



*ISSN (print) 2091-5985*  
*ISSN (online) 2181-1946*

# **ЭНЕРГИЯ ВА РЕСУРС ТЕЖАШ МУАММОЛАРИ**

## **ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

## **PROBLEMS OF ENERGY AND SOURCES SAVING**

**№ 3**

**2023**

*Энергия ресурсларидан фойдаланиши  
самарадорлигини ошириши учун мамлакатимиз  
энергетика тизимини ислоҳ қилишимиз, бу  
борада аниқ стратегия ишлаб чиқишимиз лозим.*

**Ш.М.Мирзиёев**

*Для повышения эффективности  
использования энергоресурсов нам необходимо  
реформировать энергетическую отрасль  
страны, разработать в этом направлении  
конкретную стратегию.*

**Ш.М.Мирзиёев**

*In order to increase the efficiency of energy  
resources, we need to reform the energy system of our  
country and develop a clear strategy in this regard.*

**Sh.Mirziyoyev**



ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ЭНЕРГЕТИКА ВАЗИРЛИГИ  
ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ТАЪЛИМ, ФАН ВА  
ИННОВАЦИЯЛАР ВАЗИРЛИГИ

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ЭНЕРГИЯ ВА РЕСУРСЛАР ТЕЖАШ  
ИЛМИЙ-АМАЛИЙ ВА ЎҚУВ МАРКАЗИ

«ЭНЕРГИЯ ТЕЖАМКОРЛИГИ ВА ҚАЙТА ТИКЛАНУВЧАН ЭНЕРГИЯ  
МАНБАЛАРИ» ИЛМИЙ - ТАДҚИҚОТ ЛАБОРАТОРИЯСИ  
«МУҚОБИЛ ЁҚИЛГИ ВА ЭНЕРГИЯ КОРХОНАЛАРИ»  
АССОЦИАЦИЯСИ

*ISSN (print) 2091-5985*  
*ISSN (online) 2181-1946*

# ЭНЕРГИЯ ВА РЕСУРС ТЕЖАШ МУАММОЛАРИ

Журнал 2002 йилда  
ташкил қилинган

Йилига 4 марта  
чоп этилади

2023 й.

№3

ТОШКЕНТ - 2023

## ТАХРИР КЕНГАШИ АЪЗОЛАРИ

Акад. А.У.Салимов (раис), акад. Р.А.Захидов (раис ўринбосари), акад. Т.Х.Насиров, акад. Н.Р.Юсупбеков, т.ф.д., проф. С.М.Турабджанов, т.ф.д., проф. Ж.Б.Тошов

## ТАХРИР ҲАЙЪАТИ

**Бош мухаррир:** акад. Аллаев К.Р.  
**Бош мухаррир ўринбосари:** проф. Ситдиков Р.А.  
**Илмий котиб:** доц. Рахмонов И.У.

## ТАХРИР ҲАЙЪАТИ АЪЗОЛАРИ: ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСИ

т.ф.д., проф. Т.Ш. Гайибов т.ф.д., проф. А.Н. Назарычев (Россия)  
т.ф.д., проф. А.Д. Таслимов т.ф.д., проф. М.Ш. Мисриханов (Россия)  
т.ф.д., проф. М.К. Бобожанов т.ф.д., проф. М. Колщун (Словакия)  
т.ф.д., проф. М.И. Ибадуллаев проф. Christian Kreischer (Германия)

## ИССИКЛИК ВА АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСИ

т.ф.д., проф. Р.П. Бабаходжаев КР МФА акад. Б.К. Алияров (Қозогистон)  
т.ф.д., проф. Ё.С. Аббосов КР МФА акад. С.А. Кешувов (Қозогистон)  
т.ф.д., проф. И.И. Садыков т.ф.д., проф. Ж.С. Абдимуратов (Қозогистон)  
PhD, доц. Ш.Ш. Абдумаликов БелР МФА акад. А.А. Михалевич (Белоруссия)

## ЭНЕРГИЯ САМАРАДОРЛИГИ ВА ЭНЕРГИЯНИ ТЕЖАШ

т.ф.д., проф. Ф.А. Хошимов т.ф.д., проф. Н.Ш. Чемборисова (Россия)  
т.ф.д., проф. О.Х. Ишназаров т.ф.д., проф. Н.Л. Новиков (Россия)  
т.ф.д., проф. Н.Б. Пирматов проф. Ekkehard Bolte (Германия)  
т.ф.д., проф. Х.М. Муратов проф. Wilfrid Hofmann (Германия)

## МУҚОБИЛ ВА ҚАЙТА ТИКЛАНУВЧИ ЭНЕРГИЯ МАНБАЛАРИ

т.ф.д., проф. Г.Н. Узаков PhD, проф. Kyubock Lee (Жанубий Корея)  
т.ф.д., проф. Н.Р. Авезова т.ф.д., проф. Ж.О. Титова (Россия)  
т.ф.д., проф. А.М. Мирзабаев PhD, проф. Rhee Young Woo (Жанубий Корея)  
т.ф.д., доц. И.А. Юлдошев проф. Peter Schegner (Германия)

## НЕФТЬ ВА ГАЗ. ЁҚИЛГИ РЕСУРСЛАРИ

т.ф.д., проф. Н.С. Махмудов т.ф.д., проф. А.Ф. Максименко (Россия)  
т.ф.д., проф. У.С. Назаров т.ф.д., проф. Ф.Г. Жагфаров (Россия)  
т.ф.д., проф. Ф.Я. Умаров т.ф.д., проф. И.Г. Кантаржи (Россия)  
к.т.н., доц. И.Х. Халиматов PhD, доц. А.С. Кулиев (Россия)

## ЭКОЛОГИЯ ВА СУВ ЭНЕРГЕТИКАСИ МУАММОЛАРИ

т.ф.д., проф. М.М. Мухаммадиев PhD, проф. Lee Young-Seak (Жанубий Корея)  
т.ф.д., проф. Б.М. Турсунов т.ф.д., проф. Д.С. Ахметбаев (Қозогистон)  
т.ф.д., проф. О.Я. Гловацкий т.ф.д., проф. В.А. Хохлов (Россия)  
т.ф.д., проф. Б.У.Уришев PhD, проф. Namgee Jung (Жанубий Корея)

## Техник мухаррир:

доц. Ниёзов Н.Н.

**Тахририят манзили:** 100095, Тошкент ш., Университет кўчаси, 2, ТошДТУ, ЭФ биноси, 220-хона. Тел. +99871-246-08-04; E-mail: [tsu\\_energy@list.ru](mailto:tsu_energy@list.ru)

Журнал Тошкент шаҳар Матбуот ва ахборот бошқармаси рўйхатига олинган  
2007 йил 12 январ, 02-0044 гувоҳнома, ISSN 2091-5985 (print) ISSN (online) 2181-1946.

## МУНДАРИЖА

### ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСИ

<b>К.Р. Аллаев, Т.Ф. Махмудов.</b> Буғ-газ курилмаларнинг электр энергетика тизимларида ўткинчи режимларга таъсирини баҳолаш.....	12
<b>Р.А. Ситиков, О.В. Родионова.</b> Интеллектуализация-Ўзбекистон электр энергетикасининг барқарор ривожланишини таъминлашнинг устувор омили.....	23
<b>Ш.Б. Умаров.</b> Вентили ўзгартиргичларни ривожланиш босқичларининг обзори ва қўлланилиш истиқболи.....	37
<b>И.У. Буранов, Ш.В. Ҳамидов.</b> Энергетика ва инсон ресурсларини комплекс ривожлантириш ривожланаётган мамлакатларнинг барқарор ривожланишининг қалитидир.....	44
<b>А.Н. Расулов, М.Р. Рузиназаров, Н.К. Мнажатдинов.</b> Электроферромагнит контактларнинг занглашига олиб келадиган барқарорлаштирилган кучланиш манбасига оқим манбасини конвертори.....	50
<b>Н.Б. Пирматов, С.Э. Шерназаров, Д.К. Якубова, Т.Э. Рашидов.</b> Катта кувватли турбогенераторларнинг статор чулғами стерженларини тўлиб тиқилиб қолиши натижасида улардаги кизишини бартараф этиш чоралари.....	58
<b>О.Ё. Нурматов.</b> Йирик насос станцияларининг Ўзбекистон энергетика тизими тургунлигига таъсирини ўрганиш.....	69
<b>И.С. Самиев.</b> Таксимланган генерацияли электр тармоқларининг реактив кувватини қоплаш.....	79
<b>А.Л. Ҳақбердиев, Ф.Н. Тўйчиев.</b> Янги электр мотор асосида шахта ўзиорар вагони тортиш кўрсаткичларини тадқиқ килиш.....	86

### ИССИҚЛИК ВА АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСИ

<b>А.И. Анарбаев, Х.С. Исаходжаев, А.Н. Каракулов, М.А. Короли.</b> Иссиклик насосдан фойдаланиб биогаз ишлаб чиқариш схемаларни таҳлил килиш.....	93
<b>Х.М. Муратов, Н.О. Усмонов, Ж.Ю. Усмонов.</b> Айланувчи регенератив иссиқлик алмаштиригич айланиши частотасини иссиқлик бериш коэффициентига таъсирини ўрганиш.....	99

### ЭНЕРГИЯ САМАРАДОРЛИГИ ВА ЭНЕРГИЯНИ ТЕЖАШ

<b>Т.Х. Насиров, Ш.В. Ҳамидов.</b> Ўзбекистонда энергия самарадорликни ошириш йўллари	108
<b>И.У. Рахмонов, Э.Г. Усманов, Б.Б. Холихматов.</b> 0,4 кВли электр тармоқларида носимметрияни бошқариш.....	115
<b>С.Ф. Амирев, Содикжон С. Халиков, Сарвар С. Халиков.</b> Электр таъминоти подстанцияси ишончлиги масалалари.....	123
<b>А.Д. Таслимов, И.Ю. Давлетов, Х.М. Аминов.</b> Ўзини тутувчи изоляцияланган симли хаво линияларининг ишончлилик кўрсаткичлари таҳлили.....	130
<b>И.У. Рахмонов, М.Ф. Коржобова.</b> Пўлат әритиш жараённада электродлардан фойдаланиш муаммоларини таҳлил қилиш.....	138
<b>Н.Б. Пирматов, А.Т. Паноев.</b> Ем майдалаш курилмаларида қўлланилаётган асинхрон моторларни эксплуатация килиш жараёнларида частотали бошқариш орқали энергия ва ресурс тежаш таҳлили.....	145

### МУҚОБИЛ ВА ҚАЙТА ТИКЛАНУВЧИ ЭНЕРГИЯ МАНБАЛАРИ

<b>Н.Р. Авезова А.Э. Хайтмуҳамедов, К.А. Самиев.</b> Тошкент иқлим шароитларида қуёший параболоцилиндрик концентраторини энергетик кўрсаткичларини баҳолаш.....	153
<b>У.Б. Абдиев, Б.А. Юлдошев, С.Қ. Шоғучкаров, Ш.Н. Абильфайзиев, С.Ф. Тошпулатов.</b> Ясси ва текстурали бир кристалли фотоэлектрик батареялар юзасининг чангланиш даражасини таққослаш.....	166

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКАДА НАНОТЕХНОЛОГИЯЛАР

<b>И.А. Рахматуллаев, Н.В. Чернега, Х.З. Ботиров.</b> Импульси-даврийли лазер нури таъсирида 5-phenyl-2-[4-(5- phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3- oxazole моддасида икки фотонни уйғотилган люминесценциянинг энергетик характеристикалари.....	175
---	-----

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И ИННОВАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ И  
УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ  
«ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ»  
АССОЦИАЦИЯ «ПРЕДПРИЯТИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ТОПЛИВА И ЭНЕРГИИ»

*ISSN (print) 2091-5985*  
*ISSN (online) 2181-1946*

# ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

Журнал основан  
в 2002 году

Издаётся 4 раза  
в год

2023 г. ————— № 3

ТАШКЕНТ - 2023

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Академик А.У.Салимов (председатель), акад. Р.А.Захидов (заместитель председателя),  
акад. Т.Х.Насиров, акад. Н.Р.Юсупбеков, д.т.н., проф. С.М.Турабджанов,  
д.т.н., проф. Ж.Б.Тошов

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор:** акад. Аллаев К.Р.  
**Заместитель главного редактора:** проф. Ситдиков Р.А.  
**Ученый секретарь:** доц. Рахмонов И.У.

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ: ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

д.т.н., проф. Гайибов Т.Ш. д.т.н., проф. Назарычев А.Н. (Россия)  
д.т.н., проф. Таслимов А.Д. д.т.н., проф. Мисриханов М.Ш. (Россия)  
д.т.н., проф. Бобожанов М.К. д.т.н., проф. Колщун М. (Словакия)  
д.т.н., проф. Ибадуллаев М.И. проф. Christian Kreischer (Германия)

### ТЕПЛО - И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

д.т.н., проф. Бабаходжаев Р.П. акад. НАН РК Алияров Б.К. (Казахстан)  
д.т.н., проф. Аббосов Ё.С. акад. НАН РК Кешуов С.А. (Казахстан)  
д.т.н., проф. Садыков И.И. д.т.н., проф. Абдимуратов Ж.С. (Казахстан)  
PhD, доц. Абдумаликов Ш.Ш. академик НАН РБ Михалевич А.А. (Белоруссия)

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

д.т.н., проф. Хошимов Ф.А. Чемборисова Н.Ш. (Россия)  
д.т.н., проф. Ишназаров О.Х. Новиков Н.Л. (Россия)  
д.т.н., проф. Пирматов Н.Б. проф. Ekkehard Bolte (Германия)  
д.т.н., проф. Муратов Х.М. проф. Wilfrid Hofmann (Германия)

### АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

д.т.н., проф. Узаков Г.Н. PhD, проф. Kyubock Lee (Южная Корея)  
д.т.н., проф. Авезова Н.Р. д.т.н., проф. Титова Ж.О. (Россия)  
д.т.н., проф. Мирзабаев А.М. PhD, проф. Rhee Young Woo (Южная Корея)  
д.т.н., доц. Юлдошев И.А. проф. Peter Schegner (Германия)

### НЕФТЬ И ГАЗ. ТОПЛИВНЫЕ РЕСУРСЫ

д.т.н., проф. Махмудов Н.С. д.т.н., проф. Максименко А.Ф. (Россия)  
д.т.н., проф. Назаров У.С. д.т.н., проф. Жагфаров Ф.Г. (Россия)  
д.т.н., проф. Умаров Ф.Я. д.т.н., проф. Кантаржи И.Г. (Россия)  
к.т.н., доц. Халиматов И.Х. PhD, доц. Кулиев А.С. (Россия)

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

д.т.н., проф. Мухаммадиев М.М. PhD, проф. Lee Young-Seak (Южная Корея)  
д.т.н., проф. Турсунов Б.М. д.т.н., проф. Ахметбаев Д.С. (Казахстан)  
д.т.н., проф. Гловацкий О.Я. д.т.н., проф. Хохлов В.А. (Россия)  
д.т.н., проф. Уришев Б.У. PhD, проф. Namgee Jung (Южная Корея)

**Технический редактор:** доц. Ниёзов Н.Н.

**Адрес редакции:** 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, ТашГТУ, корпус ЭФ,  
ком. № 220. Тел. +99871-246-08-04; E-mail: [tstu\\_energy@list.ru](mailto:tstu_energy@list.ru)

Журнал зарегистрирован в Управлении печати и информации г. Ташкента 12.01.2007  
года, регистрационное свидетельство № 02-0044, ISSN 2091-5985 (print),  
ISSN (online) 2181-1946.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

<b>К.Р. Аллаев, Т.Ф. Махмудов.</b> Оценка влияния парогазовых установок на переходные режимы в электроэнергетических системах.....	12
<b>Р.А. Сидиков, О.В. Радионова.</b> Интеллектуализация – приоритетный фактор обеспечения устойчивого развития электроэнергетики Узбекистана.....	23
<b>Ш.Б. Умаров.</b> Обзор этапов развития и перспективы использования вентильных преобразователей.....	37
<b>И.У. Буранов, Ш.В. Хамидов.</b> Комплексное развитие энергетики и людских ресурсов – ключ к устойчивому развитию развивающихся стран.....	44
<b>А.Н. Расулов, М.Р. Рузиназаров, Н.К. Мнажатдинов.</b> Преобразователь источника тока в стабилизированный источник напряжения на базе электроферромагнитный цепи.....	50
<b>Н.Б. Пирматов, С.Э. Шерназаров, Д.К. Якубова, Т.Э. Рашидов.</b> Меры по устранению нагрева в обмотках статора турбогенераторов большой мощности в результате наполнения нагара в пазах стержня.....	58
<b>О.Ё. Нурматов.</b> Исследование влияния крупных насосных станций на устойчивость энергосистемы Узбекистана.....	69
<b>И.С. Самиев.</b> Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с распределённой генерацией.....	79
<b>А.Л. Хакбердиев, Ф.Н. Тойчиев.</b> Исследование тяговых характеристик шахтной самоходной машины на базе нового электродвигателя.....	86

### ТЕПЛО - И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

<b>А.И. Анараев, Х.С. Исаходжаев, А.Н. Каракулов, М.А. Короли.</b> Анализ технологических схем производства биогаза с использованием теплового насоса.....	93
<b>Х.М. Муратов, Н.О. Усмонов, Ж.Ю. Усмонов.</b> Исследование влияния частоты вращения роторного регенеративного теплообменника на коэффициент теплоотдачи.....	99

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

<b>Т.Х. Насиров, Ш.В. Хамидов.</b> Пути повышения энергоэффективности в Узбекистане..	108
<b>И.У. Рахмонов, Э.Г. Усманов, Б.Б. Холихматов.</b> Управление несимметрией в электрических сетях 0,4 кВ.....	115
<b>С.Ф. Амирров, Содикжон С. Халиков, Сарвар С. Халиков.</b> Вопросы надежности подстанций электроснабжения.....	123
<b>А.Д. Таслимов, И.Ю. Давлетов, Х.М. Аминов.</b> Анализ показателей надежности воздушных линий выполненных с применением самонесущих изолированных проводов	130
<b>И.У. Рахмонов, М.Ф. Коржобова.</b> Анализ проблем использования электродов в процессе выплавки стали.....	138
<b>Н.Б. Пирматов, А.Т. Паноев.</b> Энерго- и ресурсосбережение за счет частотного регулирования при работе асинхронных двигателей, используемых в устройствах измельчения кормов.....	145

### АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

<b>Н.Р. Авезова, А.Э. Хайтмухамедов, К.А. Самиев.</b> Оценка энергетических показателей параболоцилиндрического солнечного концентратора в климатических условиях города Ташкента.....	153
<b>У.Б. Абдиев, Б.А. Юлдошев, С.К. Шогучкаров, Ш.Н. Абильфайзиев, С.Ф. Тошпулатов.</b> Сравнение уровня запыленности поверхности монокристаллических фотоэлектрических батарей с плоской и текстурированной поверхностью.....	166

### НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

<b>И.А. Рахматуллаев, Н.В. Чернега, Х.З. Ботиров.</b> Энергетические характеристики двухфотонно-возбуждаемой люминесценции в 5-phenyl-2-[4-(5- phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3- oxazole при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.....	175
---	-----

MINISTRY OF ENERGY OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN  
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION, SCIENCE AND INNOVATION OF  
THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN  
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
SAVING ENERGY AND RESOURCES SCIENTIFIC-PRACTICAL AND  
EDUCATIONAL CENTER  
THE SCIENTIFIC RESEARCH LABORATORY OF "ENERGY SAVINGS  
AND RENEWABLE SOURCES OF ENERGY"  
ASSOCIATION OF ALTERNATIVE FUEL AND ENERGY ENTERPRISES

*ISSN (print) 2091-5985  
ISSN (online) 2181-1946*

## **PROBLEMS OF ENERGY AND SOURCES SAVING**

The magazine founded  
in 2002

Printed 4 times  
a year

2023 y.————— №3

TASHKENT - 2023

## **EDITORIAL COUNCIL**

Academician A.U. Salimov (chairman), acad. R.A. Zakhidov (deputy chairman)  
acad. T.Kh. Nasirov, acad. N.R. Yusupbekov, DScTech, prof. S.M. Turabdzhano-  
DScTech, prof. Zh.B.Toshov

## **EDITORIAL TEAM**

**Chief Editor:** acad. Allaev K.R.  
**Deputy Chief:** prof. Sitiukov R.A.  
**Scientific Secretary Editor:** docent. Rakhmonov I.U.

## **MEMBERS OF THE EDITORIAL COLLEGE:**

### ***ELECTRIC POWER***

DSc, prof. Gayibov T.Sh.  
DSc, prof. Taslimov A.D.  
DSc, prof. Bobozhanov M.K.  
DSc, prof. Ibadullaev M.I.

DSc, prof. Nazarychev A.N. (Russia)  
DSc, prof. Misrikhanov M.Sh. (Russia)  
DSc, prof. M. Kolcun (Slovakia)  
prof. Christian Kreischer (Germany)

### ***HEAT AND NUCLEAR ENERGY***

DSc, prof. Babakhodzhaev R.P.  
DSc, prof. Abbosov Y.S.  
DSc, prof. Sadykov I.I.  
PhD, dots. Abdumalikov Sh.Sh.

acad. NASC RK Aliyarov B.K. (Kazakhstan)  
acad. NASC RK Keshuov S.A. (Kazakhstan)  
DSc, prof. Abdimuratov Zh.S. (Kazakhstan)  
acad. NASC RB A.A. Mikhalevich (Belarus)

### ***ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING***

DSc, prof. F.A. Khoshimov  
DSc, prof. Ishnazarov O.H.  
DSc, prof. Pirmatov N.B.  
DSc, prof. Muratov Kh.M.

DSc, prof. Chemborisova N.Sh. (Russia)  
DSc, prof. Novikov N.L. (Russia)  
prof. Ekkehard Bolte (Germany)  
Prof. Wilfrid Hofmann (Germany)

### ***ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES***

DSc, prof. Uzakov G.N.  
DSc, prof. Avezova N.R.  
DSc, prof. Mirzabaev A.M.  
DSc, dots. Yuldashev I.A.

PhD, prof. Kyubock Lee (South Korea)  
DSc, prof. Titova Zh.O. (Russia)  
PhD, prof. Rhee Young Woo (South Korea)  
prof. Peter Schegner (Germany)

### ***OIL AND GAS. FUEL RESOURCES***

DSc, prof. Makhmudov N.S.  
DSc, prof. Nazarov U.S.  
DSc, prof. Umarov F.Ya.  
PhD, dots. Khalismatov I.Kh.

DSc, prof. Maksimenko A.F. (Russia)  
DSc, prof. Zhagfarov F.G. (Russia)  
DSc, prof. Kantarzhi I.G. (Russia)  
PhD, Assoc. Kuliev A.S. (Russia)

### ***ECOLOGY AND WATER-ENERGY PROBLEMS***

DSc, prof. Mukhammadiev M.M.  
DSc, prof. Tursunov B.M.  
DSc, prof. Glovatsky O. Ya.  
DSc, prof. Urishev B.U.

PhD, prof. Lee Young-Seak (South Korea)  
DSc, prof. Akhmetbaev D.S. (Kazakhstan)  
DSc, prof. Khokhlov V.A. (Russia)  
PhD, prof. Namgee Jung (South Korea)

### **Technical Editor:**

docent. Niyoziyev N.N.

