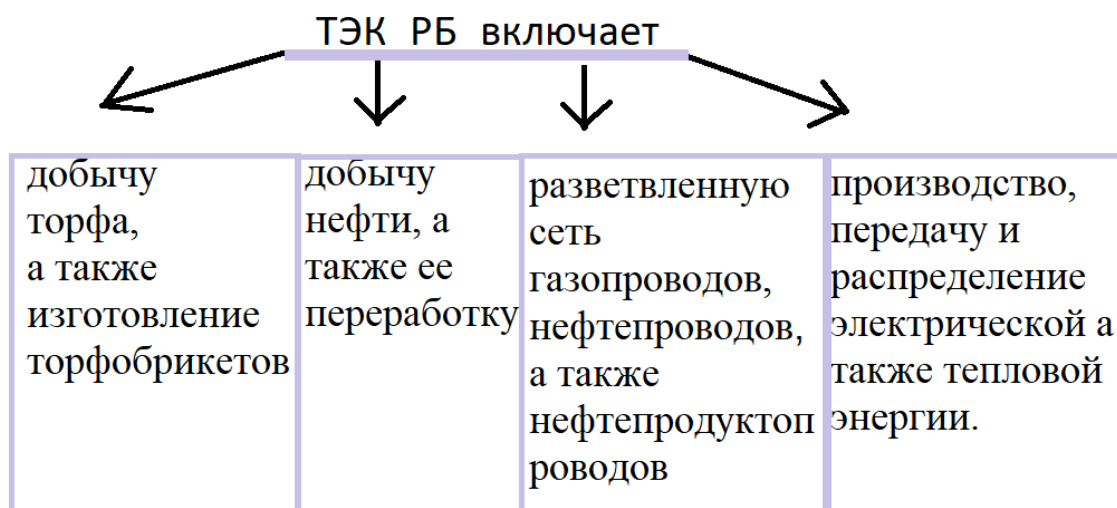


Рисунок 1 - Составляющие топливно-энергетического комплекса РБ

Каждый год добыча топливных ресурсов (топливный торф, нефть, попутный газ, дрова и пр.) варьируется от 4,5 до 5,2 млн. т. у. т., что составляет приблизительно 15% потребности в ТЭР.

В республике уже исследовано свыше 9000 торфяных месторождений общей площадью и глубиной месторождений 2,54 миллионов га и вместе с первоначальными резервами торфа более пяти с половиной миллиардов тонн. В настоящее время оставшаяся часть геологических запасов оценивается в 4,3 млрд. т, что соответствует 75% от первоначальных запасов ресурсов.

Транспортный сектор также является важной частью топливно-энергетического комплекса Беларуси. В стране имеется хорошо развитая трубопроводная система, которая транспортирует нефть и газ из России в Европу. Беларусь также вкладывает значительные средства в развитие электромобилей, и к 2030 году на ее дорогах планируется разместить 30 000 машин.

Топливо-энергетический баланс (ТЭБ) представляет из себя концепцию статистических характеристик, определяющих единый размер и структуру развития топливно-энергетических ресурсов, а кроме того тенденцию их применения.

Система показателей ТЭБ даёт перспективу реализации исследования, оценку изменений в структуре производства и использования топлива и энергии, устанавливает основные тенденции развития ТЭК, а также предназначается главной информативной основой с целью расчета показателей, определяющих степень потребления топливно-энергетических ресурсов в разных секторах экономики и по Республике Беларусь в целом.

Энергоемкость валового внутреннего продукта - главный макроэкономический статистический показатель, рассчитываемый в основе характеристик ТЭБ и способствующий оценке эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. Также энергоемкость ВВП характеризует степень потребления топливно-энергетических ресурсов, приходящихся в единицу валового внутреннего продукта.

Развитие ТЭБ, а также расчет энергоемкости валового внутреннего продукта осуществляется Национальным статистическим комитетом Республики Беларусь ежемесячно, основанных на сводных статистических данных, приобретенных согласно формам муниципальных статистических исследований.

ТЭК Республики Беларусь является ключевым фактором экономического развития страны. В условиях меняющегося глобального энергетического ландшафта Беларуси необходимо пересмотреть свою энергетическую стратегию и найти новые способы оставаться конкурентоспособной. Развитие возобновляемых источников энергии и расширение мощностей атомной энергетики являются важными шагами на пути к достижению этой цели. В целом, перспективы ТЭК Беларуси в 2023 году позитивны, и страна имеет хорошие возможности для того, чтобы продолжать играть ведущую роль в энергетическом секторе региона.

### Литература

1. Анализ топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь [Электронный ресурс]/Энергетика. – Режим доступа: <https://www.referat911.ru/Geografiya/analiz-toplivnojenergeticheskogo-kompleksa-respubliki-belarus/368930-2826748-place2.html>. - Дата доступа: 03.04.2023.
2. Анализ потребления топливно-энергетических ресурсов по отраслям в Республике Беларусь [Электронный ресурс]/Энергетика. – Режим доступа: [https://otherreferats.allbest.ru/physics/01204840\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/physics/01204840_0.html). - Дата доступа: 03.04.2023.