***The address of edition:*** 100095, Tashkent, University str., 2, TSTU, EF building, room 220.

***Telephone:*** +99871-246-08-04; ***E-mail :*** [tstu\\_energy@list.ru](mailto:tstu_energy@list.ru)

***The journal is registered in the Printing and Information Management of Tashkent, the registration certificate № 02-0044 on 2007.01.12, ISSN 2091-5985 (print) ISSN (online) 2181-1946.***

## CONTENTS

### ELECTRIC POWER

<b>K.R. Allayev, T.F. Makhmudov.</b> Evaluation of the impact of combined-cycle plants on transient regimes in electric power systems.....	12
<b>R.A. Situdikov, O.V. Rodionova.</b> Intellectualization is a priority factor in ensuring the sustainable development of Uzbekistan's electric power industry.....	23
<b>Sh.B. Umarov.</b> Overview of the stages of development and prospects for the use of valve converters.....	37
<b>I.U. Buranov, Sh.V. Khamidov.</b> Integrated development of energy and human resources is the key to sustainable development of developing countries.....	44
<b>A.N. Rasulov, M.R. Ruzinazarov, N.K. Mnazhatdinov.</b> Converter of a current source into a stabilized voltage source based on an electroferromagnetic circuit.....	50
<b>N.B. Pirmatov, S.E. Shernazarov, D.K. Yakubova, T.E. Rashidov.</b> Measures to eliminate heating in the stator windings of high power turbo generators resulting from filling of cock in the groots of the rod.....	58
<b>O.Yo. Nurmatov.</b> Study of the impact of large pumping stations on the stability of the power system of Uzbekistan.....	69
<b>I.S. Samiev.</b> Compensation of reactive power of electric networks with distributed generation.	79
<b>A.L. Haqberdiev, F.N. Tuychiev.</b> Research on traction performance of a mine self-propelled car based on a new electric motor.....	86

### HEAT AND NUCLEAR ENERGY

<b>A.I. Anarbaev, Kh.S. Isakhodjaev, A.N. Karaqulov, M.A. Koroli.</b> By using heat pump biogas production's schemes analysis.....	93
<b>X.M. Muratov, N.O. Usmonov, J.Yu. Usmonov.</b> Study of the influence of the rotation speed of a rotary regenerative heat exchanger on the heat transfer coefficient.....	99

### ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

<b>T.H. Nasirov, Sh.V. Khamidov.</b> Ways to improve energy efficiency in Uzbekistan.....	108
<b>I.U. Rakhmonov, E.G. Usmanov, B.B. Kholikhmatov.</b> Management of unsymmetry in electrical networks 0,4 kV.....	115
<b>S.F. Amirov, Sodikjon S. Khalikov, Sarvar S. Khalikov.</b> Electrical substation reliability issues.....	123
<b>A.D. Taslimov, I.Y. Davletov, Kh.M. Aminov.</b> Analysis of reliability indicators of overhead lines made using self-supporting insulated wires.....	130
<b>I.U. Rakhmonov, M.F. Korjobova.</b> Analysis of the problems of using electrodes in the steel melting process.....	138
<b>N.B. Pirmatov, A.T. Panoev.</b> Energy and resource saving due to frequency control during operation of asynchronous motors used in feed grinding devices.....	145

### ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

<b>N.R. Avezova, A.E. Khaitmukhamedov, K.A. Samiev.</b> Energy assessment of a parabolic trough collector performances under the climatic conditions of Tashkent city.....	153
<b>U.B. Abdiyev, B.A. Yuldashev, S.Q. Shoguchkarov, Sh.N. Abilfayziyev, S.F. Toshpulatov.</b> Comparison of the level of dust on the surface of monocrystalline photoelectric batteries with flat and textured surfaces.....	166

### NANOTECHNOLOGIES IN ELECTRIC POWER ENGINEERING

<b>I.A. Rakhmatullaev, N.V. Tcherniega, Kh.Z. Botirov.</b> Energy characteristics of two-photon-excited luminescence in 5-phenyl-2-[4-(5-phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3-oxazole under periodic pulsed laser excitation.....	175
--	-----

УДК 621.311

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК НА ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ****К.Р. Аллаев, Т.Ф. Махмудов**

Электр энергетика тизимларининг умумий ишлаб чиқарилишида буг-газ қурилмаларнинг улуши ортиши муносабати билан ўткинчи режимларда бундай агрегатларнинг динамик хусусиятларини ўрганиши зарурати пайдо бўлади. Мақолада энергетика тизимининг тургунлигига таъсирини таҳлил этиши учун буг-газ ва газ турбинали қурилмаларнинг рақамли моделлари амалга оширилган. Электр тизимининг икки машинали схемасининг тест туртқиларини симуляцияси амалга оширилди, бу газ турбинали ва буг-газ қурилмаларнинг динамик хусусиятларини аниқлашдан иборат. Катта қувватли бир вали газ турбинали қурилмаларининг тургунликга ижобий таъсири катта инерция доимийлари туфайли ўткинчи режимларда частотанинг секунроқ пасайиши шаклида намоён бўлади, буг турбинали қурилмалари эса газ турбиналари билан жиҳозланган агрегатларга нисбатан динамик тургунликнинг кичикроқ чегарасига эга, бу буг турбинали қурилмаларнинг кичик инерцияси билан изоҳланади. Бироқ, буг турбинали агрегатларининг қувватини бошқарши ўткинчи режимларда қувват мувозанатини таъминлаши учун ишлатилиши мумкин. 14-тугунынг синов схемаси (ИЕЕЕ) мисолида, электр энергетика тизимидағи частотанинг ўзгариши буг-газ қурилмалар улушининг ортиши билан таҳлил қилинди.

**Калит сўзлар:** газ турбинали қурилмаси, буг-газ турбинали қурилмаси, электр энергетика тизими, тургунлик, ўткинчи режимлари, инерция доимийси.

В связи с возрастанием доли парогазовых установок в суммарной генерации электроэнергетических систем возникает необходимость в изучение динамических свойств таких агрегатов во время переходных режимов. В статье реализованы цифровые модели парогазовых и газотурбинных установок с целью анализа их влияния на устойчивость энергосистемы. Проведено моделирование тестовых возмущений двухмашинной схемы электрической системы, заключающееся в определении динамических свойств газотурбинных и парогазовых установок. Показано положительное влияние мощных одновальных газотурбинных установок на устойчивость в виде более медленного снижения частоты при переходных режимах за счет больших постоянных инерции, при этом паротурбинные установки имеют меньший запас динамической устойчивости по сравнению с агрегатами, оснащенными газовыми турбинами, что объясняется меньшей инерцией паротурбинной установки. Однако управление мощностью агрегатов паротурбинных установок может быть использовано для обеспечения баланса мощностей в переходных режимах. На примере тестовой 14-ти узловой схемы

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

(IEEE) сделан анализ изменения частоты в электроэнергетической системе при увеличении доли парогазовых установок.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, парогазовая установка, электроэнергетическая система, устойчивость, переходные режимы, постоянная инерции.

*In connection with the increase in the share of combined cycle plants in the total generation of electric power systems, there is a need to study the dynamic properties of such units during transient conditions. The article implements digital models of combined cycle and gas turbine plants in order to analyze their impact on the stability of the energy system. Simulation of test disturbances of a two-machine circuit of an electrical system was carried out, which consists in determining the dynamic properties of gas turbine and combined-cycle plants. The positive effect of powerful single-shaft gas turbine plants on stability is shown in the form of a slower decrease in frequency during transient conditions due to large inertia constants, while steam turbine plants have a smaller margin of dynamic stability compared to units equipped with gas turbines, which is explained by the lower inertia of the steam turbine plant. However, power control of steam turbine units can be used to ensure power balance in transient conditions. On the example of a test 14-node circuit (IEEE), an analysis was made of the change in frequency in the electric power system with an increase in the share of combined cycle plants.*

**Keywords:** gas turbine plant, combined cycle plant, electric power system, stability, transient conditions, constant of inertia.

**Введение.** Одним из главных приоритетов в развитии энергетического оборудования является поиск новых технических решений, способных обеспечить устойчивость работы энергосистем и повысить качество переходных процессов.

В настоящее время глобальным трендом в энергетике является строительство газотурбинных и парогазовых установок (ПГУ), которые уже используются на большинстве электростанций мира. В некоторых странах к 2005 году более 90% станций использовали парогазовые установки. Строительство этих установок имеет особое значение при переходе на возобновляемые источники энергии, характеризующиеся высокой изменчивостью генерации. Чтобы обеспечить стабильность работы электрических сетей при использовании различных источников энергии, важно разработать наиболее эффективные системы регулирования ГТУ и ПГУ [1].

В 2008 году General Electric запустила первый парогазовый блок станции Inland Empire Energy Center в Калифорнии, которая достигла эффективности в 60%. Хотя установка могла бы продолжать работу еще около двадцати лет, компанией General Electric было принято решение вывести электростанцию из эксплуатации в 2019 году, так как блоки станции не были загружены на установленную мощность. Это произошло за счет использования источников возобновляемой генерации. Было принято решение об установке накопителей электрической энергии на месте парогазовых установок для сглаживания колебаний частоты, вызванных работой

источников возобновляемой генерации. Компания General Electric объясняет это также тем, что электростанция не предназначена для работы в пиковый период, когда нужно быстро запускать и останавливать энергетическое оборудование. В настоящее время разработаны и используются парогазовые установки, в которых предусмотрено резкое изменение мощности для покрытия пиков графиков нагрузки [2].

В том же 2008 году в Соединенных Штатах Америки произошла авария, приведшая к отключению генерирующих мощностей в объеме 6,6 ГВт, вызванная погасанием факела из-за недостаточной подачи топлива в ГТУ. Локальное повышение частоты из-за короткого замыкания (КЗ) привело к повышению производительности компрессора на газотурбинной установке, которая работала синхронно с системой. Одновременное перекрытие топливных клапанов в результате повышения частоты вращения турбины, нарушило устойчивый процесс работы установки, приведшее к погасанию факела, при этом агрегаты были автоматически отключены от системы.

Регулирование частоты и обеспечение резерва регулирования по-прежнему являются важными вопросами, требующими решения. Весьма серьезной проблемой в этом контексте является усложнение задачи стабильной работы системы в связи с использованием новых первичных двигателей, в том числе одновальных газотурбинных установок, которые имеют свои особенности, оказывающие отрицательное влияние на устойчивость энергосистем за счет сложности их регулирования в переходных режимах [3, 4].

Относительно небольшие величины мощности и постоянные инерции газотурбинных установок создают дополнительные трудности, связанные с их реакцией на большие возмущения. Это, в свою очередь, может приводить к нарушению динамической устойчивости энергосистемы и выходу из синхронизма энергоблоков [5].

У одновальных ГТУ с редуктором наблюдается наибольшее значение механической постоянной инерции, в то время как многовальные ГТУ, силовая турбина которых непосредственно соединена с ротором генератора, имеют наименьшее значение механической постоянной инерции [6].

Механическая постоянная инерции для разных типов ГТУ различна. Для одновальных ГТУ она составляет от 4,5 до 15 сек., для многовальных ГТУ с редуктором - от 3,5 до 6 сек., а для многовальных ГТУ без редуктора - от 1,5 до 3 сек. В многовальных ГТУ без редуктора генератор вносит основной вклад в значение механической постоянной инерции, так как момент инерции силовой турбины невелик. А в многовальных ГТУ с редуктором генератор и редуктор вносят примерно равные вклады в значение механической постоянной инерции. Также можно отметить, что у одновальных ГТУ с повышенной частотой вращения турбины, значительный вклад в значение механической постоянной инерции вносит силовая турбина, момент инерции которой, при приведении к частоте вращения генератора, в два раза больше, чем сумма моментов инерции ротора генератора и редуктора [7,8].

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**Модель простейшей энергосистемы.** Влияние агрегатов ПГУ на устойчивость будем проводить на основе тестовой схемы энергосистемы генератор – приемная система (рис.1). Исходные данные простейшей электропередачи приведены в таблицах 1-4.

В качестве генерирующего агрегата представлена синхронная машина номинальной мощностью 197,65 МВт, которая подключена к энергосистеме через линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 220 кВ и протяженностью 160 км. На шинах системы имеется нагрузка мощностью 1300 МВт. Для анализа устойчивости будет проводиться моделирование возмущений в виде короткого замыкания и увеличения нагрузки на шинах системы.

Для анализа влияния ПГУ и ГТУ на динамическую устойчивость электроэнергетических систем реализованы их цифровые модели. Здесь и в последующем моделировании в качестве автоматического регулятора возбуждения была принята модель регулятора типа EXST4B в соответствии со стандартом IEEE Std 421.5-2016 [9].

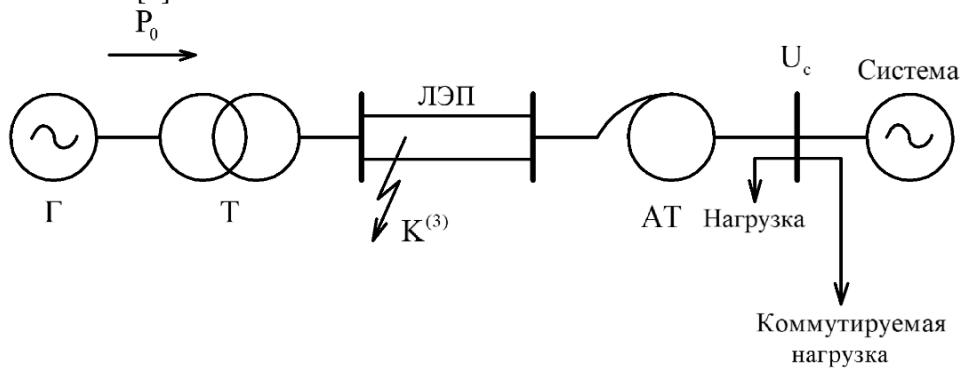


Рис. 1. Схема двухмашинной тестовой схемы

Таблица 1

## Параметры генератора

$P_{ном}, MBm$	$\cos\phi_{ном}$	$U_{ном}, kB$	$X_d, o.e.$	$X'_d, o.e.$	$T_j, сек.$
197.65	0.85	15.75	1.46	0.195	14

Таблица 2

## Параметры ЛЭП

Марка провода	Длина, км	$U_{ном}, кВ$	$X_0, Ом/км$
AC-300/39	160	220	0,429

Таблица 1

## Параметры трансформаторов

Трансформатор		Автотрансформатор	
Тип	$U_k, \%$	Тип	$U_k, \%$
ТДЦ-250000/220	11	АТДЦТН-250000/220	11

Таблица 4

## Параметры системы

Уставка $U_c$ , о.е.	$S_{k3}$ , MVA	$X/R$	Изменение мощности при регулировании частоты, $MBm/T_{ij}$	Мощность нагрузки, MBm	Мощность подключаемой нагрузки, MBm
1	5000	10	100	1300	200

Согласно [10] значительные инерции одновальных газовых турбин в большей степени влияют на характер переходных процессов. Однако при рассмотрении электромеханических переходных процессов малой продолжительности регулирование частоты вращения газовых турбин не окажет значительного влияния на демпфирование возникающих колебаний.

Так же как и традиционные паросиловые блоки, газотурбинные установки имеют свой динамический отклик в ответ на отклонения скорости изменения частоты системы.

На рис. 2. приведены кривые изменения частоты при подключении к тестовой схеме (рис.1.) нагрузки 200 МВт. При этом эквивалентная постоянная инерции энергосистемы изменялась от 3,7 до 14 секунд. Было принято, что величины постоянных инерций мощных одновальных паровых и газовых турбин соответствуют 8 и 14 секундам [11,12]. При моделировании использовалась модель турбины типа GAST с неизменными настройками за время моделирования.

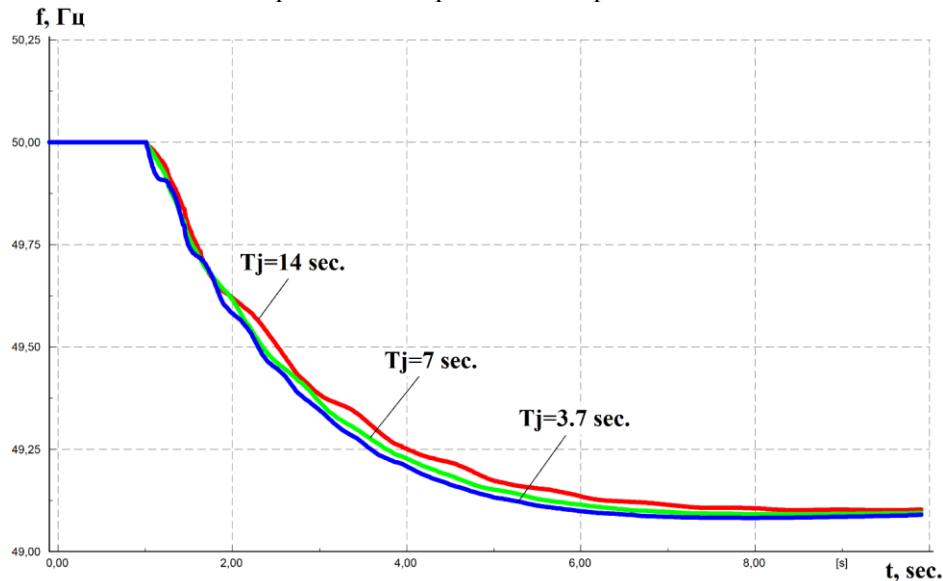


Рис. 2. Изменение частоты в системе при присоединении нагрузки

Из полученных результатов можно сделать вывод, что большая величина постоянной инерции уменьшает скорость снижения частоты. Таким образом, можно

говорить о положительном эффекте газотурбинных установок на устойчивость в виде более медленного снижения частоты при переходных режимах [13].

На рис.3 показаны результаты моделирования трехфазного короткого замыкания длительностью 0,25 секунд на стороне высокого напряжения силового трансформатора.

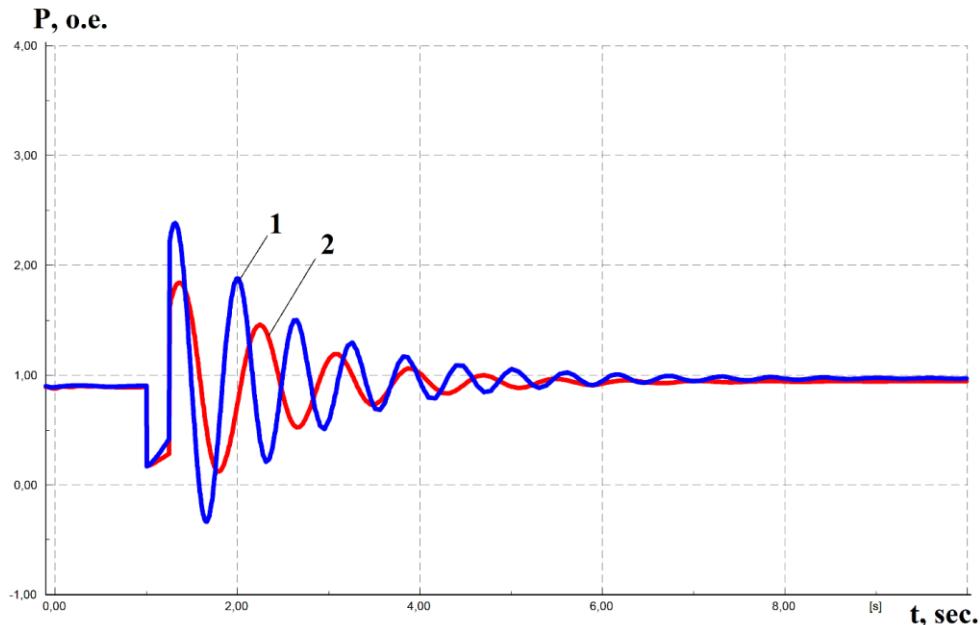


Рис.3. Изменение активной мощности генераторов ГТ и ПТ в результате КЗ:  
1- ПТУ; 2- ГТУ

Очевидно, что агрегаты с паровой турбиной имеют меньший запас динамической устойчивости по сравнению с агрегатами, оснащенными газовыми турбинами, что объясняется меньшей инерцией паротурбинной установки. К примеру, агрегаты ПГУ мощностью 450 МВт имеют сильно отличающиеся постоянные инерции: инерция ПТ составляет 9,3 сек., а ГТ – 12,73 секунд.

При этом управление агрегатами ПТ может быть использовано для регулирования мощностью в переходных режимах.

**Модель 14-ти узловой энергосистемы.** Исследуем влияние ПГУ в энергосистеме в переходных режимах на примере схемы 14-ти узловой электроэнергетической системы IEEE, имеющей 5 генерирующих узлов (рис.4).

В базовом варианте в генерирующих узлах 2, 3 и 4 установлены традиционные паросиловые блоки мощностью 100 МВт с постоянной инерции 12 сек. В качестве балансирующего узла выбран узел номер 1, где установлен паросиловой блок номинальной мощностью 400 МВт. Далее на место паровых блоков в генерирующих узлах 2, 3 и 4 будут устанавливаться модели ПГУ мощностью 100 МВт каждая и постоянными инерции равными 4 секунды.

В качестве модели паровой турбины была использована модель типа GAST.

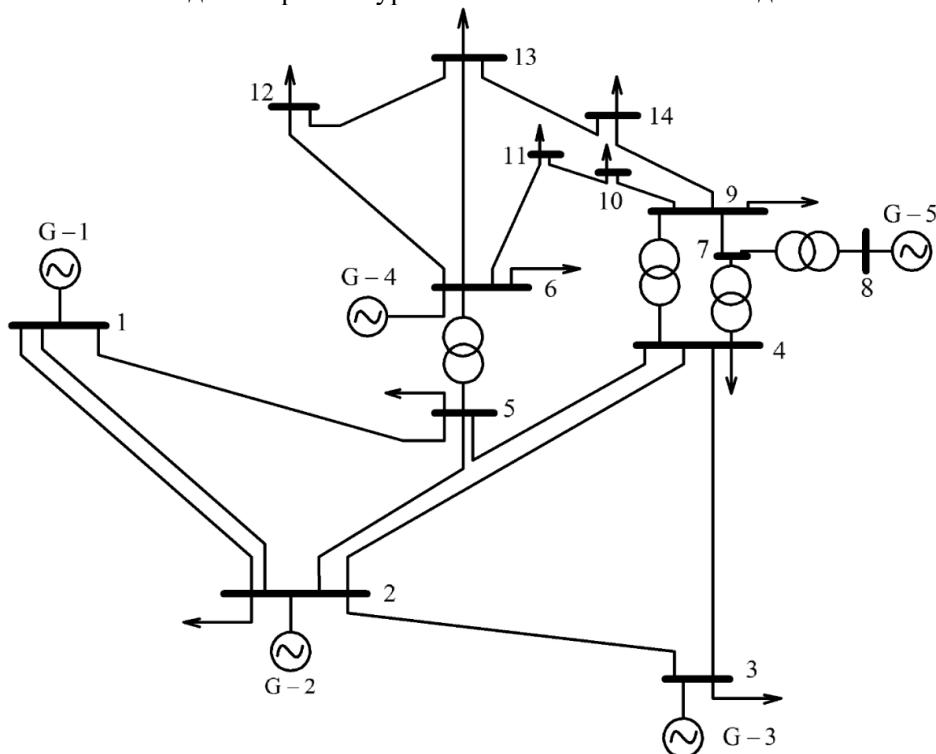


Рис. 4. Принципиальная схема тестовой 14-ти узловой энергосистемы

Генераторы, входящие в тестовую схему, описываются математической моделью на основе уравнений Парка-Горева. При этом мощности нагрузок не изменяются во время моделирования.

Ниже в табл. 6-8 приведены параметры основного электрооборудования тестовой энергосистемы и результаты расчета установившегося режима.

## Таблица 6 Данные по узлам

№	$U_{ном},$ $kV$	Напряжение		Мощность нагрузки		Мощность генерации		Пределы генерации	
		Фаза, град	Моду ль, $kV$	$P,$ $MBm$	$Q,$ $MBAp$	$P,$ $MBm$	$Q,$ $MBAp$	$Q_{max},$ $MBAp$	$Q_{min},$ $MBAp$
1	230	0,0	230,0	4,2	0	152,2	-46		
2	230	-1,2	230,0	21,7	12,7	60,0	10,6	50,0	-40,0
3	230	-3,2	230,0	94,2	19,0	35,0	38,1	40,0	0,0
4	230	-2,7	228,1	47,8	-3,9				
5	230	-2,3	228,1	7,6	1,6				
6	115	-5,8	115,0	11,2	7,5	30,0	42,7	24,0	-6,0
7	115	-4,7	115,3						

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

8	20	1,3	20,0			60,0	1,8	24,0	-6,0
9	115	-5,3	114,6	29,5	16,6				
10	115	-5,5	114,5	19,0	7,8				
11	115	-5,8	114,5	33,5	11,8				
12	115	-5,9	114,5	16,1	11,6				
13	115	-5,9	114,5	33,5	15,8				
14	115	-5,6	114,4	14,9	5,0				

Таблица 7

### Данные по ветвям

Нач	Кон	R, Ом	X, Ом	B, мкСм	Kтр
1	2	3,376	10,3	151,5152	-
1	5	9,414187	38,8625	282,3691	-
2	3	8,187537	34,49428	251,3774	-
2	4	10,12509	30,722	214,6465	-
2	5	9,922968	30,29685	195,1331	-
3	4	11,67582	29,80027	198,5767	-
4	5	2,326104	7,337246	73,46189	-
4	7	0,0000	105,8105	0,0000	0,511247
4	9	0,0000	276,2604	0,0000	0,515996
5	6	0,0000	115,8037	0,0000	0,536481
6	11	1,034332	2,166021	0,0000	-
6	12	1,33849	2,785771	0,0000	-
6	13	0,7203735	1,41864	0,0000	-
7	8	0,0000	23,2958	0,0000	-
7	9	0,7203735	1,41864	0,0000	-
9	10	0,3464109	0,9202054	0,0000	-
9	14	1,384228	2,944439	0,0000	-
10	11	0,893524	2,091643	0,0000	-
12	13	2,405819	2,176693	0,0000	-
13	14	1,861428	3,789938	0,0000	-

Таблица 8

### Параметры режима сети

Начало	Конец	P <sub>нач</sub> , МВт	Q <sub>нач</sub> , МВАр	P <sub>кон</sub> , МВт	Q <sub>кон</sub> , МВАр
1	2	94,3	-37,9	-93,7	23,7
1	5	52,9	-8,2	-52,4	-4,6
2	3	51,8	-18	-51,4	6,5
2	4	46,2	-6	-45,8	-4
2	5	34,1	-1,8	-33,8	-7,8
3	4	-7,8	12,6	7,9	-22,8
4	5	-52,3	13,8	52,4	-17,20
4	7	34,1	11,8	-34,1	-10,5
4	9	8,2	5,1	-8,2	-4,6

5	6	26,3	27,9	-26,3	-24,7
6	11	6,1	23,2	-6,1	-23,1
6	12	14,4	12,6	-14,4	-12,5
6	13	24,5	24,2	-24,5	-24
7	8	-60	4,6	60	1,8
7	9	94,1	5,9	-93,6	-4,9
9	10	46,5	-3,2	-46,5	3,3
9	14	25,8	-3,9	-25,7	4,1
10	11	27,5	-11,1	-27,4	11,3
12	13	-1,7	0,9	1,7	-0,9
13	14	-10,8	9,1	10,8	-9,1

На рис. 5 показаны кривые изменения частоты в энергосистеме при отключении станции мощностью 100 МВт в узле 5.

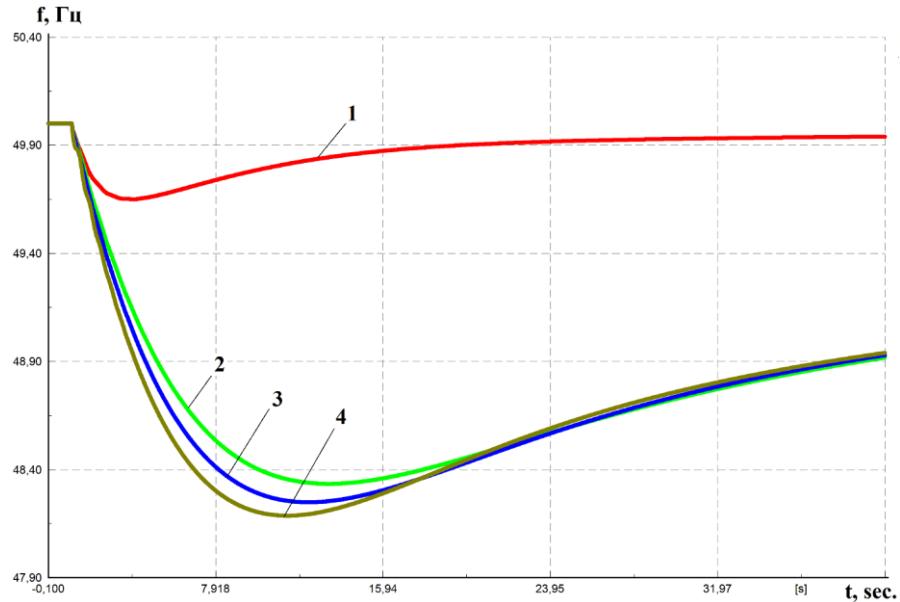


Рис. 5. Снижение частоты в системе при отключении генерирующего агрегата в узле 5: 1 – нет установок ПГУ в системе, 2 – одна ПГУ, 3 – две ПГУ, 4 – три ПГУ

Из полученных характеристик изменения частоты (рис.5) видно, что с увеличением доли ПГУ в суммарной мощности энергосистемы ее инерционность снижается, что объясняется меньшими постоянными инерциями ПТ, что в свою очередь приводит к уменьшению запасов устойчивости энергосистемы в переходных режимах.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать вывод, что большие постоянные инерции мощных одновальных ГТ позволяют повышать пределы устойчивости энергосистем за счет лучшего демпфирования колебаний параметров режима при больших возмущениях, возникающих, в том числе за счет стохастического характера

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

генерации возобновляемых источников энергии. С другой стороны – становится затруднительным использование агрегатов на базе ГТ для регулирования частоты в пиковых режимах энергосистем.

ПТ могут быть использованы при регулировании частоты в переходных режимах, но за счет меньших постоянных инерции данные установки снижают инерционность и, соответственно, запас устойчивости электрических систем.

В виду особенностей технологического процесса работы ПГУ, а именно связи режима работы ПТ с режимом эксплуатации ГТ, которые имеют значительно меньшие диапазоны регулирования мощности, особое внимание должно быть уделено разработке и внедрению в эксплуатацию высокоеффективных ПГУ, имеющих высокие маневренные характеристики и устойчивые к резким изменениям мощности агрегатов.

Таким образом, полученные в работе результаты могут быть использованы в практике диспетчерского управления при анализе динамических свойств энергосистем, содержащих парогазовые установки.

### Литература

1. Зысин Л. В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие. – СПб.: Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. –368 с.
2. A. Kole, "A review and study on advanced control and automation functions and future control for a modern combined cycle power plant," 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI), Kolkata, India, 2016, pp. 215-220, doi: 10.1109/ICICPI.2016.7859705.
3. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. /Под общей редакцией академика Салимова А.У. -Т.:Fan va tehnologiyalar. 2021, -953 с.
4. P. Ivanova, O. Linkevics and A. Sauhats, "Mathematical description of combined cycle gas turbine power plants' transient modes," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, Italy, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977405.
5. L.N. Hannett and J.W. Feltes, "Testing and Model Validation for Combined-Cycle Power Plants", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.
6. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – 2-е изд. – М.:МЭИ, 2006. – 584 с.
7. Александров А.С., Жуков В.В., Кузьмичев В.А. О некоторых проблемах надежности и живучести электростанций с парогазовыми установками. //Энергетик, 2012, №12.
8. Tang, Y., Li, F., Chen, Q., et al. (2018). Frequency prediction method considering demand response aggregate characteristics and control effects. Applied energy, 229, 936–944.

9. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005), pp.1-207, 26 Aug. 2016, doi: 10.1109/IEEEESTD.2016.7553421.
10. Герасимов А.С., Смирнов А.Н. Моделирование газотурбинных установок при анализе электромеханических переходных процессов //Известия НТЦ ЕЭС, 2013.
11. CIGRE Task Force C4.02.25, "Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined Cycle Power Plants", December, 2003.
12. Sun, W., Wang, Q., Ye, Y., et al. (2022). Unified modelling of gas and thermal inertia for integrated energy system and its application to multitype reserve procurement. *Applied Energy*, 305, 117963.
13. Кавалеров Б.В., Казанцев В.П., Математическое моделирование электрической системы в задачах испытания и настройки средств управления газотурбинных энергетических установок. //Электротехнические комплексы и системы управления, 2011, -№ 1.

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом*

УДК 621.3

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ – ПРИОРИТЕТНЫЙ ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ УЗБЕКИСТАНА

Р.А. Ситдиков, О.В. Радионова

Мақолада иқтисодиётнинг барқарор ривожланишига боғлиқ бўлган Ўзбекистон электр энергетикаси саноатининг барқарор ривожланишини таъминлаш масалалари муҳокама қилинган. Электр энергиясини ишилаб чиқарши, узатиш, тақсимлаши ва истеъмол қилишининг янги технологияларини жорий этиши билан электр энергетика саноатини барқарор ривожлантириши талаби энергетика соҳасини интеллектуаллаштириши, шунингдек, уни қўллаб-қувватловчи компонентларнинг мавжудлиги зарурлигини тақозо этади: кадрлар, илмий, молиявий, ташкилий, техник ва технологик, ахборот, меъёрий-хуқуқий ва бошқалар. Интеллектуализация омилларининг электр энергетикаси ва унинг ривожланишига таъсири таҳлил қилинади, интеллектуализация жараёнини кадрлар билан таъминлаши етакчи рол ўйнайди.

**Калим сўзлар:** электр энергетика, интеллектуаллаш, барқарор ривожланиши, ривожланиши компонентлари, кадрлар таъминоти.

В статье рассматриваются вопросы обеспечения устойчивого развития электроэнергетики Узбекистана, от которых зависит стабильное развитие экономики. Требование устойчивого развития электроэнергетики, при внедрении новых технологий генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии диктует необходимость интеллектуализации энергетики, а также наличия обеспечивающих её компонент: кадровой, научной, финансовой, организационной, технико-технологической, информационной, нормативно-правовой и др. Анализируется влияние факторов интеллектуализации на электроэнергетику и её развитие, при этом ведущую роль играет кадровое обеспечение процесса интеллектуализации.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, интеллектуализация, устойчивое развитие, компоненты развития, кадровое обеспечение.

*The article discusses issues of ensuring sustainable development of the electric power industry in Uzbekistan, on which the stable development of the economy depends. The requirement for sustainable development of the electric power industry, with the introduction of new technologies for the generation, transmission, distribution and consumption of electricity, dictates the need for intellectualization of the energy sector, as well as the presence of components that support it: personnel, scientific, financial, organizational, technical and technological, information, regulatory -legal, etc. The influence of intellectualization factors on the electric power industry and its development is analyzed, with the leading role played by staffing the intellectualization process.*

**Key words:** *electric power industry, intellectualization, sustainable development, development components, staffing.*

**Введение.** Стратегическая задача реформирования и усиления технологических возможностей электроэнергетической отрасли Узбекистана заключается в обеспечении её устойчивого развития на основе прогрессивных технологий, рыночных принципов функционирования, а также надежного и эффективного удовлетворения спроса на электрическую энергию. Главным инструментом достижения устойчивости развития электроэнергетики являются инновации, базирующиеся на цифровизации и интеллектуализации, т.е. интеллектуализация становится средством создания условий устойчивого развития электроэнергетики республики [1-8].

Электроэнергетика является основным драйвером экономики страны, поэтому необходимо обеспечить её устойчивое долгосрочное развитие, гарантирующее качественное энергоснабжение потребителей. Такой процесс нашел отражение в соответствующих законах республики, постановлениях и указах Президента Узбекистана, положениях и концепциях развития энергетики в период до 2030-35 гг. и далее [9-23]. Таким образом, устойчивое развитие электроэнергетики, связанное с повышением уровней надежности и качества систем энергоснабжения, при минимальном воздействии на окружающую среду, является гарантией обеспечения развития государства [24-25].

Устойчивое развитие электроэнергетики предусматривает сохранение энергетических ресурсов для будущих поколений, с учётом роста населения, и является фактором стабильного социально-экономического развития республики, её энергетической независимости и безопасности.

Существуют различные мнения, определяющие необходимые компоненты устойчивого развития и роль интеллектуализации нашей электроэнергетики в этом процессе. Опыт развитых стран показывает, что в настоящее время основным фактором является интеллектуализация энергетики, внедрение концепции SMART GRID («умная сеть») [26,27]. Для интеллектуализации электроэнергетики необходимы следующие компоненты: кадровая, научная, финансовая, нормативно-правовая, организационная, технико-технологическая, информационная и другие, при обеспечении сильной государственной поддержки.

**Интеллектуализация электроэнергетических систем (ЭЭС) на основе концепции SMART GRID.** Современная мировая электроэнергетика бурно развивается, модернизируется; во многих странах говорится об энергетическом повороте, энергетической реформе и даже энергетической революции. Прежде всего, это касается интеллектуализации электроэнергетики, опирающейся на инновационную концепцию SMART GRID («умная сеть»), которая развивается во многих странах [26-32].

Smart Grid отражается в определении IEEE: «Интеллектуальная энергосистема представляет собой концепцию полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы, имеющей сетевую топологию и включающей в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

единой сетью информационно-управляющих устройств и систем в режиме реального времени». (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, инженерная ассоциация США).

Основными факторами, определяющими необходимость интеллектуализации электроэнергетики, являются:

- изменение условий функционирования рынков электроэнергии и мощности, появление микросетей и активных потребителей - просьюмеров;
- появление новых интеллектуальных и киберфизических технологий;
- использование устаревших технологий и износ оборудования, приводящие к снижению экономичности и надёжности систем электроснабжения;
- постоянное повышение уровня потребления и стоимости электроэнергии;
- рост требований потребителей к качеству электроснабжения;
- необходимость диверсификации и повышения эффективности электроэнергетики;
- необходимость защиты окружающей среды – развитие безуглеродной энергетики.

Анализ этих факторов относительно электроэнергетики Узбекистана позволяет определить действенные мероприятия для её развития:

- внедрение интеллектуальных электроэнергетических систем, сетей и нового поколения систем управления ими;
- оптимизация структуры генерирующих мощностей, включая увеличение доли маневренных мощностей;
- развитие атомной, угольной и возобновляемой (зелёной) энергетики, направленное на снижение зависимости отрасли от поставок природного газа;
- расширенное внедрение новых экологически чистых и высокоэффективных технологий сжигания угля, парогазовых установок с высокими коэффициентами полезного действия; модернизация котельных в миниТЭЦ;
- развитие сетевого хозяйства, внедрение мероприятий по снижению уровня сетевых ограничений на межрегиональные перетоки электроэнергии;
- развитие распределённой генерации (в том числе в виде виртуальных электростанций и гибридных энергоустановок - сочетания ВИЭ с ГТУ, ПГУ, миниТЭЦ и др.), широкое использование накопителей энергии;
- формирование конкурентных оптовых и розничных рынков электроэнергии и мощности;
- дальнейшее развитие интеграционных процессов с электроэнергетикой сопредельных стран, использование передового зарубежного опыта.

Интеллектуальные ЭЭС – это автоматизированные системы, самостоятельно отслеживающие и распределяющие потоки электроэнергии для достижения максимальной эффективности их использования [33-37].

Рассмотрим структуру (рис.1) интеллектуальной электроэнергетической системы (ИЭЭС). Это качественно новая совокупность генерации, электрических сетей и потребителей, объединённых на основе принципов саморегулирования и самовосста-

новления, с управлением через единую сеть информационно-управляющих подсистем в режиме реального времени.

Для Узбекистана интеллектуализация электроэнергетики является энергетическим поворотом, требующим поэтапной реализации.

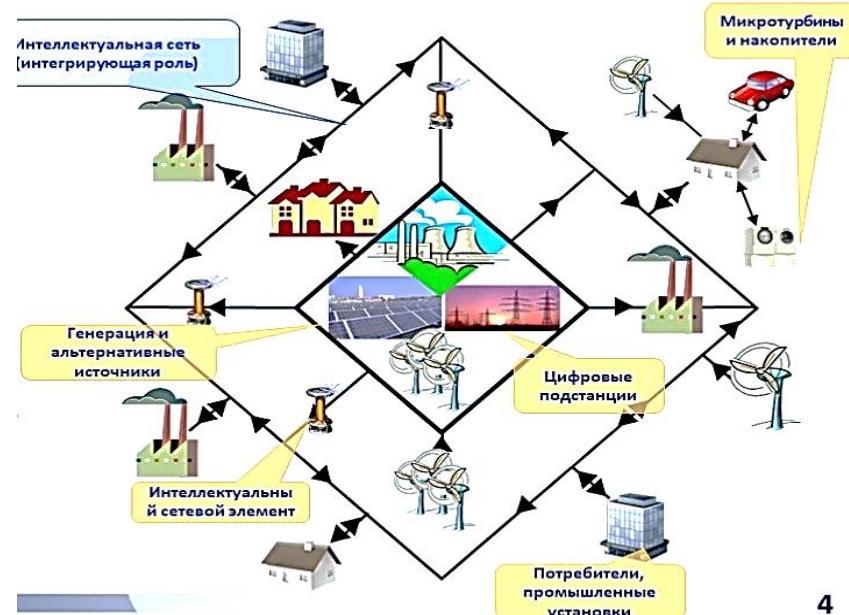


Рис.1. Структурная схема интеллектуальной электроэнергетической системы

Из вышесказанного очевидно, что основой интеллектуальной ЭЭС является симбиоз электроэнергетических и информационно-коммуникационных технологий. Для создания и развития таких систем необходимы соответствующие технологии и виды оборудования: интеллектуальные системы скоординированного управления автоматизации и контроля, «умные» измерители и датчики, интеграция систем управления с энергетическими операционными устройствами и коммуникация измерений для оперативного принятия решений.

На рис.2 показана схема функционирования микросети в составе ИЭЭС, с управлением на основе нейронной модели. Интеллектуальный учёт позволяет осуществлять передачу данных о качестве и количестве потреблённой электроэнергии в режиме реального времени. Интеллектуальные электронные счётчики такой системы способны отследить параметры каждого устройства, контролировать режимы, выполнение правил электропотребления при дифференцированных тарифах и другие функции.

Счетчики электроэнергии можно запрограммировать на коммуникацию с различными потребляющими установками и управлять ими с учетом различных условий тарификации; они позволяют обнаруживать потери энергии в сетях, контролировать

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

качество электроэнергии, а также осуществлять поиск и устранение дефектов на линиях и установках.



Рис.2. Схема функционирования интеллектуальной микросети

**АСКУЭ (Smart metering) – начальный этап развития интеллектуальной энергетики в Узбекистане.** Организация «умного» учета энергоресурсов в республике является базовой задачей при построении интеллектуальной энергосистемы. «Умный» учёт, обеспечивающий двунаправленное движение информации и данных от потребителя к поставщику и, наоборот, способен обеспечить надежный и эффективный процесс взаимодействия в условиях развития новой электроэнергетики, которая формируется в Узбекистане. Важным элементом является накопленный опыт эксплуатации внедренных в республике проектов по электроэнергии - АСКУЭ и по газу – АСКУГ [23].

Интеллектуальный учет, использующий современные комплексы программных и технических средств АСКУЭ, в том числе установку интеллектуальных приборов на стороне потребителя, обеспечивает регулярный опрос, сбор, обработку и хранение данных, предоставление информации о потреблении энергоресурсов, а также возможность автоматического и удаленного управления потреблением.

Преимуществами использования АСКУЭ являются:

- обеспечение достоверного измерения потребляемых энергоресурсов;
- автоматизированная и оперативная обработка, передача и представление об объеме потребления;
- контроль режима потребления;
- возможность сведения баланса по группам счетчиков и сопоставления данных с целью выявить факты несанкционированного потребления;
- получение информации о фактических потерях в электросетях;

- возможность удаленно ограничивать/отключать энергопотребление;
- оценка эффективности мероприятий по энергосбережению;
- управление потоками мощности.

Анализ и расчеты показывают, что внедрение технологии Smart Metering и АСКУЭ позволит электроэнергетике Узбекистана приблизиться к лучшим мировым практикам, когда потери в сетях не превышают 5-6% (сейчас в республике потери около 14-17%), что в денежном выражении позволит сэкономить до 2 трлн. сумов в год. Для примера сделаем простой расчет: общая годовая выработка электроэнергии в 2022 году составляла около 70 млрд. кВт.ч, из них потери 14% (10 млрд. кВт.ч). При уменьшении потерь до 6% величина потерь оставит 3,6 млрд. кВт.ч. Разница  $10 - 3,6 = 6,4$  млрд.кВт.ч. При стоимости 1 кВт.ч - 300 сумов, можно сэкономить  $300 \times 6,4 \approx 2$  трлн. сум/год.

Создание в Узбекистане интеллектуальной электроэнергетической системы позволит кардинально улучшить эффективность функционирования всего электроэнергетического комплекса [38-43]. Как показано в табл.1, внедрение инновационных факторов интеллектуализации будет приносить стране значительную выгоду, среди которых безопасность, эффективность и надежность ЭЭС, сокращение потерь – это только часть выгод от их внедрения.

Таблица 1

Ожидаемые эффекты от интеллектуализации ЭЭС Узбекистана

№	факторы интеллектуализации	ожидаемый эффект
1	повышение точности прогнозирования нагрузки ЭЭС, максимальное использование генерации ВИЭ (ФЭС и ВЭУ), расчеты и оптимизация режимов ЭЭС в режиме on line	снижение расхода топлива на ТЭС
2	использование микросетей с просьюмерами, оптимизация режимов сетей в режиме on line, сокращение (комерческих) потерь за счет внедрения точного интеллектуального учета (Smart Metering) АСКУЭ	сокращение потерь в сетях, возможность управления нагрузками
3	уменьшение расхода углеводородного топлива за счет внедрения экологически чистых технологий генерации и ВИЭ, управление снижением выбросов CO <sub>2</sub> в атмосферу	минимизация негативного воздействия на природу; выполнение обязательств Узбекистана по Парижскому соглашению
4	управление потоками мощности, внедрение интеллектуальных систем FACTS, СТАТКОМ, фазоповоротных устройств, а также установок компенсации реактивной мощности	повышение пропускной способности ЛЭП, уменьшение потерь в сетях
5	управление резервной мощностью, оптимизация графика ремонтов, использование ВИЭ, выравнивание графика суммарной нагрузки (снижение	снижение мощностей ТЭС, а также требуемого резерва мощности

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

	ние пиков нагрузки),	
6	модульность структуры сетей, конструкций и устройств	получение энергообъектов с заданными свойствами при минимуме затрат
7	непрерывный диагностический контроль состояния оборудования; системное и поэлементное регулирование уровня надёжности; широкое использование просьюмеров	повышение надежности электроснабжения потребителей
8	контроль параметров качества электроэнергии и их регулирование в режиме on line	повышение качества электроэнергии
9	внедрение дифференцированных тарифов, управление спросом; использование регулирующих возможностей АСКУЭ и потребителей-регуляторов в режиме on line в режиме on line	сглаживание пиков графиков нагрузки; отказ от строительства новых электростанций
10	использование неинвазивных методов измерений параметров объектов ЭЭС с использованием «умных» счётчиков и датчиков	повышение оперативности расчетов режимов ЭСС; автоматизация процессов проведения энергетических аудитов и обследований
11	инновационное автоматизированное проектирование электроэнергетических объектов	снижение стоимости проектирования; уменьшение площади, занимаемую сетевыми объектами
12	Внедрение киберфизических технологий; использование технологии блокчейн	повышение кибербезопасности ЭЭС
13	использование SCADA систем для управления объектами ЭЭС; расширение и углубление применения энергосберегающих технологий; управление спросом (demand response)	общее повышение управляемости и энергоэффективности ЭЭС

**Роль интеллектуализации в развитии ВИЭ.** Возобновляемые источники энергии в энергетике Узбекистана начинают использоваться всё в большей степени (к 2030 в республике запланирована выработка электроэнергии от ФЭС и ВЭУ не менее 25% от общей) [10,14,17,21]. Присоединение их к существующим энергосистемам при непостоянной генерации ВИЭ, при устаревшей технической инфраструктуре экономически невыгодно и рискованно, поскольку приводит к изменениям режимов работы основных станций (ТЭС, ГЭС, АЭС) энергосистемы (увеличение числа пусков и остановов, рост термодинамических нагрузок, вызывающих усталость оборудования и др.), снижение надежности её работы и другим негативным последствиям.

Опыт развитых стран показывает, что при системном подходе к развитию ЭЭС и их интеллектуализации, характерно увеличение доли ВИЭ, снижение пиковых

нагрузок и, как следствие, отказ от дополнительного строительства новых электростанций для покрытия пиков нагрузки. В области генерации главный эффект — уменьшение числа аварий и внеплановых ремонтов.

Проведенный анализ позволяет формулировать следующие исходные положения для развития концепции интеллектуализации электроэнергетики Узбекистана:

1. Энергетическая система рассматривается как инфраструктура, подобная сети Интернет, предназначенная для поддержки энергетических, информационных, экономических и финансовых взаимоотношений между всеми субъектами энергетического рынка и другими заинтересованными сторонами.

2. Развитие электроэнергетики должно быть направлено на развитие существующих (с учетом внедрения ВИЭ) и создание новых функциональных свойств энергосистемы и ее элементов, обеспечивающих в наибольшей степени достижение ключевых целей электроэнергетики.

3. Системное преобразование электроэнергетики затрагивает все ее основные элементы: генерацию, передачу, распределение, потребление (включая и коммунальную сферу), сбыт и диспетчеризацию.

4. Электрическая сеть рассматривается как основной объект формирования нового технологического базиса, дающего возможность существенного улучшения достигнутых и создания новых функциональных свойств энергосистемы.

5. Разработка концепции комплексно охватывает все основные направления развития: от исследований до практического применения и тиражирования и должна вестись на научном, нормативно-правовом, технологическом, техническом, организационном, управлении и информационном уровнях.

6. Реализация концепции носит инновационный характер и дает толчок к переходу на новый технологический уклад, как в электроэнергетике, так и в экономике страны в целом.

**Инфраструктура данных для интеллектуализации ЭЭС [43,44].** Перечислим ключевые особенности инфраструктуры данных, необходимых для создания эффективной интеллектуальной энергосистемы.

1. Применение передовых международных стандартов энергетической отрасли, таких, как IEC 61850, CIM, DNP и других.

2. Наличие надежных интерфейсов и поддержание связности различных источников данных. Использование интерфейсов, поддерживающих стандарты OPC, ODBC, XML, Web Services и ASCII. Интерфейсы должны автоматически распознавать и соединяться с устройствами, осуществлять сбор данных без вмешательства человека.

3. Непрерывная обработка событий: вычисления должны проводиться в режиме реального времени (РВ). Особенno это касается самовосстанавливающихся электросетей и динамического реагирования на прогнозируемые и происходящие в РВ ограничения или сбои в работе сети.

4. Масштабируемость данных должна обеспечиваться использованием инфраструктуры в составе крупномасштабных систем, а доступность данных должна обеспечиваться немедленно, в темпе их сбора; должен быть также обеспечен открытый

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

доступ к ретроспективным данным, накопленным за предыдущие периоды функционирования ЭЭС.

5. Возможность гибкого управления новыми устройствами, частотой сбора данных, приложениями, бизнес-правилами и т.д.

6. Обеспечение кибербезопасности. Инфраструктура должна быть развёрнута в топологии, создающей электронные преграды для предотвращения несанкционированного доступа к критически важным системам. Инфраструктура оперативных данных должна соответствовать директивным требованиям и способствовать их конвергенции (сближению) для обеспечения электронной и физической безопасности.

**Кадровое обеспечение процесса интеллектуализации.** Из вышеописанного понятно, что управление интеллектуальными энергосистемами и их развитием требует высокой квалификации управленческого и технического персонала, четкого соблюдения технологической дисциплины, независимо от того, какие функции он будет исполнять: непосредственного участника процесса, диспетчера или администратора.

Практика подбора кадров в электроэнергетике, а также система их подготовки должна иметь превалирующие требования к профессиональным знаниям в электроэнергетике, повышающие эффективность использования высокого экономического и технологического потенциала отечественной энергетики, а также обеспечивать её устойчивое развитие в интересах общества и государства.

Случившееся в январе 2022 года аварийное погасание всей ЭЭС страны, блэкут, а также участившиеся по разным причинам периодические отключения электроэнергии, в том числе из-за дефицита газа, недостаточного соблюдения необходимых технико-технологических регламентов, требований по своевременному ремонтно-сервисному обслуживанию оборудования, которые, как правило, связаны с недостаточной квалификацией персонала и несогласованностью его действий. Всё это наносит большой ущерб экономике и имиджу энергетики страны, требует соответствующего кадрового обеспечения процесса интеллектуализации электроэнергетики Узбекистана.

В настоящее время в стране сложилась уникальная ситуация, когда одновременно и в кратчайшие сроки требуются технологическое перевооружение электроэнергетики, диверсификация и увеличение генерирующих мощностей, резкое снижение энергоемкости выпускаемой продукции и оказываемых услуг, улучшение качества электроснабжения, а также увеличение доступа населения к электроснабжению в регионах, не охваченных централизованным энергоснабжением. Вышесказанное только подчеркивает тот факт, что успешность выполнения таких задач в условиях перехода к новым энергетическим технологиям, эффективность внедрения интеллектуальных и цифровых видов оборудования в электроэнергетических системах зависят, прежде всего, от наличия и квалификации подготовленных кадров, их умений и знаний в сфере интеллектуализации электроэнергетики.

В республике принята и реализуется «Концепция развития системы высшего образования Республики Узбекистан до 2030 года» (Указ Президента РУз от 08.10.2019 г. № УП-5847) согласно которой, начиная с 2018/2019 учебного года, в

“образовательных учреждениях республики налаживается деятельность по подготовке кадров” путем реализации соответствующих инновационных мероприятий.

Развитие электроэнергетики страны диктует необходимость опережающего развития высшего энергетического образования, необходима качественная трансформация: создание новых вузов, факультетов, специальных кафедр, открытие новых направлений образования бакалавриата, специальностей магистратуры; использование новых технологий, методов и программ обучения. В этом процессе должны активно участвовать заинтересованные министерства, ведомства, предприятия, а также институты АН РУз, научные центры и частные предприниматели.

В учебные планы действующих энергетических направлений образования бакалавриата и специальностей магистратуры необходимо вводить новые учебные дисциплины, такие как: «Основы интеллектуальной энергетики», «Цифровизация энергетики», «Энергоинформационные сети и системы», «Киберфизические системы в энергетике», «Электроэнергетические микросети и их свойства», «Облачные и Интернет технологий в энергетике» и др.

Для выполнения задач кадрового обеспечения новых направлений электроэнергетики по обеспечению устойчивости её развития вузы должны придерживаться следующих принципов:

- расширение и развитие системы новых компетенций для отрасли;
- вовлечение вузов в систему инновационных и научных проектов энергетической отрасли, отдельных компаний и предприятий;
- обеспечение непрерывности энергетического образования;
- проведение производственных практик в передовых организациях и предприятиях, в том числе и за рубежом;
- обмен преподавателями с передовыми зарубежными учебными заведениями, повышение квалификации преподавателей;
- повышение самостоятельности вузов при приеме, обучении, выпуске и обеспечении работой бакалавров и магистров новых специальностей (на основе соответствующих контрактов).

В свете вышесказанного также предлагается создать Национальный научно-образовательный центр (ННОЦ) устойчивого развития электроэнергетики в Узбекистане. Деятельность ННОЦ заключается в научно-прикладных и образовательных исследованиях согласно разработанной дорожной карте и основывается на двух основных составляющих – науке и образовании, а главной доминантой является интеллектуализация электроэнергетики.

Центр будет проводить интегрированный анализ необходимости подготовки специалистов для развития ИЭЭС и реализовывать целостный подход, необходимый для системной реализации энергетического перехода. ННОЦ призван исследовать необходимость обучения новым технологиям, с учетом требований экологии, экономики, влияния демографии и других, которые формируют перспективный ландшафт устойчивого развития электроэнергетики.

Актуальны следующие направления функционирования ННОЦ:

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

цифровая трансформация и интеллектуализация электроэнергетики Республики Узбекистан;

развитие интеллектуальных систем релейной защиты и автоматики;

методы обеспечения кибербезопасности электроэнергетики;

влияние энергетики на экологию; выполнение Узбекистаном обязательств по Парижскому соглашению;

решение экономико-финансовых задач обеспечения устойчивого развития электроэнергетики;

подготовка, повышение квалификации и переподготовка кадров в сфере интеллектуализации электроэнергетики;

и другие.

Подобные центры и организации существуют за рубежом: США, России, Китае и других государствах. Очевидно, что при ННОЦ должны функционировать курсы повышения квалификации по интеллектуализации развития электроэнергетики.

Предлагается также создать при ННОЦ Фонд развития искусственного интеллекта в электроэнергетике.

Осуществлять координацию деятельности субъектов ННОЦ возможно, например, на базе головного технического вуза республики - ТашГТУ им. И.Каримова, которую можно осуществлять дистанционно (по Интернет с участием задействованных вузов, НИИ, ведомств, юридических и частных лиц и пр.).

**Заключение.** Устойчивое развитие электроэнергетики Республики Узбекистан представляет собой одну из целей устойчивого развития страны в целом, которое принято характеризовать в разрезе экономических, социальных и экологических аспектов. Среди многих инновационных составляющих развития ТЭК, в настоящее время основной является интеллектуализация электроэнергетики, для становления которой необходимо наличие соответствующих компонент: кадровое обеспечение, научные исследования, финансовая составляющая, нормативно-правовая, организационная, технико-технологическая, информационная и другие.

Все компоненты имеют огромное значение для обеспечения устойчивого развития электроэнергетики, при этом определяющим является наличие кадрового потенциала. Если Узбекистан в ближайшие годы не сделает видимых шагов в сторону интеллектуализации электроэнергетики и развития соответствующего кадрового обеспечения, то с большой вероятностью можно констатировать, что устойчивое развитие электроэнергетики республики будет сильно замедлено.

Ключевым звеном является творческий специалист, способный понимать, формировать, участвовать в проектировании, монтаже, наладке и эксплуатации многоукладной и многосвязной современной электроэнергетики на базе Smart Grid, а также обеспечивать устойчивость её развития.

## Литература

1. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития. -Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi. 2021. -952 с.

2. Ситдиков Р.А. Новые технологии производства и распределения электрической энергии. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi, 2023. – 220 с.
3. Насиров Т.Х., Гайибов Т.Ш., Ситдиков Р.А., Васильев В.Г. Методы повышения эффективности режимов электрических сетей энергосистем. – Т.:Инновацион ривожланиш нашриёт-маббаа уйи. 2020. -276 с.
4. Развитие устойчивой инфраструктуры для перехода к низкоуглеродной экономике стран Центральной Азии и Кавказа: Отображение ситуации с потенциально высокоэффективными инфраструктурными проектами и оценка потребностей. Стrатегическое планирование инфраструктуры для устойчивого развития в Узбекистане. Специальная рабочая группа по «зеленым» действиям ОЭСР. 30.09 – 01.10. 2019, Париж.
5. Ситдиков Р.А., Радионова О.В. Особенности цифровизации электроэнергетики Республики Узбекистан. /Сборник трудов Международной конференции «Энерго- и ресурсосбережение: новые исследования, технологии и инновационные подходы». Карши, 24-25 сентября 2021 г. –Т.:Voris-nashriyot, 2021. – С. 163-168.
6. Умаров Д.Г. Современные проблемы и перспективы совершенствования энергетической политики Узбекистана. //Постсоветские исследования.2022;5(5). – С.:482-493.
7. Захидов Р.А. и др. Тенденции развития сектора электроэнергетики Узбекистана и проблемы энергетической, экологической безопасности. /Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2019. -С. 677-682).
8. Ситдиков Р.А. и др. Альтернативная энергетика Узбекистана. -Ташкент: Fan va texnologiya, 2016. – 223 с.
9. Закон РУз «Об электроэнергетике». 30 сентября 2009 г. № ЗРУ-225.
10. Закон РУз «Об использовании возобновляемых источников энергии». 21 мая 2019 г. № ЗРУ-539.
11. Закон РУз «Об использовании атомной энергии в мирных целях». 09 сентября 2019 г. № ЗРУ-565.
12. Постановление Президента РУз «О мерах по дальнейшему совершенствованию научно-технической деятельности в сфере электроэнергетики». 13 июля 2016 года № ПП-2559.
13. Указ Президента РУз «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан». 7 февраля 2017 года № УП-4947.
14. Постановление Президента РУз «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий». 23 августа 2017 г. №ПП-3238.
15. Концепция стратегии развития Республики Узбекистан до 2035 года. (11 февраль, 2019).
16. Постановление Президента Республики Узбекистан «О стратегии дальнейшего развития и реформирования электроэнергетической отрасли Республики Узбекистан». 27 марта 2019 г. № ПП-4249.
17. Постановление Президента РУз «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энерго-

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

сберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии». 22 августа 2019 года, №ПП-4422.

18. Постановление Президента РУз «Об утверждении стратегии по переходу Республики Узбекистан на «зеленую» экономику на период 2019 — 2030 годов». 4 октября 2019 года №ПП-4477.

19. Постановление Президента РУз «О мерах по дальнейшему повышению устойчивости электроснабжения в городе Ташкенте и Ташкентской области». 29 июля 2020 г. № ПП-4791.

20. Указ Президента РУз «Об утверждении стратегии «Цифровой Узбекистан-2030» и мерах по ее эффективной реализации». 5 октября 2020 г., № УП-6079.

21. Концепция обеспечения Республики Узбекистан электрической энергией на 2020-2030 годы (2020).

22. Указ Президента РУз «Об утверждении Стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022 — 2026 годы». 6 июля 2022 года № УП-165.

23. Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по ускоренному внедрению автоматизированной системы контроля и учета электрической энергии и природного газа». 13 ноября 2017 года № ПП 3384.

24. Аллаева Г.Ж. Перспективы устойчивого развития предприятияй топливно-энергетического комплекса Республики Узбекистан. /Монография. – Ташкент:Fan va texnologiyalar, 2021. -160 с.

25. Радионова О.В., Ситдиков РА. Киберфизические системы для проведения энергетических аудитов. /Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем». Ташкент, 3-4 марта 2022г. I том. 2022. -С. 170-173.

26. Energy systems & sustainability – power for a sustainable future. (2021) /Edited by Bob Everett, Stephen Peake and James Warren. Printed and bound in the United Kingdom by Bell&Bain LTD, Glasgow. -632 p. ISBN 9780198767640.

27. Инновационная электроэнергетика-21 / под ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая – М.: ИЦ «Энергия», 2017. –584 с.

28. Энергетика и устойчивое развитие [Электронный ресурс] //Бюллетень МАГАТЭ 54-1-Март 2013. – Режим доступа: [http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull541/Russian/Bull54\\_1\\_Mar2013\\_ru.pdf](http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull541/Russian/Bull54_1_Mar2013_ru.pdf).

29. Плакиткин, Ю. А. Инновационно-технологический вектор развития мировой энергетики XXI в. / Ю.А. Плакиткин.–М.: ИНЭИ РАН, 2012. –120 с.

30. Кобец В.В. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid [Текст] / В.В. Кобец, И. О. Волкова. -М.: ИАЦ Энергия, 2010. -208 с.

31. Интеллектуальное развитие электроэнергетики с участием активного потребителя / под ред. Бушуева В.В. -М.: Энергия, 2013. -84 с.

32. Окороков В.Р. и др. Интеллектуальные энергетические системы: технические возможности и эффективность. //Академия энергетики. 2010. №3.

33. Hu M. Operating Strategies and Management for Smart Microgrid Systems [Text] / M. Hu, Y. Chen, Y. Chang // Journal of Energy Engineering. - 2014. - Vol. 140, Issue 1. - P. 356-364.

34. Laaksonen H. Technical solutions for low-voltage microgrid concept / H. Laaksonen. – 2011. – T. 41. –140 с.

35. Ackermann, T. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects / T. Ackermann, V. Knyazkin // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – Yokohama: IEEE, 2002. – Vol. 2 – Pp. 1357–1362. DOI:10.1109/TDC.2002.1177677.

36. Интеллектуальное развитие энергетики с участием активного потребителя. /Под ред. В.В. Бушуева. –М.:Энергия. 2013, -84 с.

37. Радионова О.В., Ситдиков Р.А. О мониторинге режима и состояния электрической сети. //Проблемы энерго- и ресурсосбережения, Ташкент, 2021, № 1. – С.115-121.

38. Радионова О.В. Об использовании неинвазивного мониторинга для расчета режимов электрических сетей напряжением 0,4 - 10 кВ. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения, 2021. -№4. -С.61-65.

39. Насиров Т.Х., Сытдыков Р.А., Радионова О.В. Разработка экспертной системы для управления режимами электроэнергетических систем. //Проблемы информатики и энергетики, 2002. -№3. –С.21-26.

40. Ситдиков Р.А., Радионова О.В. Основные направления и механизмы устойчивого развития и модернизации электроэнергетики Узбекистана //Проблемы энерго- и ресурсосбережения, -2023. № 1. -С.37-43.

41. Dincer, I., Acar, C. A review on clean energy solutions for better sustainability // International Journal Energy Research. 2015. -№ 39. -С. 585- 606.

42. Энергетическая стратегия Германии до 2050 г. Режим доступа: <http://www.energiewende-in-deutschland>.

43. Зимаков А.В. Европейские модели экологичной электроэнергетики: состояние и перспективы // Вестник Института экономики РАН. 2019. -№ 4. -С.154-168.

44. Rashid Sittikov, Olga Radionova and Surayo Talipova. Digital transformation of the power system of the Republic of Uzbekistan. / Rudenko International conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2021): AIP Conference Proceedings 2552, 030001 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0116165>.

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом*

УДК 621.314

## ОБЗОР ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ш.Б. Умаров

Мақолада юқори токлы яримұтказгичли асбобларни шилаб чиқарииш технологияларининг ривожланиши босқычларини таұлап қилиш, улардан фойдаланни құвват диапазонлари ва частоталарини көнгайтиришини таңқықот қилиш, шунингдек, юқори токлы яримо'тказгичли асбобларнинг асосидағы вентилли частота ўзгартиргичларини күч схемаларининг замонавий топологияларини ва жағоннинг этакчи фирмалари томонидан шилаб чиқарылған автоном ток инвертерлари техник хүсусиятларини ўрганиши натижалари көлтирилған.

**Калит сұзлар:** юқори токлы яримұтказгичли асбоблар, шилаб чиқарииш технологияси, вентилли частота ўзгартиргичи, автоном ток инвертори.

В статье приводятся результаты проведенного анализа этапов развития технологии производства сильноточных полупроводниковых приборов, исследовано расширение диапазонов мощностей и частот их использования, а также представлены сведения о современных топологиях силовых схем вентильных преобразователей, производимых ведущими мировыми фирмами. Приведены технические характеристики автономных инверторов тока, выполненных с использованием сильноточных полупроводниковых приборов.

**Ключевые слова:** сильноточные полупроводниковые приборы, производственные технологии, вентильный преобразователь частоты, автономный инвертор тока.

*The article presents the results of the analysis of the stages of development of high-current semiconductor devices production technology, studies the expansion of power ranges and frequencies of their use, and presents information about modern power circuit topologies of valve converters produced by the world's leading firms. Technical characteristics of autonomous current inverters made on the basis of using high-current semiconductor devices are given.*

**Key words:** high-current semiconductor devices, production technology, gate frequency converter, autonomous current inverter.

Развитие преобразовательных установок на основе полностью управляемых тиристоров привело к значительному росту разработок и внедрения сильноточных электронных устройств. По прогнозу немецкой статистической фирмы Statista Gm ВН в период с 2018 по 2029 год ожидается значительный рост рынка продаж автомобильных инверторов на основе металл-оксидных полупроводниковых полевых транзисторов (MOSFET). Так, если уровень продаж в 2018 году составил 121,6 млн.

долларов США, то к 2029 году этот показатель вырастет примерно в 68 раз и составит 8,3 млрд. долларов США. Такое интенсивное развитие элементной базы силовой электроники способствует повышению удельных мощностей внедряемых преобразователей, значительно увеличивает спектр эксплуатационных, технических и экономических характеристик. Ниже, на рис.1. приведена диаграмма этапов развития управляемых тиристоров и высоковольтных транзисторов [1-3].

Развитие технологий производства сильноточных приборов, расширение диапазонов мощностей и частот их использования, а также высокий спрос на мировом рынке, привели к развитию топологий схем автономных инверторов тока (АИТ) и вентильных преобразователей в целом.

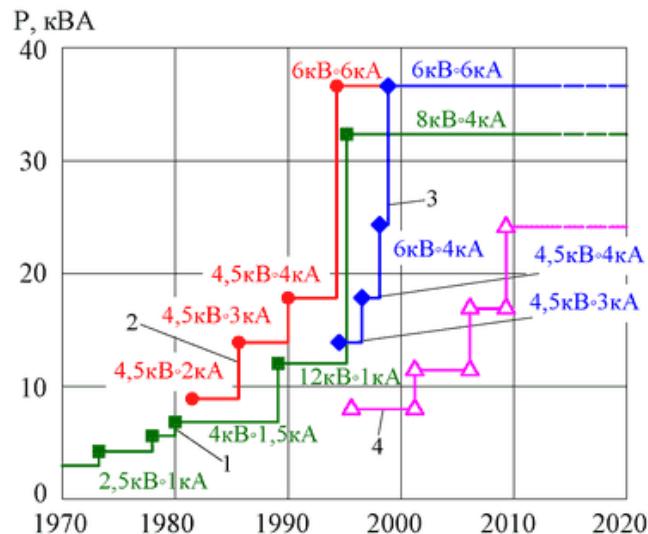


Рис. 1. Диаграмма этапов развития тиристоров и высоковольтных транзисторов:  
1 - традиционные неуправляемые тиристоры; 2 - запираемые тиристоры типа GTO, IGCT; 3 - запираемые тиристоры типа GCT;  
4 - высоковольтные транзисторы типа IGBT, MOSFET

Перспективы «новых» топологий заключаются в разработке схем автономных инверторов (АИ) на базе синтеза гармонического состава выходных напряжений и токов инверторов. Ниже, на рис.2, представлена диаграмма, показывающая область использования современных типов полупроводниковых приборов в диапазоне мощностей и частот их переключения.

Развитие новых топологий полупроводниковых преобразователей в направлении сильноточной энергетической электроники предусматривает разработку многоуровневых и матричных схем автономных инверторов тока.

Многоуровневые преобразователи, в целях улучшения гармонического состава, предусматривают наращивание количества ступеней в формах выходных напряжений инверторов, а матричные – одноуровневые автономные инверторы тока,

выполняют те же функции улучшения качества формы выходных напряжений методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ), широтно-импульсного регулирования (ШИР), частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и др. [4,5].

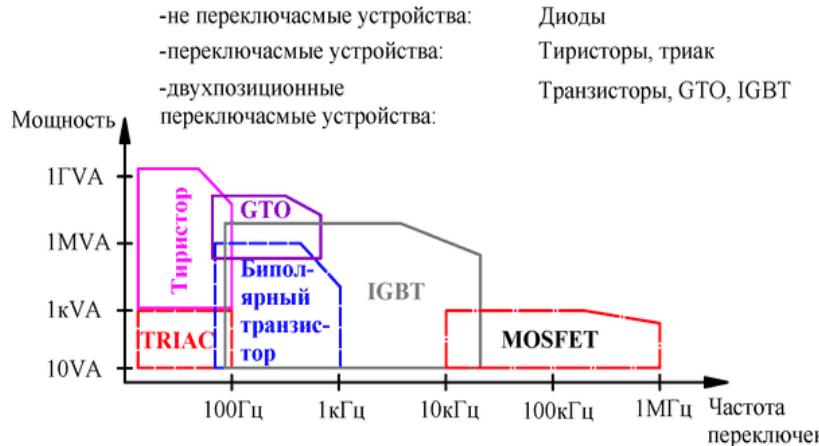


Рис. 2. Диаграмма, показывающая область использования современных типов полупроводниковых приборов в диапазоне мощностей и частот их переключения

Базовая топология трехуровневого однофазного АИТ на управляемых тиристорах представлена на рис.3 [6].

Направление развития схемных решений матричных преобразователей предусматривает установку конденсаторных фильтров со стороны питающего напряжения или нагрузки, а также в обе стороны одновременно. Такие условия возникают в связи с необходимостью организации устойчивой коммутации вентилей при ШИМ или других видах модуляции. Типовая схема таких преобразователей (АИТ с ШИМ) показана на рис.4.

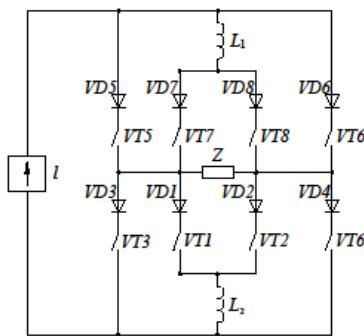


Рис.3. Базовая топология трехуровневого однофазного АИТ

Американская фирма Power Flex 7000 Allen Bradley выпускает преобразователи частоты, построенные на базе АИТ с ШИМ [7]. В преобразователе

используются SGCT тиристоры, что обеспечивает более высокую частоту модуляции: 440 - 1000 Гц по сравнению с 200 - 225 Гц. у GTO тиристоров, что позволяет получить более высокий коэффициент синусоидальности формы инвертируемых тока и напряжения.

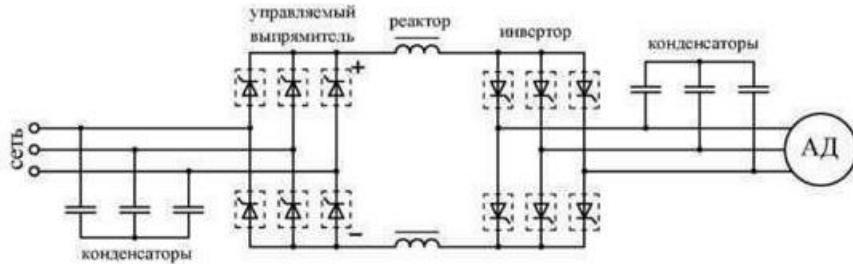


Рис. 4. Типовая схема преобразователя частоты, построенная на базе АИТ с ШИМ

В соответствии с [8,9,10] вентильные преобразователи на основе автономных инверторов тока в основном используются для реализации следующих практических целей:

- питание потребителя переменного тока в устройствах с источником энергии в виде аккумуляторной батареи;
- электроснабжение установок гарантированного питания и агрегатов бесперебойного питания;
- обеспечение регулируемыми напряжениями и частотой для электроприводов с асинхронными и синхронными двигателями;
- электротранспорт, питаемый от контактной сети или источника постоянного тока, использующие асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором в качестве тяговых электродвигателей;
- питание переменным током повышенной частоты электротехнологических установок различного назначения (электротермия, плавка металла, нагрев, закалка и др.);
- стабилизированные источники питания переменного напряжения (вычислительная техника, радио и проводная связь, аппаратура управления и автоматики, электротранспорт).

Кроме вышеописанного традиционного спектра использования вентильных преобразователей на основе автономных инверторов тока в последнее время большой практический интерес представляет возможность их использования в ветроэнергетике и солнечной энергетике для разработки возобновляемых источников питания [11,12].

Ниже в табл.1 представлены Технические характеристики и область применения вентильных преобразователей, построенных на основе различных силовых схем автономных инверторов тока, производимые ведущими мировыми фирмами.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Таблица 1

Технические характеристики ВПЧ на базе АИТ, производимые ведущими фирмами

№	Фирма производитель	Схема АИТ	Технические данные
1	Серия ПЧИТ Технорос, Россия	АИТ с ОД	$P_n = 160\text{-}2000\text{kВт}$ $U_n = 380\text{B}, 660\text{B}, 1140\text{B}$
2	Серия ПЧВМ Электротекс, Россия	Мостовой АИТ	$P_n = 250\text{-}5600\text{kВт}$ $U_n = 3, 6, 10 \text{ кВ}$
3	ПЧ -01 МИР, Россия	Мостовой АИТ	$P_n = 630\text{-}5000\text{kВт}$ $U_n = 6, 10 \text{ кВ}$
4	АТ09 ТРИОЛ, Россия	АИТ с ОД	$P_n = 630\text{-}5000\text{kВт}$ $U_n = 6, 10 \text{ кВ}$
5	НПМ «ЭКРА», Россия	Мостовой АИТ	$P_n = 630\text{-}5000\text{kВт}$ $U_n = 6, 10 \text{ кВ}$
6	ПЧТЭ НПП «ЭОС», Украина	Мостовой АИТ	$P_n = 1600\text{-}8000\text{kВт}$ $U_n = 6, 10 \text{ кВ}$
7	ПЧТ-1М НИИ «ХЭМЗ», Украина	Мостовой АИТ	$P_n = 50\text{-}1600\text{kВт}$ $U_n = 380, 660 \text{ В}$
8	Power Flex 7000 Rockwell, США	АИТ с ОД	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
9	Ross Hill, США	АИТ с ОД	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
10	Hill Gracham, США	АИТ с ОД	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
11	Imvar, Англия	АИТ с ОД	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
12	Silcovert Ansaldo, Италия	АИТ с ОД	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
13	Серия 1557 M Allen Bradle, Канада	АИТ с ШИМ	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
14	Power Flex 7000 Allen Bradle, Канада	АИТ с ШИМ	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
15	Hyundai, Южная Корея	АИТ с ШИМ	$P_n = 630\text{-}12500 \text{ кВт}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$
16	ALSPA CDL8000, Франция	Мостовой АИТ	$P_n = 5\text{MBA-}13,5\text{MBA}$ $U_n = 3,3\text{-}13,5 \text{ кВ}$

Кроме вышеперечисленных схемных решений в настоящее время одним из самых перспективных направлений развития силовой электроники является разработка и применение интеллектуальных силовых модулей. Это происходит в связи с постоянным совершенствованием технологии изготовления и улучшения технических характеристик мощных полевых транзисторов – MOSFET и IGBT, силовых драйверов с высокой степенью интеграции [13,14,15,16]. Наиболее успешно работают в этом направлении компании Mitsubishi, Fairchild, International Rectifier, Siemens, Schott, BM Elektronic, Transrech Antriebs systeme Berlin, Reliance Elektric, Германия; “Hill Graham Control”, США; “Asi Robicon”, Италия - США; “Alstom”,

Франция; “Allen Bradley”, США-Канада; ESTEL PLUS, Эстония; НПП “ЭОС”, Украина и др. [13,17,18,19].

**Заключение.** Изложенные в обзоре этапы и перспективы развития вентильных преобразователей в целом и автономных инверторов тока (АИТ) в частности, позволяют судить о современном состоянии вопросов проектирования, изготовления и внедрения высокоеффективных DC-AC преобразователей. На основании проведенного анализа установлено, что в настоящее время тиристорные автономные инверторы не утратили свою значимость в системах передачи электроэнергии и в промышленных установках. Фундаментальные научные положения, достигнутые за последние несколько десятилетий, охватывающие большой объем методов моделирования, программных продуктов, а также практических навыков разработки и внедрения тиристорных преобразователей, являются неотъемлемой базой для разработки современных преобразователей на основе гибридных и интеллектуальных IGBT и IGCT модулей.

### Литература

1. Кэррол Э., Линдер Ш., Блидверг И., Чекмарев А. Силовые полупроводники в сфере передачи и распределения энергии // Электротехника, 2007, №10.-С.11-15.
2. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). –С-Пб.: Изд-во Электросила, 2003. - 171 с.
3. Розанов Ю.К Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники // Электричество, 2005, №7. С. 52-62.
4. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для мэлектропривода и электроэнергетики // Силовая Электроника. - 2008, №1. - С.43-46.
5. Сидоров С. Матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления // Силовая электроника, 2009, №3. - С. 31-36.
6. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты POWER FLEX 7000 в горнодобывающей промышленности//Издательство НГТУ.-2017, №4,-С.86-93.
7. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. – М.: Альянс, 2013. - 496 с.
8. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. – М.: Юрайт, 2015. - 667 с.
9. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы. Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2019. – 120 с.
10. Мальнев А.И., Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций// Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2015. Т.326. №7.- С. 15-26.
11. Zhu, S., Liu, K., Qin, L., et al.: ‘Global asymptotic stability assessment of three-phase inverters with saturation’, IET Power Electron., 2018, 11, (9), pp. 1556–1565.
12. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

Rectifier для приводов малой мощности // Силовая электроника. 2005. №2. - С.30-35.

13. Chen, J., O'Donnell, T.: 'Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions', IET Power Electron., 2019, 12, (11), pp. 2965–2977.85.

14. Сурма А.М. Состояние и перспективы развития силовых полупроводниковых приборов для преобразовательных устройств// Электричество, 2006, №9. - С. 21-30.

15. Шустов М.А. Основы силовой электроники.-СПб.: Наука и Техника, 2017.-336 с.

16. Иванов А.Г., Шеляховский М.А., Фомин С.А. Современные решения SIEMENS в области мощных высоковольтных электроприводов Регулируемый электропривод. Опыт и перспективы применения. Сб. докладов научно-практического семинара.-М.: Издательство МЭИ, 2006.- С. 68-76.

17. Лазарев Г. Преобразователи для частотно-регулируемого электропривода // Силовая Электроника, 2008, №8(132). – С.14 –23.

18. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода //Новости электротехники, 2019, №5(119). – С.1 – 15.

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом*

УДК 620.9

**КОМПЛЕКСНОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ЛЮДСКИХ  
РЕСУРСОВ – КЛЮЧ К УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ  
РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАН**

**И.У. Буранов, Ш.В. Хамидов**

Уибұ мақолада энергетика соҳасининг ривожлантиришининг ретроспектив босқичлар, энг мувафақиятли мамлакатларнинг яқин тарихдан мисоллар ва Ўзбекистон Республикаси ва бошқа ривожланадиган мамлакатлар учун энергетика тизими, саноати, ва инсон капитални барқарор ривожлантириши учун ўрганиши керак бўлган сабоқлар билан мухокама қилинади. Мисрда бўлиб ўткан 27-чи томонлар конференцияни натижалари ва ҳалқаро молиявий институтларни роли.

**Калим сұзлар:** energiya tizimi, ishlab chiqarish, gidroenergetika, qayta tiklanadigan energiya manbalari, vodorod, dekarbonizatsiya.

В данной статье рассмотрены ретроспективные вехи развития энергетики с примерами из новейшей истории наиболее успешных стран и уроки, которые необходимо усвоить Республике Узбекистан и другим развивающимся странам для устойчивого развития энергетической системы промышленности и человеческого капитала. Итоги 27-й конференции сторон в Египте и роли международных финансовых институтов.

**Ключевые слова:** энергосистема, генерация, гидроэнергетика, ВИЭ, водород, декарбонизация.

*The paper considers retrospective phases of the global energy sector development with examples from the newest history of the most successful countries, and lessons that needs to be learned by the Republic of Uzbekistan and other developing countries for sustainable development of the energy system, industry, and human capital. Results of the 27<sup>th</sup> Conference of the Parties in Egypt and the role of international financial institutions.*

**Key words:** energy system, generation, hydropower, renewable energy sources, hydrogen, decarbonization.

**Введение.** Развитие экономики, рост уровня благосостояния населения, и улучшение жизненных условий человека неотъемлемо связаны с развитием и внедрением новых технологий. Если проводить аналогию с человеческим организмом, телекоммуникации и транспортная инфраструктура являются «кровеносно-сосудистой системой» экономики, финансово-банковская система – «нервной системой», а энергетические системы – это «скелет» народного хозяйства.

**О факторах развития энергетики.** Энергетические системы или большая энергетика, в том виде, которую мы знаем её сейчас, берет свое начало с середины XVIII века, с момента использования паровых машин на смену дровам и тяги живот-

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ных [1]. Следующие этапы – внедрение двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и производных нефти, в качестве энергоносителя. При этом, нефтепродукты не стали вытеснять угольные станции, а за счет них страны наращивали генерирующие мощности для обеспечения растущих потребностей (см. рис. 1).

Замена угля в энергобалансе стран за счет природного газа происходила в 2000-х годах, а сегодня мы наблюдаем мощнейшую пропаганду по внедрению возобновляемых источников энергии. К климатической повестке – снижению выбросов углекислого газа для предотвращения глобального потепления климата – добавляется «украинский кризис», заставляющий Европу ускорить «энергетический переход» (Energy Transition) и, вместе с тем, вернуться к использованию атомной энергетики, как наиболее климатически нейтральной и надежной, а в случае некоторых стран Европы, даже возобновить работу угольных электростанций (Австрия, Германия).



Возникает уместный вопрос – насколько «энергетический переход» и декарбонизация отвечают интересам развивающихся стран, на примере Узбекистана, и не является ли он лишь инструментом продвижения стран-производителей своего оборудования, таким образом обеспечивая заказами собственные заводы и занятость собственного населения. Следует ли адаптировать основные его принципы или же пересмотреть стратегию развития энергетики для устойчивого развития экономики и повышения благосостояния населения на период до 2050 г.

В данном контексте, характерной является принятая в марте текущего года «Стратегия энергетической безопасности Великобритании» [2], в основу которой заложены следующие принципы:

- усиление кооперации с местной промышленностью через диалог и консультации;

- сокращение зависимости от импортируемых нефти и газа;
- увеличение дотаций на покрытие счетов за электроэнергию и тепло для малоимущих слоев населения;
- более эффективная добыча нефти и газа на месторождениях в Северном море;
- наращивание мощности атомных электростанций;
- сохранение и создание высококвалифицированных рабочих мест в промышленном производстве и эксплуатации энергетических систем;
- значительное сокращение сроков согласования и разрешительных процедур для разработки энергетических проектов, в основном ветроэнергетических;
- создание производства водородного топлива в тех местах, где есть избытки ВИЭ.

Стратегия предусматривает привлечение более 100 млрд. фунтов частных инвестиций и поддержку в создании и сохранении около 480 тысяч рабочих мест.

Пример Великобритании не случаен. Страна, которая инициировала промышленную революцию в XVIII веке, первая, создавшая мануфактуры и применившая разделение труда, породившая множество инноваций технологического и организационного характера, и по сей день остается пионером во многих отраслях экономики. Благодаря сильным социально-культурным и экономическим связям с Великобританией, и географической близостью, многие европейские страны перенимают организационные подходы британцев и используют их технологии. Великобритания и по сей день является ведущей в плане условий жизни, экономической активности и технологических инноваций, что отражается в таком универсальном показателе, как ВВП на душу населения.

Если обратиться к статистике Всемирного банка, в списке 40 наиболее богатых стран мира:

- Все 10 стран северо-западной Европы (имеющих морские и сухопутные границы с Великобританией): Люксембург, Норвегия, Исландия, Ирландия, Дания, Швеция, Нидерланды, Финляндия, Бельгия, и, естественно, сама Великобритания.
- 14 стран Центральной и Южной Европы: Швейцария, Австрия, Германия, Андорра, Франция, Италия, Испания, Мальта, Кипр, Словения, Португалия, Эстония, Чехия, Литва.
- 10 бывших европейских (в основном британских) колоний: США, Сингапур, Австралия, Гонконг, Макао, Канада, Новая Зеландия, Багамы, Бермуды, Теркс и Кайкос; а также:
  - 5 нефтедобывающих стран: Катар, ОАЭ, Кувейт, Бруней, Саудовская Аравия.
  - 4 другие страны: Япония, Израиль, Южная Корея и Тайвань.

Исходя из вышеперечисленного, развивающимся странам необходимо внимательно изучать, и по мере возможности, внедрять и адаптировать опыт Великобритании, который согласно [2], не торпедирует использование ВИЭ и водорода (как это делает Европейский Союз), а в первую очередь, направлен на: а) более эффективное использование собственных природных ресурсов, б) промышленную кооперацию, и в) дальнейшее развитие человеческого капитала.

Масштабное внедрение ветроэнергетических установок, как на суше, так и на море, в контексте Великобритании надо рассматривать, в первую очередь, не как «энергетический переход», а как максимально эффективное использование собственных природно-климатических энергетических ресурсов ветра, с созданием рабочих мест в промышленном секторе, строительстве, и других смежных отраслях.

Безусловно, развивающиеся страны должны внести свою лепту в борьбу с изменением климата, но программы и проекты, связанные с этим, не должны иметь негативные последствия для надежного энергообеспечения (из-за прерывистого/колебательного характера работы энергетических установок ветра и солнца) народного хозяйства этих стран. В связи с «энергетическим переходом» они должны создавать лучшие условия для жизни и развития населения своих стран. Проекты должны в полной мере отвечать «Энергетической трилемме», сформулированной ООН: i) энергетическая безопасность (эффективность и надежность организации поставки первичной энергии из национальных и зарубежных источников, надежность энергетической инфраструктуры и способность поставщиков электроэнергии удовлетворить текущий и будущий спрос); ii) энергетическое равенство (наличие и доступность энергии для всех категорий потребителей энергии); и iii) экологическая устойчивость [3].

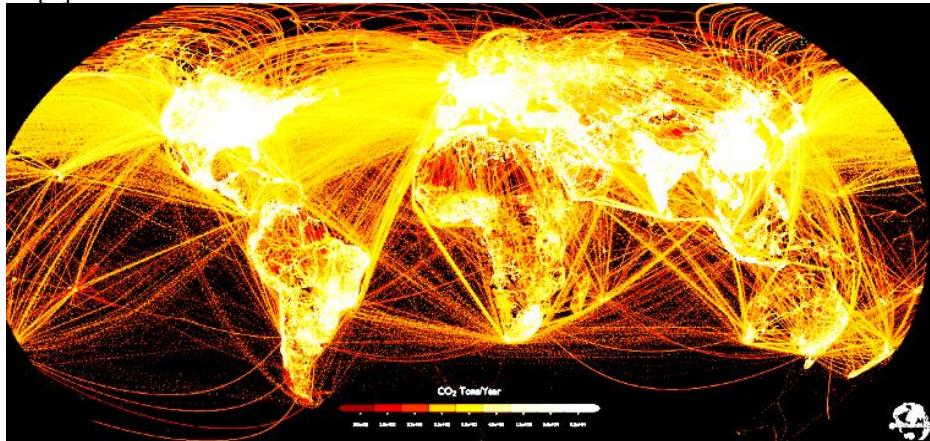


Рис.2. Карта демонстрирующая выбросы CO<sub>2</sub> в мире. Ярче зона – выше выбросы, светлее линии – выбросы авиа и морского транспорта

В этом контексте характерной является полемика, возникшая в ходе последней Конференции сторон по изменению климата в Шарм-аль-Шейхе (СОП-27), и предшествовавшим ей переговорам [4], где представители Европейского Союза (включаящего в себя группу наиболее богатых стран мира) до последнего дня СОП-27 оспаривали требования большой группы развивающихся стран по созданию специального фонда для ликвидации последствий природных катастроф, вызванных изменением климата (как например катастрофическое наводнение в Пакистане, в начале сентября текущего года). Европейский Союз и его союзники - Великобритания, США, Канада, др. (крупнейшие производители CO<sub>2</sub> – см. рис.2.) - настаивали на использовании уже

существующих механизмов финансирования проектов по борьбе с изменением климата – через международные финансовые институты (МФИ – Всемирный банк, АБР, и т.д.), из-за длительности процесса создания нового фонда. В итоге, только в последний день конференции – 20 ноября была достигнута договоренность о создании и финансировании фонда [5].

МФИ ежегодно реализуют тысячи проектов по всему миру, однако отсутствие в их процедурах требований (вместо имеющихся пожеланий) по оптимальному использованию местных ресурсов и компетенций, локализации используемых в проекте технологий. Так же проблематично создание условий для абсорбции знаний привлекаемых международных экспертов местными кадрами для дальнейшего внедрения (после завершения проекта). Фокус на развитие человеческого капитала должен стать ключевым в работе МФИ. Несмотря на то, что подобные компоненты существуют во многих проектах, зачастую они выполняются формально и не дают ожидаемых результатов.

Республика Узбекистан является активным пользователем финансовых ресурсов и экспертной базы МФИ. Первые полномасштабные исследования ветро- и солнечного энергетического потенциала были осуществлены при непосредственном участии Всемирного Банка и Азиатского банка развития. Благодаря этому сотрудничеству в 2017 году был начат качественно новый этап развития энергетики страны – привлечение иностранных компаний с использованием механизма государственно-частного партнерства (ГЧП), а точнее – независимых производителей энергии (Independent Power Producers).

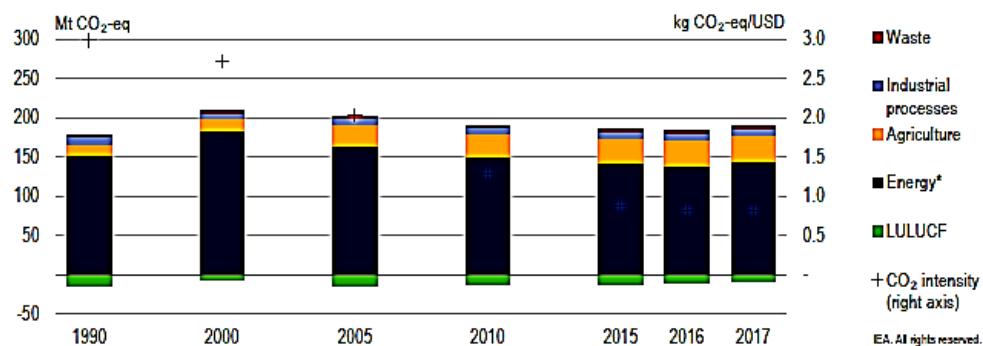


Рис.3. Выбросы CO<sub>2</sub> по отраслям экономики Узбекистана [6]

Результаты сотрудничества с МФИ легли в основу новой концепции развития энергетической отрасли Узбекистана. Согласно этой концепции развития к 2026 году планируется внедрение до 5 ГВт СЭС и 3 ГВт ВЭС. Безусловно, реализация таких амбициозных планов будет способствовать декарбонизации энергетического сектора, то есть позволит снизить выбросы CO<sub>2</sub>, которые сегодня составляют более 75% от выбросов всех отраслей (рис.3).

Однако, эти планы также поднимают вопросы компенсации возникающих небалансов мощности с поддержанием в регионе нормативного уровня резервов, рас-

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

ширения инфраструктуры для динамичного обеспечения ТЭС необходимыми объемами топлива для эффективного использования имеющихся генерирующих мощностей, обеспечения пропускной способности электрических сетей и устойчивости параллельной работы энергосистемы [7].

**Выводы.** Принимая во внимание амбициозные планы развития и внедрения ВИЭ в энергосистеме Республики Узбекистан, важно:

- учесть опыт развитых стран, которые уже прошли этот путь – столкнулись с проблемами – и нашли решения по преодолению этих проблем;
- переосмыслить промышленную политику, включая процедуры МФИ, для обеспечения полноценной передачи технологий и знаний развивающимся странам;
- обеспечить своевременную реализацию решений для компенсации возникающих небалансов.

## Литература

1. Кириллин В.А. Энергетика сегодня и завтра, -Москва:Педагогика, 1983.
2. British Energy Security Strategy, April 2022 (Стратегия энергетической безопасности Великобритании).
3. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. – Ташкент:Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyি. 2021.
4. What is climate “loss and damage”? , The Economist, 03 октября 2022г.
5. A deal on loss and damage, but a blow to 1.5C – what will be Cop27’s legacy? Guardian, 20 ноября 2022.
6. Uzbekistan 2022. Energy Policy Review, International Energy Agency,
7. Хамидов Ш.В., Шамсиев Х.А., Шамсиев Б.Х. Технические и организационные аспекты повышения надежности объединенной энергосистемы стран Центральной Азии. /Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 72. Надежность систем энергетики в условиях их цифровой трансформации. –Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2021, -С.296-303.

*Представлено Институтом проблем энергетики  
АН Республики Узбекистан*

---

УДК 621.316.725

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИСТОЧНИКА ТОКА В СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ  
ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОФЕРРОМАГНИТНОЙ  
ЦЕПИ**

**А.Н. Расулов, М.Р. Рузиназаров, Н.К. Мнажатдинов**

*Мақолада чизиқли сигимга параллел равишида уланган, кенг тушии майдони билан "Н" шаклидаги волт ампер тавсифига эга бўлган кетма-кет феррорезонанс занжир схемаси кўриб чиқилади. Ушибу бўлгимни ҳосил бўлган схема билан кетма-кет боғланган чизиқли индуктивликнинг характеристикаси билан компенсатсия қилиши орқали ток манбасини стабиллашган кучланиши манбасига айлантирадиган қурилма яратиш мумкин.*

**Калим сўзлар:** феррорезонанс, ток стабилизатори, волт-ампер характеристикаси, ток манбаи, чизиқли сиг'им, чизиқли индуктивлик

*В статье рассматривается последовательная феррорезонансная цепь, соединённая параллельно с линейной ёмкостью, имеющую «Н» - образную вольт-амперную характеристику с широкой зоной падающего участка. Путем компенсации этого участка характеристикой линейной индуктивности, соединенной последовательно с полученной цепью, можно создать устройство, преобразующее источник тока в стабилизированный источник напряжения.*

**Ключевые слова:** феррорезонанс, стабилизатор тока, вольт-амперная характеристика, источник тока, линейная ёмкость, линейная индуктивность.

*The article examines a series ferroresonant circuit connected in parallel to a linear capacitance, having an "N"-shaped current-voltage characteristic with a wide falling zone. By compensating this section with a characteristic of linear inductance connected in series with the resulting circuit, it is possible to create a device that converts a current source into a stabilized voltage source.*

**Key words:** ferroresonance, current stabilizer, current-voltage characteristic, current source, linear capacitance, linear inductance.

В современных системах автоматики, телемеханики и в схемах питания различных устройств, электроферромагнитные цепи нашли широкое применение в качестве стабилизаторов тока и напряжения, преобразователей числа фаз и частоты, преобразователей источника тока в стабилизированные источники напряжения, так как устройства, созданные на основе электроферромагнитных колебательных контуров, обладают высокой надежностью в эксплуатации, стойкостью к механическим перегрузкам, довольно высоким КПД, коэффициентами мощности, пределами мощности изготовления от нескольких Вт до десятков кВт, низкой стоимостью [1,2].

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В связи бурным развитием некоторых отраслей электротехники все большее значение находит необходимость создания устройств, преобразующих систему неизменного напряжения в систему неизменного тока и наоборот.

Основной частью преобразователя источника тока в стабилизированный источник напряжения (ПИТСИН) является последовательной феррорезонансной контур, схема замещения которого приведена на рис.1. Рассмотрим вольт-амперную характеристику этого контура, показанную на рис.2. (кривая 3) при питании от источника напряжения. Величина емкости  $C_1$  выбирается такой, чтобы ее характеристика пересекала вольт-амперную характеристику нелинейной индуктивности в области насыщения. С повышением величины входного напряжения от  $U_1=0$  до значения  $U_1=U_{\min}$ , ток в цепи возрастает пропорционально напряжению. Сердечник нелинейной катушки не насыщен, и ее напряжение больше напряжения конденсатора, ток в цепи отстает от входного напряжения на угол  $\pi/2$ . При достижении  $U_1=U_{\min}$  ток резко увеличивается, а его фаза изменяется на угол  $\pi$ . Участок «аб» характеристики является неустойчивым. Падение напряжения на индуктивности опережает, а на емкости  $C_1$  отстает по фазе от тока на угол  $\pi/2$ . Поэтому участок «оаб» характеристики контура имеет индуктивный характер, а «бс» - емкостный. Дальнейшее повышение величины входного напряжения приводит к пропорциональному увеличению тока в цепи. Такое свойство цепи может быть использовано с целью формирования управляющих сигналов для силовых тиристоров.

При подключении последовательного феррорезонансного контура источнику тока, вольт-амперная характеристика (ВАХ) контура имеет вид кривой «оабс» (рис.2). При этом участок «аб» является устойчивым. Вид этой характеристики зависит от соотношения параметров в контуре. Если падающий участок наблюдается в небольшом диапазоне изменения тока, то для его расширения необходимо подключить конденсатор  $C_2$  параллельно к феррорезонансному контуру с характеристикой, проходящей касательно к кривой «оа». (ВАХ) (кривая 5) такой цепи (рис.2.) строится по характеристикам резонансного контура (ВАХ) (кривая 3) и емкости  $C_1$  (прямая 4) путем суммирования токов для одних и тех же значений входного напряжения.

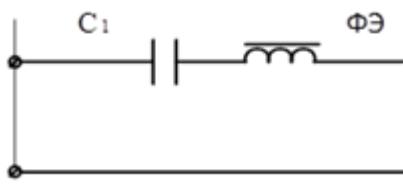


Рис.1. Последовательная феррорезонансная цепь

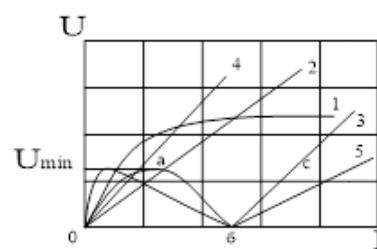


Рис.2. Вольт-амперная характеристика феррорезонансной цепи

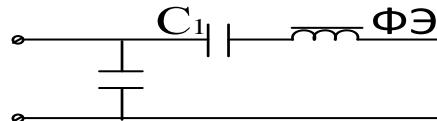


Рис.3. Последовательная феррорезонансная цепь с параллельно соединением конденсатором

При этом учитывается, что в дорезонанском режиме феррорезонансный контур имеет индуктивный характер, а в послерезонанском режиме – ёмкостный. Как видно из рис.3. с включением конденсатора  $C_1$  зона падающего участка характеристики расширяется по току. Длина падающего участка характеристики строго зависит от соотношения параметров.

С целью компенсации падающего участка и получения эффекта стабилизации напряжения подключим последовательно к цепи, показанную на рис.3., линейную индуктивность  $L_0$ . Характеристика индуктивности должна быть строго подобрана. Вольт-амперная характеристика двухкоторной феррорезонансной цепи (рис.4.) приведенная на рис.5. (кривая 3), получена путем суммирования кривой 1 (вольт-амперная характеристика линейной индуктивности) и кривой 2 (вольт-амперная характеристика феррорезонансного контура, показанного на рис.3). При построении кривой 3 учитывалось, что до резонанса феррорезонансный контур (рис.3) имеет индуктивный характер, а после резонанса – ёмкостный. Как видно из рис.5, при определенных соотношениях параметров цепи появляется явно выраженная зона стабилизации напряжения. (ав). Эффекта стабилизации можно достичнуть и в послерезонанском режиме, если участок «вс» кривой 2 будет параллельным характеристики линейной индуктивности (кривая 1). Очевидно, что вако-габаритные и энергетические показатели устройства будут лучшими при работе его в дорезонанском режиме, чес при послерезонанском, так как эффект стабилизации выходного напряжения в первом случае получается за счет суммирования, а во втором за счет вычитания характеристик элементов цепи [3].

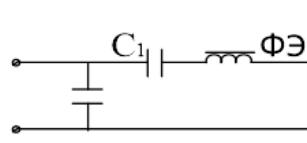


Рис.4. Схема ПИТСИ

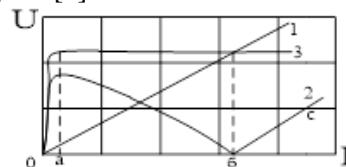


Рис.5. Вольт-амперная характеристика ПИТСИН

Кроме этого, форма кривой стабилизированного напряжения дорезонанском режиме близка к синусоидальной, а при работе устройства в послерезонанском режиме сильно искажается, так как ферромагнитный элемент находится в зоне глубокого насыщения.

Таким образом, подключение последовательного феррорезонансного контура к источнику тока называет появление на вольт-амперной характеристике устойчивого

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

падающего участка, путем компенсации которого можно добиться преобразования источника тока в источник напряжения [4].

При теоретическом анализе феррорезонансных контуров важную роль играет их схема замещения. Поскольку наличие нелинейного ферромагнитного элемента в контуре усложняет аналитическое решение, то для получения основных математических выражений необходимо принять ряд допущений, упрощающих теоретический анализ. Так, для анализа статических режимов феррорезонансного контура (рис.4) принимаем следующие допущения:

1. Кривая намагничивания нелинейного элемента аппроксимируется степенной функцией в виде  $i=K\psi^2$ .
2. Активным сопротивлением и индуктивностью рассеяния обмоток ферромагнитного элемента пренебрегаем, так как воздействие на электромагнитные процессы феррорезонансных контуров не значительно.
3. Потери в емкостях и в сердечнике линейной индуктивности не учитываются ввиду их чрезвычайной малости.
4. Нелинейный ферромагнитный элемент представляется схемой замещения, состоящей из нелинейной индуктивности и активного сопротивления, подключенных последовательно к ней.

Схема замещения ПИТСИН приведена на рис.6. Принятые обозначения:

$U$  – напряжение контура;

$I$  – ток, протекающий через  $L_0$ ;

$I_1$  – ток, протекающий через последовательный феррорезонансный контур;

$I_2$  – ток, протекающий через конденсатор  $C_2$ ;

$\Psi$  – потокосцепление нелинейного элемента.

Для рассматриваемой цепи справедливы следующие соотношения:

$$i = i_1 + i_2; \quad (1)$$

$$U = L_0 \frac{di_1}{dt} + L_0 \frac{dt_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int L_2 dt; \quad (2)$$

$$O = \frac{d\Psi}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + i_1 r; \quad (3)$$

$$i_1 = K\Psi^2. \quad (4)$$

Из уравнения (3) определяем ток в  $C_2$ :

$$i_2 = C_2 \frac{d^2\Psi}{dt^2} + C_2 r \frac{di_1}{dt} + \frac{C_2}{C_1} i_1. \quad (5)$$

Тогда с учетом (4), (5) выражение для тока контура запишем следующим образом:

$$i = C_2 \frac{d^2 \psi}{dt^2} + C_2 r K \frac{d\psi^2}{dt} + K \psi^2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right). \quad (6)$$

Вводя замену перемененных:

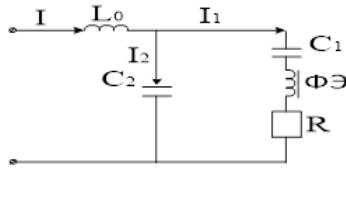


Рис.6. Схема замещения ПИТСИН

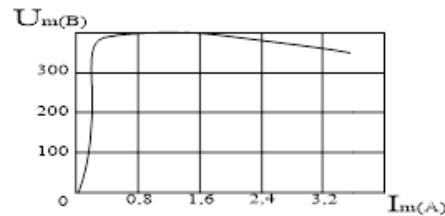


Рис.7. Вольт-амперная характеристика ПИТСИН

$$Y = \frac{i}{i_0}; \quad x = \frac{\psi}{\psi_0}; \quad \tau = \omega t;$$

выражение (6) перепишем в виде:

$$i_0 Y = C_2 \omega^2 \psi^7 \frac{d^0 x}{d\tau^2} + C_2 r K \omega \psi^7 \frac{dx^7}{d\tau} + K \psi^7 x^7 \left(\frac{C_0}{C_1} + 1\right). \quad (7)$$

Умножим правую и левую части уравнения (7) на  $\frac{1}{C_2 \omega^2 \psi_0}$ ; и получим:

$$\frac{i_\delta}{C \omega^2 \psi_\delta} Y = \frac{d^2 x}{d\tau^2} + \frac{r K \psi_\delta^6}{\omega} \cdot \frac{dx^7}{d\tau} + \frac{K \psi_\delta^6}{C_2 \omega^2} \left(\frac{C_2}{C_1} + 1\right). \quad (8)$$

Введем в уравнение (8) обозначения:

$$i_\delta = C_2 \omega^2 \psi_\delta; \quad d = \frac{64}{35} r \omega C_1; \quad \beta = \frac{64(C_1 + C_2)}{35 C_2}; \quad \psi_\delta^6 = \sqrt{\frac{\omega^2 C_1 64}{35 K}}.$$

С учетом принятых обозначений уравнения (8) перепишем следующим образом:

$$Y = \frac{d^2 x}{d\tau^2} + d \frac{dx^7}{d\tau} + \beta x^7. \quad (9)$$

Решение (9) будем искать в виде:

$$x = x_m \sin(\tau + 4); \quad (10)$$

$$y = y_m \sin \tau. \quad (11)$$

Производные от  $X$  имеют вид:

$$\frac{dx}{d\tau} = x_m \cos(\tau + \varphi); \quad (12)$$

$$\frac{d^2x^2}{d\tau^2} = 2 \frac{dx_m}{d\tau} \cos(\tau + \varphi) - x_m \sin(\tau + \varphi) + 2x_m \frac{d\varphi}{d\tau} \sin(\tau + \varphi); \quad (13)$$

$$x^7 = \frac{35}{64} x_m^7 \sin(\tau + \varphi); \quad (14)$$

$$\frac{dx^7}{d\tau} = \frac{35}{64} x_m^7 \cos(\tau + \varphi). \quad (15)$$

Подставляя значения (11) – (15) в уравнение (9) и группируя коэффициента при одинаковых тригонометрических функциях определим значение  $Y_m$ :

$$Y_m = \sqrt{\left(\beta \frac{35}{64} x_m^7 - x_m\right)^2 + \left(d \frac{35}{34} x_m^7\right)^2}. \quad (16)$$

Для построения вольт-амперной характеристики цепи необходимо теперь определить зависимость  $U=f(\psi)$ . Продифференцируем уравнение (2):

$$\frac{dU}{dt} = L_0 \frac{di_1}{dt^2} + L_0 \frac{di_2}{dt^2} + \frac{i_2}{C_2}. \quad (17)$$

С учетом (4) и (5) выражение перепишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} = & L_0 C_2 \frac{d^4 \psi}{dt^4} + L_0 K C_2 r \frac{d^3 \psi^7}{dt^3} + \left(\frac{C_2}{C_1} + 1\right) \cdot L_0 K \frac{d^2 \psi^7}{dt^2} + \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \\ & + K r \frac{d \psi^7}{dt} + \frac{K}{C_1} \psi^7. \end{aligned} \quad (18)$$

Произведем замену переменных:

$$\nu = \frac{U}{U_\delta}; \quad x = \frac{\psi}{\psi_\delta}; \quad \tau = \omega t;$$

тогда (18) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega U_\delta \frac{d\nu}{d\tau} = & L_0 C_2 \psi_\delta \omega^4 \frac{d^4 x}{d\tau^4} + L_0 K C_2 r \omega^3 \psi_\delta^7 \frac{d^3 x^7}{d\tau^3} + \omega^2 \psi_\delta \frac{d^2 x}{d\tau^2} + \\ & + \left(\frac{C_2}{C_1} + 1\right) \cdot L_0 K \psi_\delta^7 \omega^2 \frac{d^2 x^7}{d\tau^2} + K \psi_\delta^7 r \omega \frac{dx^7}{d\tau} + \frac{K}{C_1} \psi_\delta^7 x^7. \end{aligned} \quad (19)$$

1

Если умножить правую и левую части уравнения (19) на  $\frac{1}{L_1 C_2 \psi_\delta \omega^4}$ , то можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{U_\delta}{L_0 C_2 \psi_\delta \omega^3} \cdot \frac{d\upsilon}{d\tau} &= \frac{d^4 x}{d\tau^4} + \frac{K \psi_\delta^6 r}{\omega} \cdot \frac{d x^7}{d\tau^3} + \left( \frac{C_2}{C_1} + 1 \right) \cdot \frac{K \psi_\delta^6}{C_0 \omega^2} \cdot \frac{d^2 x^7}{d\tau^2} + \\ &+ \frac{1}{L_0 C_2 \omega^2} \cdot \frac{d^2 x}{d\tau^2} + \frac{K \psi_\delta^6 r}{L_0 C_2 \omega^2} \cdot \frac{dx^7}{d\tau} + \frac{K \psi_\delta^6}{L_0 C_1 C_2 \omega^2} \cdot K^7. \end{aligned} \quad (20)$$

Примем обозначения:  $U_\delta = L_0 C_2 \psi_\delta \omega^6$ ,  $d = \frac{64}{35} C_1 \omega r$ ;

$$\gamma = \frac{1}{L_0 C_2 \omega^2}, \quad \eta = \frac{64}{35} \cdot \frac{C_1 r}{L_0 C_2 \omega}, \quad \delta = \frac{64}{35 L_0 C_2 \omega^2}.$$

С учетом которых (20) примет вид:

$$\frac{d\upsilon}{d\tau} = \frac{d^4 x}{d\tau^4} + d \frac{d^3 x^7}{d\tau^3} + \beta \frac{d^2 x^7}{d\tau^2} + \gamma \frac{d^2 x}{d\tau^2} + \eta \frac{dx^7}{d\tau} + \delta x. \quad (21)$$

Решение (21) будем искать в виде

$$\begin{aligned} x &= x_m \sin(\tau + \varphi); \\ \upsilon &= \upsilon_m \sin(\tau + \theta); \end{aligned} \quad (22)$$

тогда

$$\frac{d\upsilon}{d\tau} = \upsilon_m \cos(\tau + \theta).$$

Производные от  $x$  равны

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = -x_m \sin(\tau + \varphi); \quad (23)$$

$$\frac{d^4 x}{d\tau^4} = -x_m \sin(\tau + \varphi); \quad (24)$$

$$\frac{d^2 x^7}{d\tau^2} = -x_m \sin(\tau + \varphi) \cdot \frac{64}{35}; \quad (25)$$

$$\frac{d^3 x^7}{d\tau^2} = -\frac{35}{64} \cdot x_m^7 \cos(\tau + \varphi). \quad (26)$$

С учетом (14), (15) и (22) - (26) уравнение (21) для установившегося режима примет вид:

$$\begin{aligned}
 v_m \cos(\tau + \theta) = & x_m \sin(\tau + \varphi) - d \frac{35}{64} x_m^7 \cos(\tau + \varphi) - \beta \frac{35}{34} x_m^7 \cdot \\
 & \cdot \sin(\tau + \varphi) - \gamma x_m \sin(\tau + \varphi) + \eta \frac{35}{64} x_m^7 \cos(\tau + \varphi) + \gamma x_m^7 \sin(\tau + \varphi); \quad (27)
 \end{aligned}$$

Произведем несложные тригонометрические преобразования и сгруппируем коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях и после несложных преобразований получим.

$$v_m = \sqrt{\left[ x \left( 1 - \gamma 0 + x_m^7 \left( x - \frac{35}{64} \beta \right) \right)^2 + \left[ x_m^7 \frac{35}{64} \cdot (\eta - \alpha) \right]^2 \right]}; \quad (28)$$

На рис.7. приведена вольт-амперная характеристика ПИТСИН, построенная на основании выражений (16) и (28) для следующих параметров:  $L_0=1,4$  Гн,  $C_1=5$  мкФ,  $C_2=1$  мкФ,  $r=100$  Ом. Здесь, при определенных соотношениях параметров, наблюдается стабилизация напряжения в широком диапазоне изменения входного тока ( $0,2 \div 2$  А).

**Заключение.** Предложенная схема ПИТСИН на базе электроферромагнитной цепи, обладающей участком на амплитудной характеристики работает без триггерного эффекта при определенном соотношении параметров. Для расширения падающего участка «N» – образной вольт-амперной характеристики последовательной феррорезонансной цепи предложено использовать конденсатор, который необходимо подключить параллельно к ней.

### Литература

1. Расулов А.Н., Кодиров Т.М. Электромагнитные цепи в режимах стабилизации и регулирования. Ташкент, ТошГТУ, 2014. –199 С.
2. Губанов В.В. Силовые полупроводниковые преобразователи с выходными стабилизаторами. –Л.: Энергия. 1972. –133 С.
3. Кодиров Т.М. Электроферромагнитные цепи, обладающие широким падающим участком на амплитудной и фазовой характеристики. // Известия вузов. Электромеханика, 1988 №7. –26-30 С.
4. Кодиров Т.М., Расулов А.Н. Феррорезонансный стабилизатор тока с синусоидальной формой кривой тока. //Автоматика и телемеханика, 1977 №11. –С. 197-200.

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом*

УДК 621.313

**КАТТА ҚУВВАТЛИ ТУРБОГЕНЕРАТОРЛАРНИНГ СТАТОР ЧУЛГАМИ  
СТЕРЖЕНЛАРИ ҒОВАК ЎТКАЗГИЧЛАРИНИНГ ТИҚИЛИБ ҚОЛИШИ  
НАТИЖАСИДА УЛАРДАГИ ҚИЗИШНИ БАРТАРАФ ЭТИШ ЧОРАЛАРИ****Н.Б. Пирматов, С.Э. Шерназаров, Д.К. Якубова, Т.Э. Рашидов**

Уибү мақолада *TBV* оммавий серияли турбогенераторлар мисолида янги, меъёрий бўлмаган таҳлил ва назорат воситаларини жорий этиши орқали уларнинг ишилаш муддатини узайтириши учун катта қувватли турбогенераторларга техник хизмат кўрсатиши ва таъмирилаш тизимларини таомиллаштиришининг техник самарадорлиги кўрсатилган. Иссиқлик электр станцияларидағи катта қувватли *TBV* оммавий серияли турбогенераторларнинг статор чулгамларини совитиши, ёзинг иссиқ кунларида бир қанча муоммоларни келтириб чиқармоқда, натижасида ишилаб чиқарилгаётган электр энергиянинг кўп қисми совитиши тизимига истроф бўймоқда, статор чулгамлари стерженинг иссиқ кунларида каналдаги сувларининг кескин қизиб кетиши, стержен говак ўтказгичларида дистилланган сувнинг яхши ўтмасдан тез-тез тиқилиб қолиши натижасида паздаги стерженинг қизийди ва турбогенератор статор чулгами стерженининг совитишига салбий тасир қиласди, натижасида турбогенератор статор чулгамидағи истрофларни камайтириши учун турбогенераторнинг ишилаш жараёнида ишончлилигини ошириши чоралари кўриб чиқилган.

**Калим сўзлар:** иссиқлик электр станцияси, турбогенератор, статор, стержен, чулгам изоляцияси, совитиши, қаршиликли термометри, паз понаси, эксплуатацион синон.

В данной статье показана техническая эффективность совершенствования систем технического обслуживания и ремонта турбогенераторов большой мощности для продления срока их службы путем внедрения новых средств анализа и контроля на примере турбогенераторов серийного производства *TBV*. Охлаждение статорных обмоток турбогенераторов серии *TBV* большой мощности на тепловых электростанциях вызывает ряд проблем в жаркие летние дни. В результате значительная часть произведенной электроэнергии тратится в системе охлаждения статорных обмоток, где вода нагревается в каналах обмотки. в результате частых заторов дистиллированной воды в пористый проводниках стержни в пазах нагреваются и отрицательно влияют на охлаждение стержня турбогенератора, в результате с целью снижения потерь в обмотке статора турбогенератора были рассмотрены мероприятия по повышению надежности турбогенератора в процессе эксплуатации за счет совершенствования способа охлаждения обмоток статора турбогенератора.

**Ключевые слова:** тепловая электростанция, турбогенератор, статор, стержень, изоляция обмотки, охлаждение, термометр сопротивления, клин пони, эксплуатационные испытания.

*The article shows the technical effectiveness of improving maintenance and repair systems for high-power turbogenerators to extend their service life by introducing new, non-standard means of analysis and control using the example of serial TVV turbogenerators. Cooling the stator coils of mass-produced high-power TVV turbogenerators at thermal power plants causes a number of problems on hot summer days, as a result, most of the generated electricity is spent in the cooling system, stator coils of channel water on hot summer days. As a result of sudden overheating, frequent clogging of distilled water in the rod holes without good passage, the wedge heats up and negatively affects the cooling of the turbogenerator stator winding, and to reduce waste in the turbogenerator stator winding, the method of cooling the turbogenerator stator winding has been changed, increasing the reliability of the turbogenerator during operation has been analyzed due to its improvements.*

**Key words:** thermal power plant, turbogenerator, stator, feed, pipe insulation, cooling, resistance thermometer, wedge plate, operational tests.

**Кириш.** Ҳозирги вақтда хорижий давлатларда ўрнатилган иссиқлик электр станцияларидаги қувватни қарийб 54% ни қуввати 160-1200 МВт бўлган статор чулғами сув билан совутиладиган турбогенераторлар таъминлайди. Булар асосан ТВВ сериясидаги турбогенераторлар бўлиб, уларнинг ўрнатилган қуввати кўриб чиқилаётган энергия блокларининг умумий ўрнатилган қувватининг 90% дан ортигини ташкил қиласди.

Бу турбогенераторларнинг умумий сонининг 50% дан ортиғи стандартларда белгиланган 25 йиллик стандарт хизмат муддатини ишлаб чиқиш мезонига кўра "эски" деб таснифланади. Яқин йилларда уларни алмаштириш техник ва иктисадий сабабларга кўра амалга оширилмаган.

Шу сабабли, хорижий давлатларда масалан "Россия УЭС" РАО да мавжуд электр жиҳозларининг хизмат қилиш муддатини ўзайтириш бўйича ишларни техник қайта жиҳозлашнинг устувор йўналиши деб ҳисоблайди [1].

Бугунги кунда, асосий электр жиҳозларини техник таҳлил қилишнинг янги усуллари ва воситаларини ишлаб чиқиш ва жорий этиш, айниқса, улар юклама остида бўлганда муҳим аҳамиятга эга [2].

Ушбу маколада ТВВ оммавий серияли турбогенераторлар мисолида янги, меъёрий бўлмаган таҳлил ва назорат воситаларини жорий этиш орқали уларнинг ишлаш муддатини ўзайтириш учун катта қувватли турбогенераторларга техник хизмат кўрсатиш ва таъмирлаш тизимларини такомиллаштиришнинг техник самарадорлиги кўрсатилган. ТВВ серияли турбогенераторларда қувват бирлигини ошириш учун статор чулғамини сув билан совутиш ва ротор чулғамини статорнинг актив пўлатини тўғридан-тўғри водородли совутишдан фойдаланилади.

Сув ёрдамида совутишдан фойдаланиш натижасида статор чулгамининг кучланиши газни совутишдан деярли икки баравар паст бўлади, бундай чулгамлар юқори ток зичлигига ҳам турбогенераторининг ишончлилигини оширишни таъминлайди.

Статор чулгамни совитиш учун ғовак ўтказгичлардан дистилланган сув ўтади бунда, чулгам стерженларнинг учларида ғовак ўтказгичларга дистилланган сув узатувчи учлар ковшарланган холатда бўлади. Учлар стерженларга кумуш ковшар ёрдамида ковшарланган. Стерженларни электрик туташтириш мис хомут қалай билан ковшарланган тиқин ёрдамида амалга оширилади. Чулгам стерженлари паз деворлари бўйлаб гофрировка қилинган ярим ўтказгичли тиқинлар билан зичлаштирилган ва пазга маҳсус тиқинлар ёрдамида маҳкамланган. Олд қисмларини маҳкамлаш, тобланиб шакиллантирилган материалдан фойдаланиб амалга оширилган.

Статор чулгамига совутувчи сувни бериш ва чиқариш учун ҳалқасимон коллекторлар мавжуд. Коллекторларни стерженлари билан туташтириш изоляцион материалдан тайёрланган шланглар ёрдамида амалга оширилади. Совутувчи сувда кетма кет туташтирилган иккита стерженлар, шиналар ва чиқишилар орқали ўтади. Коллекторларни сув билан тўлганлигини назорат қилиш ва улардан ҳавони чиқариб юбориш учун уларнинг юқори нукталарида учлари статорни корпусидан ташқарига дренаж қувурчалар ўрнатилган.

Турбогенераторларни ишлатиш даврида статор чулгамининг совутиш тизимидан ҳавони узлуксиз чиқариб туриш учун дренаж қувурчаларидағи кранлар минимал даражада сув тўқиладиган қилиб очилган бўлиши шарт.

Статор чулгами стерженларида дистиллятнинг ўтиш даражаси назорат қилиш статор ўзагининг ҳар бир пазида тиқин остида жойлаштирилувчи термоқаршиликлар ёрдамида ҳароратни ўлчаш орқали амалга оширилади.

Шунга қарамай, юқори ток зичлиги туфайли ғовак (ичи бўш) ўтказгичлар тиқилиб қолганда, ўтказгичларда мис ҳарорати ошади, шунинг учун у изоляциянинг қизиши натижасида эскириш интенсивлигига ва ўтказгичнинг ишончлилигига сезиларли таъсир кўрсатади. Ўтказилган, тажриба натижалари шуни кўрсатадики, иккита ичи бўш ўтказгич блокланганда уларнинг ҳарорати одатдагидан 3-3,5 баравар юқори қийматларга кўтарилиши мумкин. Шу билан бирга, чулгам изоляциясининг бузилиши эҳтимоли 100 мартадан кўпроқ ошади. Амалиётда TBB-165-2, TBB-325-2, TBB-800-4 TBB-1000-4 серияли катта қувватли турбогенераторларда бундай бузилишлар ҳолатлари мавжуд. Шунинг учун эксплуатацияда шароитида, ишлайдиган генератор чулгамининг ҳарорати эҳтиёткорлик билан назорат қилинади.

Генераторларда чулгам ҳарорати дистиллат дренаж томонидан ҳар бир чулгам изоляциясига ўрнатилган қаршиликли термометри билан ўлчанади. Юқори пазларда қаршиликлар термометри тиқин чиқиш жойи яқинидаги паз остига жойлаштирилган.

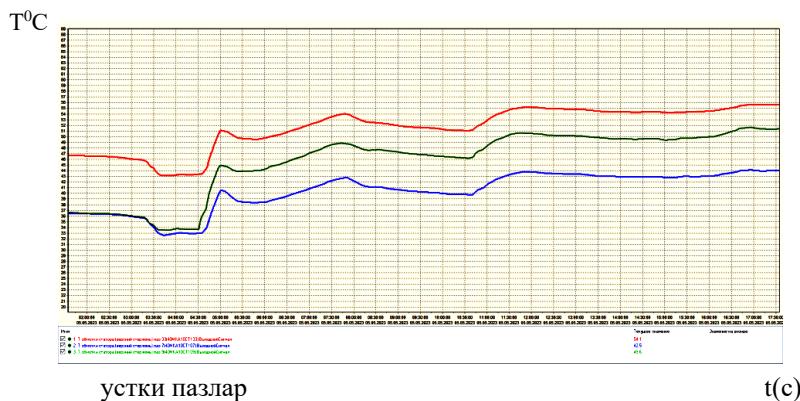
TBB серияли қуввати 325 МВт ва ундан юқори қувватга эга генераторларда пастки стерженлар юқори қисмлардан мустақил равишда совутилади ва стерженда олд қисмининг ён юзасига жойлаштирилган қаршиликли термометр томонидан назорат қилинади.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**Методлар.** Чулғамларнинг термал ҳолатини назорат қилишнинг тартибга солувчи усуллари [3-5] чулғамларнинг ҳарорати ва уларнинг совутиш суви ҳароратидан ошиб кетишини кузатишин таъминлайди. Масалан, [3] га биноан, чулғамда совутиш нуқсонининг белгиси унинг қаршилик термометри кўрсаткичларининг  $75^{\circ}\text{C}$  дан ошиши ёки чулғамнинг максимал ва номинал ҳарорати ўртасидаги фарқнинг  $25^{\circ}\text{C}$  дан юқори бўлишидадир. [4] ва [5] га биноан, нуқсон белгиси чулғамда ҳароратининг  $5^{\circ}\text{C}$  дан ортиқ ошишини кўрсатади.

Тиқилган ўтказгичлар ҳароратининг сезиларли даражада ошишига қарамасдан, тиқилиб қолган ўтказгичлар ва қаршилик термометри ўртасида дистиллят (таркибида тузлардан тозаланган) сув айланиши учун хизмат кўрсатадиган ўтказгичлар мавжуд бўлса, қаршиликлар термометр кўрсаткичларининг ўзгариши унчалик катта эмас. Бундай ўзгаришлар кўпинча белгиланган [4] чегара  $5^{\circ}\text{C}$  дан ошмайди. Генератор иш режими параметрларининг ўзгариши натижасида ҳосил бўлган шовқин пайтида уларни аниқлаш анча қийин.

Бундан ташқари, қаршиликлар термометрнинг мис чулғамида ҳароратнинг ўзгариш сезирлиги сезиларли даражада қаршиликлар термометрнинг чулғамида ғизоляциянинг даражасига боғлиқ.



1-расм. TBB-325-2 турбогенераторининг статор чулғам атрофи бўйлаб ҳароратнинг  $11040\text{ A}$  статор токи юқори стерженда таксимланиши

Қаршиликлар термометр юзаси ва пазда ғизоляцияси ўртасидаги термал алоқа ҳолатини баҳолаш учун сезир элемент параметридан фойдаланиш мумкин, бу қаршиликлар термометрининг сезирлигини баҳолаш ва қаршиликлар термометри кўрсаткичлари паздаги мис ҳароратининг  $1^{\circ}\text{C}$  га ўзгариши фоизда қаршиликлар термометри кўрсаткичларининг реакциясига тенг. Сезир элемент параметрини совуқ дистиллят ҳароратининг ўзгаришига қаршиликлар термометри кўрсаткичи ёрдамида доимий юклама остида ишлайдиган йўли билан ўлчаш генератор [6] усул бўйича аниқланиши мумкин. Бу ҳолда мис ҳароратининг ўзгариши дистиллят (таркибида тузлардан тозаланган) сув ҳароратининг ўзгаришига тўғри келади.

Аслида, тиқин остидаги бошқариш қаршиликлар термометр учун қийматлари 0 дан 0,5 гача. Ишлаш вақтида тиқин тирқишлиарининг заифлашиши ва профилактик

таъмирлаш вақтида тирқишларни қайта блоклаш туфайли сезгир элемент параметри белгиланган оралиқда ўзгаради. Бундай ҳолда, қаршилик термометр кўрсаткичлари шундай ўзгарадики, бундай ўзгишлар қаршилик термометри иссиқлик кўрсаткичларини нуқсонларнинг пайдо бўлишига олиб келади.

Стерженинг ён юзасидаги қаршиликли термометр учун сезгир элемент параметри (325 МВт ва ундан юқори кувватга эга турбогенераторларнинг пастки стерженлари) 0 дан 0,7 гача ва ишлаб чиқариш жараёнида қаршиликли термометрнинг генератор стерженига ўрнатилиши сифатига боғлиқ. Бундан ташқари, қаршиликли термометр сезгирлиги нолга яқин (сезгир элемент қиймати, 0,15 га тенг) бўлган чулғамларнинг улуши тахминан 12% ни ташкил қиласди. Бундай стерженлар эксплуатация пайтида иссиқлик назоратсиз колади. Кўрсатилган ҳолатлар туфайли стандарт назорат усуллари ичи бўш ўтказгичларда блокировкаларни аниқлашда паст самарадорликка эга. Шундай қилиб, [7] га кўра, техник нуқсонни аниқлаш эҳтимоли тахминан 25% ни ташкил қиласди [4] ва техник нуқсонни аниқлаш эҳтимоли ундан ҳам паст ва нолга яқин [3], бу куйидаги мисоллар орқали тасдиқланган.

1-расмда номиналга яқин юклама режимида TBB-325-2 генераторларидан бирининг статор чулғами стерженлари ҳарорати номиналга яқин юклама режимида ишлаши кўрсатилган. Мезонларга [3] мувоффик, статорда ичи бўш чулғамларда тўлиб тиқилиб қолган нуқсонлари мавжуд эмас. Стеженларнинг максимал ҳарорати 33 - паз учун, стержендаги ҳарорат  $54,1^{\circ}\text{C}$  ни ташкил қиласди, бу рухсат этилган чегара  $75^{\circ}\text{C}$  дан ошмайди. Юқори стерженлар бўйлаб максимал ҳарорат фарқи  $11,6^{\circ}\text{C}$  кузатилади ва (33 ва 7 пазлардаги стерженлар), бу рухсат этилган  $25^{\circ}\text{C}$  қийматидан ошмайди.

Биринчи иссиқлик синовлар маълумотлари билан таққослаганда, 9 ва 33-пазлардаги юқори чулғамларнинг ҳарорати сезиларли даражада ошди, бу ерда ҳароратнинг мос равища  $9,2^{\circ}\text{C}$  ва  $13,8^{\circ}\text{C}$  га кўтарилиши қайд этилди, бу  $5^{\circ}\text{C}$  меърдан сезиларли даражада ошади. Бу ҳол [4,5] да кўрсатилган. Бироқ, турбогенераторни капитал таъмирлаш ва гидравлик синовлар пайтида, бу чулғаларнинг совутиш каналларининг тиқилиб қолиши ҳолатлари аниқланмади. Мисол учун, олтинчи юқори стерженда дистиллатнинг назорат оқими тезлиги камида 0,267 л/с рухсат этилган ҳолда 0,304 л/с ни ташкил этди.

Маълум бўлишича, бу стерженларда ҳароратининг нисбий ўсиши ҳароратни ўлчаш каналларида тизимли ўлчаш хатолари кўринишидаги нуқсонларнинг пайдо бўлиши билан боғлиқ. Таъмирлаш вақтида стерженларнинг ўтказувчанлиги гидравлик синовлар давомида бутунлай бошқа стерженларнинг совутиш каналларини тўлиб тиқилиб қолиши аниқланди, яъни 8 ва 27-пазлардаги юқори чулғамларда ва 24-чи паздаги пастки, ишлаб чиқарувчининг меъеридан паст бўлиши керакли аниқланди. Ушбу стаженлар орқали дистиллят сув истеъмоли мос равища 80,6; 72,0 ва номиналнинг 50,7% ни ташкил этади.

**Таҳлилий натижалар.** Генераторни юкланиш пайтида стандарт газ тутқичида водороднинг пайдо бўлиши кузатилди. Юкламани туширгандан сўнг, газ тутқичдаги водород ғойиб бўлди. Генератор босимини йўқотиш жойини топиш ва нуқсонни бартараф этиш учун таъмирлашга чиқарилганда, у аниқланмади. Чулғам ҳаво ва гидравлик синов усулларидан фойдаланган ҳолда маҳкамлаш учун таъмирлаш

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

синовларига бардош беради. Илмий-тадқиқот институтларида ишлаб чиқилган термал таҳлилнинг аналитик усули (АМТД) ёрдамида нуқсон аниқланди ва кейинчалик бу түлиқ бартараф қилинди. АМТД усули стандарт термал бошқарув тизимининг маълумотларни қайта ишлашга асосланган [7]. Таҳлил учун дастлабки маълумотлар талабларга мувофиқ ўтказилган операцион иссиқлик синовлари натижалари [3] илмий ишда келтирилган.

Бундай ҳолда, [6] да тавсифланган стандарт қаршилик термометри воситаларининг индивидуал сезгирилгини аниқлаш учун ўлчовлар амалга оширилиши керак. Генераторнинг турли иш режимларида ҳароратни ўлчаш натижаларига кўра, ҳар бир стерженинг таҳлил параметрлари (1) - тенглама билан боғлиқ ҳолда ҳисобланади;

$$\theta = \alpha + \beta \cdot I^2 ; \quad (1)$$

бу ерда  $\theta$ -чулғам ҳолатининг интеграл параметри, бу генераторнинг конструктив хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда ҳисобланган стержен ҳароратининг кўриб чиқилаётган чулғамлар тўпламининг ўртача ҳароратидан оғиши;  $\alpha$ - ҳароратни ўлчаш каналининг ҳолатини баҳолаш параметри, тизимли ўлчаш хатолар содир бўлганда ўзгаради;  $\beta$  - да совутиш ҳолатини баҳолаш учун параметр бўлиб, у ғовак ўтказгичлар стандарт восита реакциясининг катталиги билан блокланганда ортади;  $I^2$  - статор токининг квадрати.

Таҳлилий параметрлар регрессия усуллари ёрдамида ҳисобланади. Тасодифий ўлчов хатоларига олиб келадиган ҳароратни ўлчаш каналларидаги нуқсонларни аниқлаш учун S параметри киритилади.

Бу юкорида айтилганларга мувофиқ регрессия чизигига нисбатан ўлчанган кийматларнинг ўртача квадрат оғишини ифодалайди, пазларнинг поналарини қаршилик термометри юзаси ва стержен изоляцияси ўртасидаги иссиқлик алоқаси ҳолатини назорат қилиш учун сезгирилган элемент параметри киритишни талаб қиласди. Қаршилик термометрининг сезгирилги ва мис ҳароратининг  $1^{\circ}\text{C}$  ўзгариш даражасидаги реакциясига тенгдир.

Вақт ўтиши билан паз канали заифлашганда, қаршилик термометри танаси устидаги водород оқими ошади ва сезгирилган элемент параметри камаяди. Стандарт бошқарув тизимининг маълумотларини тўғридан-тўғри таҳлил қилиш яхши таҳлилий натижани бермайди, чунки стандартда стержен воситаларининг кўрсаткичлари нафакат чулғамларнинг ҳароратига, балки бошқа таъсир килувчи омилларга ҳам боғлиқ. Доимий статор токи ва дистиллят сув ҳароратида ўлчангандан  $10^{\circ}\text{C}$  га етади.

Бундай кенг қўламли қийматларда совутиш тизимида нуқсонлари бўлган стерженларни хизмат кўрсатадиганлардан ажратиш қийин. АМТТ нинг ўзига хос хусусияти қўшимча таъсир этувчи омиллар таъсиридан келиб чиқадиган тасодифий ва тизимли хатоларни йўқотишга қаратилган маъсус аналитик алгоритмнинг таҳлилий параметрларини ҳисоблашда фойдалидир.

Ҳисоблашнинг асосий нуқтаси ротор оқимининг таъсирини ҳисобга олган ҳолда, шунингдек генераторнинг типик ва индивидуал кўриниш хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда статор пўлат ўзагининг совутадиган газ параметрларининг

таъсирини ҳисобга олишдир. Хусусан, қуидагилар ҳисобга олинади: статор пўлат ўзагининг газни совутиш тизимининг хусусиятлари; бўшлиқка чикадиган пазли понанинг мавжудлиги, шакли ва жойлашиши; статор чулғамининг стандарт қаршилик термометрининг индивидуал сезгирилиги.

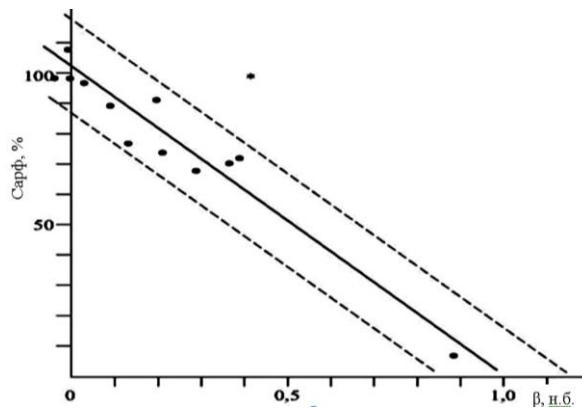
Кўшимча таъсир этувчи омиллар таъсириниң самарали компенсацияси туфайли, хизмат кўрсатадиган стерженларниң таҳлилий параметрлари  $0,7 - 1,3^{\circ}\text{C}$  билан тор доирадаги қийматларга эга, бу таҳлилий параметрлари қаторини статистик таҳлил натижалари асосида нуқсонли таёқчаларни яхши аниқлашни таъминлайди.

TBB-325-2 турбогенератори билан тасвирланган мисолда АМТД дан фойдаланиш 6 ва 24-пазлардаги юқори стерженларниң ҳарорати кўтарилишининг ҳақиқий сабабини ва 8, 27-пазлардаги юқори стерженларниң ўтказувчанлигини пасайишини аниқлашга имкон берди 24-паздаги пастки стержен. Тадқиқотниң энг катта ҳажми TBB-325-2 турбогенераторларида амалга оширилди. Уларниң жами 2 таси текширилди. 6 -турбогенераторда дистиллят сув истеъмоли камайган 10 та стержен топилди. Капитал таъмираш пайтида рад этилган стерженларниң ўтказувчанлиги секундомер ва ўлчаш қурилмаси ёрдамида оқим тезлигини тўғридан-тўғри ўлчаш орқали текширилди. Натижада, таҳлил параметрининг қийматлари ва стержен бўйлаб дистиллят сув оқим тезлиги ўртасида жуда қаттиқ боғлиқлик борлиги аниқланди. Бу боғлиқлик 2-расмда кўрсатилган. Ушбу расмда кўриниб турибдики, дистиллят сувни стержен томонидан  $P_{\text{расход}}$  параметр қиймати бўйича бильосита аниқлаш хатоси номинал оқим тезлигининг 15% дан кўп эмас.

Стерженларниң ўтказувчанлигини ташхислашда хатолик факат бир марта содир бўлди, 2-расмда белгиланган  $P_{\text{расход}}$  нинг етарлича юқори қийматида дистиллят истеъмоли нормал бўлиб чиқди. Тақдим этилган маълумотларга кўра, ишлайдиган деярли ҳар учинчи генераторда совутиш каналлари тиқилиб қолган ва дистиллят истеъмоли ишлаб чиқарувчининг техник стандартидан паст бўлган стерженлар мавжуд.

Бу ғовак ўтказгичларниң блокировкаларини аниқлаш нуқтаи назаридан тартибга солишини бошқариш усулларининг паст самарадорлиги билан изоҳланади. Шу сабабли, турбогенераторларниң иссиқлик синовларида ўлчовлар ҳажмини бироз ошириш тавсия этилади [3,4], бу қаршилик термометрининг индивидуал сезгирилигини баҳолашни ва масалан, АМТД ёрдамида тиқилиб қолган стерженларни аниқлашни таъминлайди. Бундай кенгайтирилган иссиқлик синовларини ўтказишида, совутиш каналларида мавжуд блокировкаларни аниқлаш ва бартараф этиш, ишончлилигини ошириш ва ишлаётган турбогенераторларниң хизмат қилиш муддатини узайтириш имконини беради.

TBB сериали қуввати 800 МВт ва ундан ортиқ турбогенераторларниң тиқилиб қолиши айниқса хавфлидир, бу ерда оқим зичлиги, масалан, 320 МВт турбогенераторга қараганда 2 дан 2,5 баравар катта. Шу билан бирга, ушбу генераторларниң пастки стерженларининг алоҳида қаршилик термометр воситалари стерженларининг изоляциясига қарши заиф қилиб ётқизилган ва улар ҳароратининг ошишига деярли таъсир қилмайди, бу ҳолат эса иш пайтида бундай стерженларниң иссиқлик таҳлилини амалга оширишни имконсиз қилади.



2-расм. ТВВ-325-2 турбогенераторларида дистиллят сув истеъмолининг сарф параметрига боғлиқлиги

Россиянинг РАО УЭС электр станцияларида катта қувватли ТВВ-1200-2 серияли турбогенератор синовдан ўтказилди. Бу синов натижасида қаршилик термометрнинг пастки синган стержень маҳкамлагиши аниклангани йўқ эди.

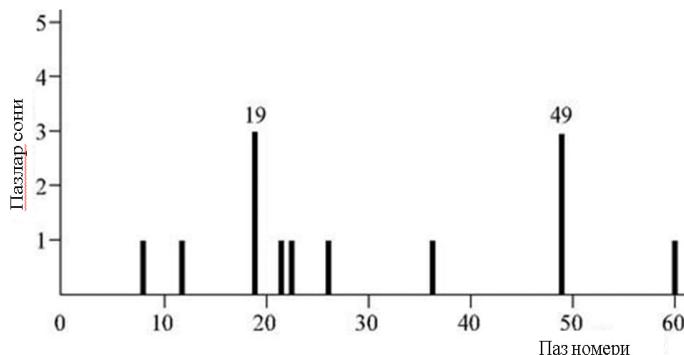
Бироқ, юқори чулғамларнинг қаршилик термометри қабул қилинмайдиган даражада паст сезувчанликка эга эканлиги аникланди. Бу генераторнинг конструктив хусусиятлари билан боғлиқ. Юқори стерженлар учун сезгир элемент параметрининг ўртacha киймати 0,123, минимал ва максимал кийматлари 0,05 ва 0,182 га тенг.

Қаршилик термометрининг бундай сезгирлиги дистиллят сувнинг стерженлари устидан ишончли ўтиши орқали эксплуатацион назоратни таъминламайди.

ТВВ-325-2 сериали турбогенераторлар экусплуатация пайтида фойдаланишда факат учтаси кўриб чиқилди. 11 та стерженда қаршилик термометрининг паст бўлган сезгирлиги аникланди. Ўтиш кобилиятини текшириш шуни кўрсатдики, улардан бири дистиллят сув истеъмоли минимал рухсат этилганидан анча паст (номиналнинг тахминан 72%). Бундан ташқари,  $P_{расход}$  параметрига кўра, дистиллят сув истеъмолини 81% ва номиналнинг 51% гача камайтириш билан иккита тиқилиб қолган стерженда топилди.

ВНИИЭ бу мақсадда ҳаво билан аралаштирилган дистиллят сувни тескари ювишдан фойдаланади. Ювиш технологиясида эксклюзив техник усуллар кўлланилади, ювиш оқимининг энергиясини ва ювиш самарадорлигини сезиларли даражада оширилади. Технология 15 тага яқин стерженни ювиш учун ишлатилган. Бироқ, ювиш оқимининг юқори энергияси туфайли ифлослантирувчи маҳсулотларни йиғиш қийин, сабабларини таҳлил қилиш зарурдир.

Масалан, ифлослантирувчи моддаларни тўплаш учун чиқадиган ювиш шлангига жойлаштирилган уч қатламли дока халтачаси ювиш жараёнида парчаланиб кетган. Ифлослантирувчи маҳсулотларни йиғиш учун металл тўр билан ажратгични ўрнатиш зарур.



3-расм. TBB-325-2 турбогенераторларида статор тешиги бўйлаб заифлашган пона билан пазларни тақсимлаш

Таъкидланганидек, паз понаси остидаги устки стерженаларга ётқизилган қаршилик термометрининг сезгирилиги тирқишининг даражасига боғлиқ. Тажриба шуни кўрсатадики, масалан, TBB-325-2 типли турбогенераторларида сезгири элементнинг 0,18 дан кичик қийматлари понани қайта алмаштириш зарур бўлганда ва таъмирлаш мезонларига кўра, понанинг бундай заифлашишини "тегиниш" усули ёрдамида баҳолаш учун таъмирлаш мезонларига мувофиқ.

3-расмда TBB-325-2 кўриниши турбогенераторида ўтказилган ўлчовлар натижаларидан олинган статор пази устида заифластирилган понали (мин < 0,18) бўшлиқларнинг тақсимланиши кўрсатилган. 19 ва 49 - пазларда пона бўшашининг ҳолатларининг кўплиги диққатга сазовордир. Бу тирқишилар бўшлиқда газ айланишининг олдини олиш орқали ротор чулғамининг совутиш самарадорлигини ошириш учун бўшлиққа чиқадиган қувирларга эга. Ушбу тирқишиларда газнинг бўшлиқда айланишини олдини олиш орқали ротор чулғамининг совутиш самарадорлигини ошириш учун бўшлиққа чиқадиган поналар мавжуд.

Чиқиб кетган понали пазларда понанинг бўшаши (ёки эҳтимоллиги) 0,43 ни ташкил этган бўлса, анъанавий понали пазларда бу кўрсаткич 0,017 ни ташкил этди. Частоталардаги бундай номувофиқликни тасодифий деб ҳисоблаш мумкин эмас, бу статистик гипотезаларни баҳолаш мезонларидан фойдаланган ҳолда тест орқали ҳам тасдиқланади. Таъмирлаш ходимлари ўтасида ўтказилган сўров шуни кўрсатдики, таъмирчилар кўп қисмини пона тирқишини тўсиқ билан эгаллаган ҳолда, поналарнинг маҳсус конструкцияси туфайли "тегиниш" усули ёрдамида бундай поналарнинг даражасини аниқлашда қийинчиликларга дуч келди, чунки понанинг кўп қисмини резинали чиқиб турган қисми эгаллайди.

Қоида тарикасида, тегиниш натижаларига кўра, бундай поналар нормал деб баҳоланади ва пазлар бир-бирига ёпишмайди. Шу билан бирга, генераторлардан бирида маҳкамлашнинг заифлашиши туфайли 19- паздаги стерженда тебраниш билан йўқ бўлиб кетиш ҳолати юз берди.

Чиқиб турган поналар TBB сериясининг бошқа турдаги турбогенераторларида кенг қўлланилади, бу ерда чиқадиган поналар билан стержендаги маҳкамланишининг бўшашиши ҳам тез-тез учрайди. Чиқиб кетган поналари заифлашган бўлган

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

тирқиши генераторларнинг қўп сонли ишлаши ва бундай пона пази тебранишини бузиш натижасида авария содир бўлиши сабабли, техник хизмат кўрсатувчи ходимлар эҳтиёткорлик билан харакат қилишлари керак. Намлик стандарт назорат усуллари билан аниқланмаган кичик тирқишилар билан чулғамларни гидравлик синовдан ўтказиш содир бўлади. Шунинг учун термал синовларни ўтказишида ВНИИЭ қўшимча равища совутиш дистиллят сувида эриган водород концентрациясини ўлчаш орқали чулғамнинг маҳкамлигини текширади [8-9]. Ушбу усул иккита ТВВ-325-2 турбогенераторида оқиши нуқсонларини аниқлаш ва бартараф этиш учун ишлатилган.

Битта ТВВ-325-2 турбогенераторида маълум усуллар билан чулғам жойлашишини аниқлашнинг иложи йўқлиги сабабли бартараф этилмаган, аммо гидравлик босим синови пайтида изоляцияни намлашига олиб келадиган енгил маҳкамлаш нуқсони топилди.

Генераторни ишда қолдириш ва таъмирлаш вақтида гидравлик босимни текшириш процедурасидан воз кечиш, уни дистиллят сувдаги водород концентрациясини ўлчаш усули орқали алмаштириш тавсия этилди.

**Хуноса:** Сув билан совутиладиган турбогенераторларнинг статор чулғамларида, айниқса узоқ вақт давомида ишлайдиган турбогенераторларнинг статор чулғамларини, сув билан совутиш каналларининг техник ҳолатини узлуксиз равища назорат (диагностика) қилиш ва статор чулғамларини пазларда тўғри ётқизиш усулларини ўз ичига олган ҳолда стандарт эксплуатацион синовларни кенгайтириш керак, бу эса турбогенераторнинг ишончлиликни оширишга имкон беради [10-12]. Яширин нуқсонларни ўз вақтида аниқлаш ва бартараф этиш орқали генераторларнинг ишлаш муддатини ўзайтиради.

### Адабиёт

1. Проблемы технического перевооружения энергопредприятий РАО “ЕЭС России” и пути их решения / Ремезов А. Н., Романов А. А., Косинов Ю. П., Бржезянский С. Э. //Электрические станции, 2000, № 1.
2. Электротехнические проблемы научно-технического прогресса электроэнергетики / Мамиконянц Л. Г., Моржин Ю. Н., Савваитов Д. С., Шакарян Ю. Г. //Электрические станции, 2000, № 1.
3. Методические указания по проведению испытаний генераторов на нагревание. РД 34.45.309-92. М.: СПО ОРГРЭС, 1993.
4. Эксплуатационный циркуляр Ц-10-85(Э) от 28 мая 1985 г. Об организации водно-химического режима системы охлаждения обмоток статоров турбо- и гидрогенераторов. Сб. решений и циркуляров ГТУ Минэнерго СССР за 1985 г (Электротехническая часть). М.: СПО Союзтехэнерго, 1986. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: ЭНАС, 1998.
5. Пат. 1836783 (РФ). Способ контроля креплений обмотки электрической машины / Поляков В. И. Опубл. в Б. И., 1993, № 31.

6. Поляков В.И. Методы диагностики технического состояния генераторов на основе штатных средств измерений: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд.техн.наук. М.: ВНИИЭ, 1992.

7. Поляков В.И. Метод и прибор для обнаружения нарушений герметичности системы водяного охлаждения обмотки статора работающего турбогенератора. М.: Вестник ВНИИЭ, 1997.

8. Mathematical Modeling of the Self-Swinging Process of Synchronous Generators N. Pirmatov., A. Bekishev., A. Egamov., S. Shernazarov., F. Isakov., M. Zubaydullayev AIP Conference Proceedings 2612, 050005 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0135546>.

9. Regulation of mains voltage and reactive power with the help of a synchronous compensator by two-axis excitation Pirmatov N., Bekishev A., Shernazarov S., Kurbanov N., Norkulov U. E3S Web of Conferences, 264, 04028 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404028>.

10. Overvoltage in the three phase of the stator winding in case of asymmetric short circuit implicit pole synchronous generator biaxial excitation. Pirmatov N., Toshev S. E3S Web of Conferences 139, 01030 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901030>.

11. Best overall dimensions of synchronous generator with permanent magnets for small power wind plants and micro hydropower plants. Pirmatov N., Tosheva S., Toshev S. E3S Web of Conferences 139, 01027 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901027>.

12. “Effect of intermediate connections on the generator’s static stability” Шерназаров С.Э. //Technical science and innovation. -Тошкент, 2019. №2. -С.184-189.

*Тошкент давлат техника университети  
томонидан тақдим этилган*

УДК 621. 311

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ НА  
УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УЗБЕКИСТАНА**

**О.Ё. Нурматов**

Мақолада үирик насос станциялари синхрон моторларнинг қўзгатишини бошқариши усули таклиф этилади. Таклиф этилаётган усул ноаниқ мантиққа асосланган ростлагичлардан фойдаланишига асосланган. Кирии параметрларининг функциялари тугундаги реактив қувват истеъмоли даражасининг оғиши, шунингдек чиқиши параметрида қўзгатиш кучланиши келтирилган. Юклама тугунидаги реактив қувват исрофининг ўзгаришига қараб чиқиши сигналини яратишга имкон берувчи қоидалар базаси берилган. Камта асинхрон юкламани ноаниқ мантиққа асосланган бошқарувчи билан жиҳозланган синхрон моторнинг уланиши тугунига улашдан иборат тажриба амалга оширилди.

**Калим сўзлар:** насос станциялари, ўткинчи жараёнлар, қўзгатишни автоматик ростлаш, синхрон моторлар.

*В статье предложен способ управления возбуждением синхронных двигателей крупных насосных станций. Предлагаемый способ управления основан на использовании регулятора на основе нечеткой логики. Представлены функции принадлежности входных параметров – отклонения уровня потребления реактивной мощности в узле, а также выходного параметра – напряжения возбуждения. Приведена база правил, позволяющая вырабатывать выходной сигнал в зависимости от изменения потребления реактивной мощности в узле нагрузки. Проведено моделирование, заключающееся в присоединении крупной асинхронной нагрузки к узлу подключения синхронного двигателя, оснащенного регулятором на основе нечеткой логики.*

**Ключевые слова:** насосные станции, переходные процессы, автоматический регулятор возбуждения, синхронные двигатели.

*The article proposes a method for controlling the excitation of large pumping stations of synchronous motors. The proposed control method is based on the use of a controller based on fuzzy logic. The membership functions of the input parameters are presented - the deviation of the level of reactive power consumption in the node, as well as the output parameter - the excitation voltage. A base of rules is given that allows generating an output signal depending on the change in reactive power consumption in the load node. A simulation has been carried out, which consists in connecting a large asynchronous load to the connection node of a synchronous motor equipped with a controller based on fuzzy logic.*

**Key words:** pumping stations, transient processes, excitation regulation, synchronous motors.

Крупные синхронные двигатели широко применяются на предприятиях, повышая устойчивость узлов нагрузки и улучшая энергетические показатели систем электроснабжения. Эти свойства синхронных двигателей в значительной мере определяются типом возбудителя и автоматического регулятора возбуждения. С появлением силовых полупроводниковых приборов во всем мире началась замена электромашинных возбудителей на статические и бесщеточные, существенно повышающие технико-экономические показатели двигателей и изменяющие их характеристики. Синхронные двигатели (СД) средней и большой мощности нашли широкое применение практически во всех отраслях промышленности. Режим работы СД определяется режимом как рабочих механизмов, так и системы электроснабжения узла нагрузки, к которому СД подключен. При этом необходимо учитывать характер и уровень нагрузки на валу, уровень и форму колебаний напряжения, график реактивной нагрузки узла нагрузки и промышленного предприятия в целом.

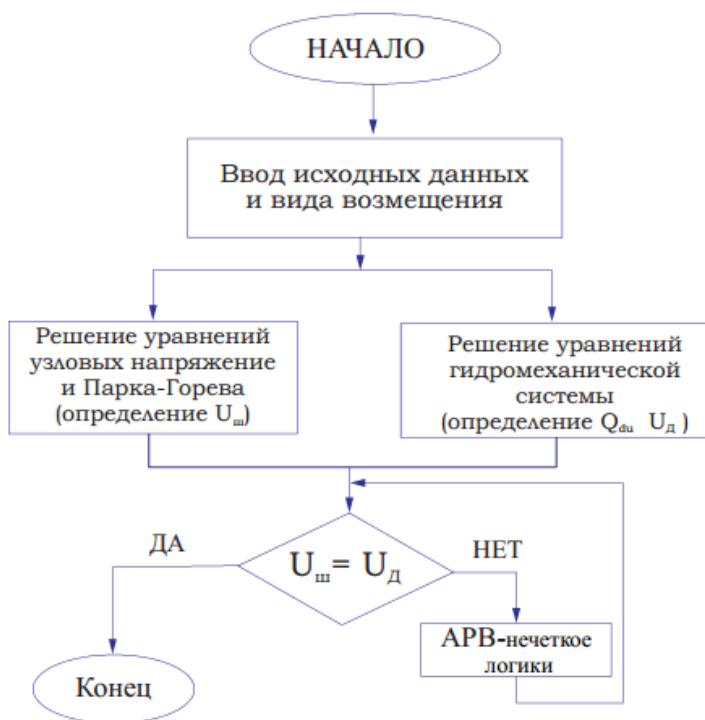


Рис.1. Алгоритм работы системы APB с учетом совместного решения уравнений узловых напряжений и уравнений Жуковского

СД в настоящее время являются практически единственными серийными, плавно регулируемыми источниками реактивной мощности без генерации мощности искажения. Использование компенсирующих возможностей СД актуально как с точки зрения минимизации потерь электроэнергии, так и с позиции удовлетворения

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

требований энергосистем, касающихся оптимального уровня реактивной нагрузки потребителей в часы максимума активной нагрузки. Показатели режимов работы СД определяются параметрами собственно СД и его системы возбуждения, параметрами смежных электроприемников узла нагрузки с учетом вероятностного характера распределения параметров оборудования и режимных величин [1,2,3].

Применение синхронных двигателей на промежуточной подстанции, причем снабженных АРВ СД, обеспечивает поддержание напряжения в месте присоединения к линии независимо от режима электропередачи. Практически это означает, что в линии появляются шины неизменного напряжения, разделяющие систему на две или более независимые части. В таких схемах устойчивость каждого из участков определяется независимо от другого. При этом пропускная способность и устойчивость системы значительно увеличивается, так как устойчивая работа обеспечивается при углах  $\delta$  больше  $90^\circ$  [3,7]. На рис.1 показана последовательность работы АРВ на основе нечеткой логики при совместном решении уравнений узловых напряжений и уравнений Жуковского.

Предел передаваемой мощности электропередачи согласно схеме, показанной на определяется пределом мощности участка, имеющего наименьшую пропускную способность. Особенно эффективно применение синхронных машин при оснащении их АРВ СД. В этом случае необходимая мощность синхронных двигателей (компенсаторов) для поддержания напряжения составляет величину 60-80 % от передаваемой по линии мощности. Поэтому схемы с крупными насосными станциями, имеющие в составе синхронные двигатели могут быть экономически эффективными и конкурентно способными по отношению к другим средствам повышения устойчивости, например, со схемами с продольной емкостной компенсацией. При больших возмущениях в системе электропередачи синхронные машины даже с АРВ СД не могут достаточно быстро обеспечить постоянство напряжения из-за значительной электромагнитной инерции обмотки возбуждения. Это приводит к ограничению величины передаваемой мощности по условиям динамической устойчивости [4,5,6].

Основными характеристиками, определяющими показатели СД и возможность использования его в качестве источника реактивной мощности, являются коэффициенты загрузки по активной  $\beta_d$  и реактивной  $\alpha_d$  мощности и относительное напряжение и на его зажимах. При этом:

$$\beta_d = P/P_n; \quad (1)$$

$$\alpha_d = Q/Q_n; \quad (2)$$

$$u = U/U_n; \quad (3)$$

где  $P$  и  $P_n$  - соответственно фактическая и номинальная активная мощность на валу СД;  $Q$  и  $Q_n$  - фактическая и номинальная реактивная мощности СД;  $U$  и  $U_n$  - фактическое и номинальное напряжения на статоре СД. Максимальная реактивная мощность СД, которая может быть использована в узле нагрузки:

$$Q_m = \frac{\alpha_{d.m} \operatorname{tg} \varphi_h}{\eta_h} P_h - Q_b, \quad (4)$$

где  $\varphi_h$  и  $\eta_h$  - номинальные коэффициенты мощности и полезного действия двигателя;  $Q_b$  - реактивная мощность, потребляемая системой возбуждения, если не используются другие источники реактивной мощности для ее компенсации [3,7,8,9].

Решение многих практических задач можно значительно упростить, если провести упрощающие преобразования схемы энергосистемы с целью уменьшения количества генерирующих станций и узлов нагрузки в расчетной схеме. Преобразованную электрическую систему можно считать эквивалентной исходной, но не по всем ее свойствам. Эту особенность следует учитывать при выполнении упрощающих преобразований, реализации их с возможным полным сохранением тех свойств системы, которые являются целью исследования. При составлении эквивалентной схемы электрической системы следует произвести оценку возможных упрощений. В этом случае необходимо решить, нужно ли воспроизвести всю схему системы или достаточно подробно воспроизвести только ее часть, а другую часть упростить. Упрощения можно сделать как очень приблизительными, так и более точными. Так например, при оценке устойчивости протяжённой электропередачи, связывающей станцию с мощной энергетической системой, в последней можно произвести грубые упрощения. Такие упрощения включают неучет небольших станций и нагрузок, замену небольших станций и нагрузок одной эквивалентной станцией или нагрузкой, перемещение нагрузок или станций к точке присоединения другой станции или нагрузки, разрыв слабых соединений, точки соединения. Для упрощения расчетной схемы производится исключение второстепенных элементов схемы: малых нагрузок, параллельных линий, некоторых замкнутых цепей и т.д. В этом случае небольшие нагрузки передаются на узлы схемы, пассивные элементы трансформируются путем проведения ее эквивалентных преобразований [9,10].

К элементарным преобразованиям электрических систем относится операция, называемая переносом нагрузки. Когда нагрузкам заданы постоянные значения мощности, перенос нагрузок является нестрогим преобразованием, которое, тем не менее, находит применение в тех случаях, когда это преобразование выполняется в условиях, обеспечивающих приемлемую погрешность. Условия, при которых ставится задача получения упрощенной схемы с эквивалентной станцией, могут быть разными: 1) предварительно рассчитывается режим преобразованной подсистемы, а также мощность совмещенных станций и их э.д.с. или напряжение по величине и фазе определены; 2) известны суммарные активная и реактивная мощности, отдаваемые станциями преобразуемой подсистемы в сеть, а также режимы узлов и ветвей примыкания, заданные значениями активной и реактивной мощностей; 3) мощности в ветвях каждой из генерирующих станций преобразованной подсистемы известны [8,9,11].

Следующим шагом в расчете может стать упрощение схем эквивалентных станций, генераторы которых сведены к одному эквиваленту. При анализе устойчивости энергосистемы, объединение электростанций в одну, которую

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

классически можно назвать эквивалентной, следует производить таким образом, чтобы изменения ее угла нагрузки наилучшим образом отражали движение группы комбинированных станций, по сравнению с остальными станциями в системе. Эта проблема может быть решена, если станции объединить в эквивалент, у которого относительные углы сдвига ротора остаются неизменными на протяжении расчетного интервала переходного процесса [10,12,13].

Значение  $T_j$  эквивалентного генератора определяется по формуле [14]:

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ji} S_{\text{nomi}}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{nomi}}}; \quad (5)$$

где  $S_{\text{nomi}}$  - номинальная кажущаяся мощность  $i$ -го из объединяемых агрегатов.

Значение постоянной времени  $T'_{d0}$  эквивалентного генератора определяется по формуле [7,15,16]:

$$T'_{d0} = \frac{\sum_{i=1}^n T'_{doi} S_{\text{nomi}}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{nomi}}}. \quad (6)$$

Ошибка эквивалентности тем меньше, чем ближе реальное движение комбинированных станций к идеальному синфазному движению, и, следовательно, напрямую связана с успехом выбора группы станций для эквивалентирования. Для такого выбора рекомендуется использовать опыт эксплуатации или результаты ранее выполненных расчетов переходных процессов или, наконец, выполнить специальные расчеты режима эквивалентированных станций в условиях, которые позволят в той или иной мере оценить несовпадение относительных углов. В простейшем случае планируется объединить станции с близкими значениями постоянных инерции и примерно равными значениями собственной проводимости и взаимной проводимости между ветвями совмещенных станций, а также между этими ветвями и ветвью, в которой предполагается расчетное короткое замыкание. Станции, системы автоматического управления которых могут вызвать самораскачивание генераторов в исследуемых режимах системы, не могут быть объединены. Опыт показывает, что автоколебания в системах практически возможны при использовании некоторых систем сильного регулирования, поэтому станции, оборудованные такими регуляторами, должны учитываться в схеме замещения системы как независимые элементы [15,17].

Энергетическая система Узбекистана является неотъемлемой частью Единой энергетической системы Центральной Азии (ЕЭС ЦА), которая работает параллельно с Единой энергетической системой государств-участников СНГ. Энергетическая система Узбекистана географически находится в центре единой энергосистемы и имеет примерно 50% мощности всей ЕЭС. Узбекистан играет важную роль в обеспечении надежного энергоснабжения потребителей в регионе и реализации

потоков электроэнергии, транзит электроэнергии и экспортные поставки в соседние страны [17,18].

Через электрические сети республики осуществляются реверсивные перетоки электроэнергии в Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Афганистан. За последние годы энергетиками республики установлены прочные связи со многими странами мира, Узбекистан стал членом ряда авторитетных международных энергетических организаций, в том числе Европейской Энергетической Хартии [18,19].

Для расчетов динамических режимов и анализа устойчивости энергосистемы была использована схема, полученная с Национального диспетчерского центра Республики Узбекистан. В предоставленной схеме приведены результаты замера фактического потокораспределения мощностей по энергосистемы, датированные 17 июня 2020 года в часы летнего максимума – 12.00.

На рис.3. приведены основные генерирующие и нагрузочные узлы Юго-западной части энергосистемы Узбекистана. На схеме показаны генерирующие и нагрузочные узлы, причем в качестве балансирующего узла принята шина 500 кВ Сырдарьинской теплоэлектростанции. В качестве регулируемых источников реактивной мощности в схему введены агрегаты насосных станций Каршинского магистрального канала НС1-НС-7, общей установленной мощностью 516 МВт, насосных станций Хамза-1, Хамза-2 и Хамза вспомогательная, установленной мощностью соответственно 45, 125 и 46 МВт, а также Кызылтепинской насосной станции, установленной мощностью 125 МВт.

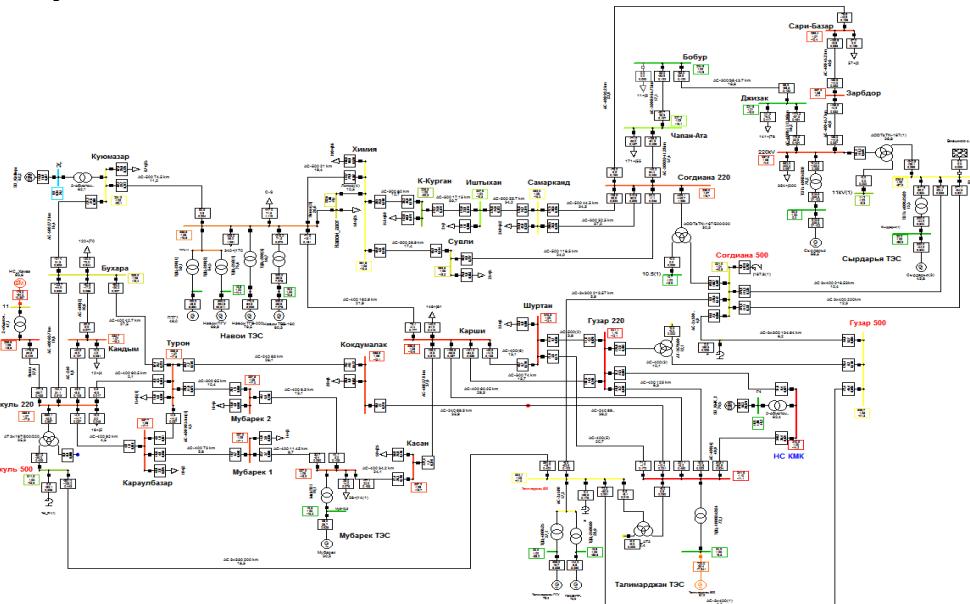


Рис. 3. Принципиальная схема Юго-западной части энергосистемы Узбекистана



Рис. 4. Структура Fuzzy логического контроллера

Схема Юго-западной части энергосистемы представлена с некоторыми упрощениями:

- расчеты переходных режимов проводились только относительно основных электрических сетей энергосистемы 220 кВ и 500 кВ;
- связь Юго-Западной части энергосистемы с Северо-западной частью моделировалась добавлением нагрузки на шины Навоийской ТЭС, эквивалентной перетоку мощности по трем линиям: Навои ТЭС - п/ст Д, Навои ТЭС - п/ст Бесопан, Навои ТЭС - п/ст А;
- нагрузки в узлах и генерация мощности на электростанциях являлись неизменными по мощности (статичными);
- отброшены подстанции, являющиеся тупиковыми, причем нагрузки на них перенесены на ближайшие узлы;
- для отражения связи с Центральной частью энергосистемы в схему Юго-западной части были введены следующие подстанции: Согдиана, Чапан-Ата, Бобур, Джизак, Сари-Базар, Зарбдор, а также Сырдарынская ТЭС;
- насосные станции Каршинского магистрального канала НС1-НС-7 были эквивалентированы в одном узле НС КМК.
- насосные станции Хамза-1, Хамза-2 и Хамза вспомогательная эквивалентированы и присоединены к подстанции НС Хамза;
- насосная станция Кызылтепа присоединена к подстанции Куюмазар.

С целью исследования влияния крупных насосных станций, расположенных в Юго-западной части энергосистемы Узбекистана, на динамические режимы энергосистемы будем проводить опыты виртуального моделирования в программном комплексе DIG Silent Power Factory, в которых будут имитироваться как малые, так и большие возмущения.

Малые возмущения будем имитировать набросом нагрузки на шинах подстанций с коэффициентом масштабирования равным 20%, что означает увеличение нагрузки во всех нагрузочных узлах на 20%.

На рис.5. приведены графики изменения напряжений генераторов Талимарджанской ТЭС (ТВВ-800) и Навоийской ТЭС (ТВВ-165) в случае отсутствия регулятора возбуждения на синхронных двигателях насосных станций, так и наличия регулятора возбуждения сильного действия. При отсутствии регуляторов

возбуждения на синхронных двигателях насосных станций напряжения генераторов рассматриваемых электростанций уменьшается до 0,94 о.е., при этом напряжения генераторов не восстанавливаются до значений, предшествующих набору нагрузки.

В случае наличия АРВ-С на синхронных двигателях напряжение генераторов восстанавливаются до значений близких к напряжениям в установившемся режиме: 0,985 о.е. в случае Талимарджанской ТЭС и 0,983 о.е. в случае Навоийской ТЭС.

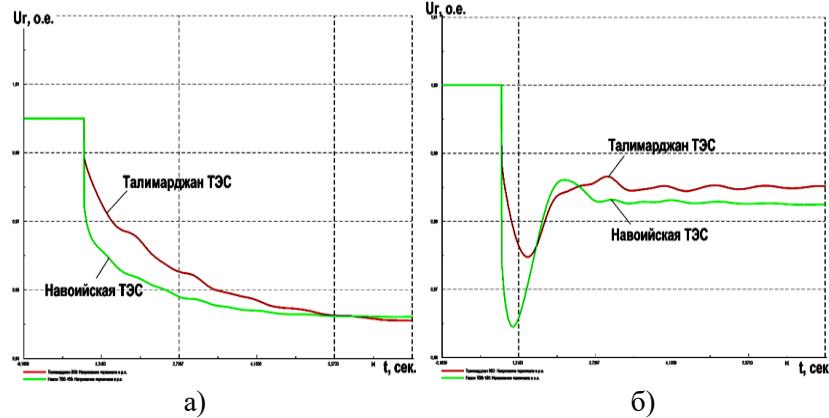


Рис.5. Характеристики изменения напряжения синхронных генераторов при наборе нагрузки: а) при наличие АРВ-с на насосных станциях Хамза и КМК; б) при наличии нечеткой регулятора на насосных станциях Хамза и КМК

На рис.6. получены графики переходного процесса при возникновении в энергосистеме больших возмущений. В качестве большого возмущения будем моделировать двухфазное короткое замыкание на землю на высокой стороне трансформатора НС-7 КМК.

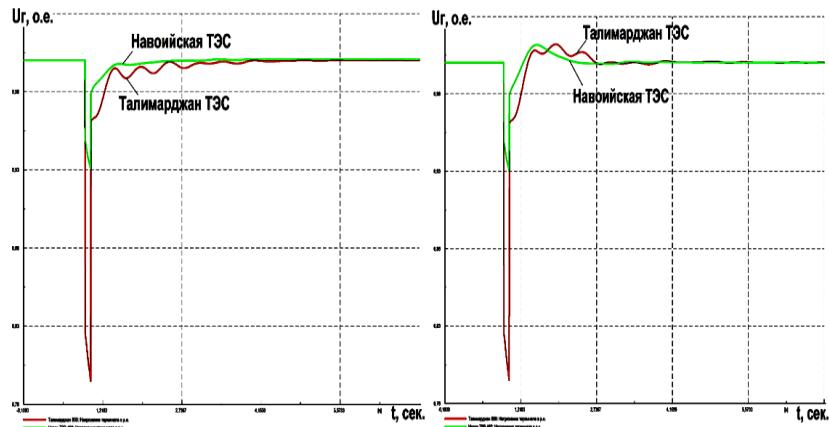


Рис. 6. Характеристики изменения напряжения синхронных генераторов при коротком замыкании: а) при наличии АРВ-С на насосных станциях Хамза и КМК; б) при наличии нечеткого регулятора на насосных станциях Хамза и КМК

Продолжительность короткого замыкания будет составлять 0,1 сек., после чего средствами релейной защиты линия будет отключена.

Анализируя полученные характеристики, можно отметить, что регулируемые источники реактивной мощности в виде синхронных двигателей оказывают существенное влияние на динамическую устойчивость энергосистемы системы.

### Литература

1. Аллаев К.Р., Хохлов В.А., Ситдиков Р.А. Переходные процессы насосных станций /Под ред. проф. М.М. Мухаммадиев. - «Фан ва технология». –Т. 2012, -226 с.
2. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы ее развития. / Под ред. академика Салимова А.У. - Т.: Fan va texnologiyalar nashriot – matbaa uyi. 2021,-951 с.
3. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. - Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1983. -128 с.
4. Цифровые системы возбуждения. URL: <https://ruselprom.by/cifrovye-sistemy-vozbuzhdeniya>.
5. Allayev, K., Makhmudov, T.: Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems. Electr. Eng. 102(1), 309–319 (2020).
6. Лищенко А.И. Синхронные двигатели с автоматическим регулированием возбуждения. - Киев Изд-во «Техника», , 1969. –192 с.
7. Петелин Д.П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961, -105 с.
8. Allayev, K.R., Makhmudov, T.: Analysis of small oscillations of complex electrical systems. E3S Web Conf. 216, 01097 (2020).
9. Nurmatov O. Yo. Analysis of continuances transition processes at abrupt power no balance. //International Journal of Technical Sciences. 2019, vol. 1, issue 3, pp. 15-19.
10. Allayev K., Nurmatov O., Makhmaraimova Calculastion experimental studies of transition processes in electricity systems with account of hydroenergy installations. (Journal of Critical Reviews ISSN- 2394-5125 VOL 7, ISSUE 13, 2020) <http://www.jcreview.com/index.php?iid=2020-7-13.000&&jid=197&lng>.
11. Nurmatov O. Large pumping stations as regulators of power systems modes. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020), vol. 216, pp. 1–4. E3s Web of Conferences (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601097>.
12. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Учебник для вузов. - М.:Высшая школа, 1978. -Изд. 3-е, перераб. -415 с.
13. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. - Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1983. -128 с.
14. АС СУ 1229441 Устройство управления насосом / В.Н. Машков, Б.Д. Асатуров, Р.А. Усманов, А.В. Хохлов и А.М. Яхъябаев/ Бюл. № 17, 1986 (прототип).
15. Jing Shi, Ying Xu, Meng Liao, Shuqiang Guo, Yuanyuan Li, Li Ren, Rongyu Su, Shujian Li, Xiao Zhou, Yuejin Tang Integrated design method for superconducting

magnetic energy storage considering the high frequency pulse width modulation pulse voltage on magnet Applied Energy, Volume 248, 2019.

16. Felipe M.Pimenta, Arcilan T. Assireu Simulating reservoir storage for a wind-hydro hydrid system Renewable Energy, Volume 76, 2015.

17. Green hydrogen cost reduction scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. IRENA. 2020. 106 p.

18. Andreas Rosenstiel, Nathalie Monnerie, Jürgen Dersch, Martin Roeb, Robert Pitz-Paal, Christian Sattler. Electrochemical Hydrogen Production Powered by PV/CSP Hybrid Power Plants: A Modelling Approach for Cost Optimal System Design. Energies 2021, 14, 3437. <https://doi.org/10.3390/en 14123437>.

19. Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry. Feasibility study report Jule. 2019. 90 p.

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом*

УДК 621.3

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

И.С. Самиев

*Мазкур мақолада тақсимланған генерацияға зға бұлған электр тармоқтаринининг йүқотишиларига реактив құвваты таъсири күриб чиқылди. ETAP дастур мажмұаси ёрдамида ФЕС уланған тармоқтарини дасрулаш ва қүшимча реактив құвватни компенсаторининг тармоқдаги йүқотишиларга таъсир үрганилган.*

**Калит сүзлар:** тақсимланған генерация, қайта тикланадиган энергия манбаи, фотоэлектр электр станцияси, тармоқ инвертори, бөшқарии усуллари, реактив құвват, ЭТАП дастурий мажмұаси, реактив құвват компенсатори.

*В данной статье рассмотрено влияние значений реактивной мощности на потери электрических сетей с распределенной генерацией. С помощью программного комплекса ЭТАП смоделирована сеть с ФЭС, а также влияние дополнительного компенсатора реактивной мощности на потери в сети.*

**Ключевые слова:** распределённая генерация, возобновляемые источник энергии, фотоэлектрическая электростанция, сетевой инвертор, методы управления, реактивная мощность (РМ), программный комплекс ETAP, компенсатор реактивной мощности.

*In this article, the influence of reactive power values on the losses of electrical networks with distributed generation is considered. With the help of the ETAP software package, a network with a PV and the effect of an additional reactive power compensator on network losses were modeled.*

**Keywords:** distributed generation, renewable energy sources, photovoltaic power plant, network inverter, control methods, reactive power, ETAP software package, reactive power compensator.

**Введение.** Распределенная энергетика – катализатор и ключевой элемент «энергетического перехода» от традиционной организации энергосистем XX века к новым технологиям и практикам XXI века. «Энергетический переход» осуществляется на базе децентрализации с внедрением систем распределённой генерации (РГ), цифровизации и интеллектуализации систем энергоснабжения. В настоящее время одним из основных элементов РГ является использование в них возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на базе фотоэлектрических электростанций (ФЭС).

По оценкам Международного энергетического агентства и Европейской экономической комиссии ООН, Узбекистан обладает весьма высоким потенциалом в

области использования ВИЭ, совокупный потенциал оценивается в пределах 2 091 млрд. кВт·ч/год.

Для повышения энергетической безопасности и бесперебойного обеспечения населения электроэнергией, в настоящем году принято постановление Президента Республики Узбекистан №-57 от 16 февраля 2023 года “О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году”, где к концу 2023 года планируется ввод в эксплуатацию ВИЭ суммарной мощностью 1,8 ГВт. Настоящим постановлением к концу 2023 года по Республике должны быть введены в эксплуатацию ФЭС мощностью 211,1 МВт на 20 тысячах объектах социальной сферы и государственных учреждений, 742,7 МВт на зданиях и сооружениях 11 тысяч предпринимателей, 182,1 МВт в домохозяйствах 37 тысяч жителей, 15,3 МВт на 765 много-этажных домах, которые будут сдаваться в эксплуатацию в 2023 году, а также строительство малых ФЭС с общей мощностью 555,4 МВт.

В данном случае, при высокой доле интеграции источников РГ малой мощности в традиционные распределительные электрические сети и изменяющейся во времени нагрузки, могут возникнуть проблемы с качеством напряжения в точке присоединения ФЭС и отрицательное влияния перетоков РМ на характеристики сетей. В связи с чем, требуется глубокое изучение данной проблемы (в том числе влияние реактивной мощности на характеристики сетей с ВИЭ), разработка научно обоснованных и практических методов анализа поставленных задач, создание цифровых моделей (двойников) реальных распределительных сетей с применением современных компьютерных программных комплексов.

**Влияние реактивной мощности на характеристики сетей.** Полный ток  $I$ , потери мощности  $\Delta P$  и напряжения  $\Delta U$  в линиях с РГ связаны с нагрузкой  $P$  и  $Q$  соотношениями [1]:

$$I = \frac{\sqrt{P^2+Q^2}}{\sqrt{3}U} = \frac{P\sqrt{1+\tan^2\phi}}{\sqrt{3}U}; \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{P^2+Q^2}{U^2}R = \frac{P^2(1+\tan^2\phi)}{U^2}R; \quad (2)$$

$$\Delta U = \frac{PR+QX}{U} = \frac{PR(1+k\tan^2\phi)}{U}; \quad (3)$$

где,  $\tan\phi$  – коэффициент реактивной мощности;  $k = X/R$  – расчетный коэффициент сопротивления линии и (или) трансформатора.

Как следует из формул (1) – (3), значение каждого параметра  $I$ ,  $\Delta P$  и  $\Delta U$  определяется значениями активной и реактивной мощности, и долей передаваемой по сети РМ.

Для этого вводим определение - «**доля передаваемой РМ**», и опишем выражением (4):

$$d = 1 - \frac{\Pi_0}{\Pi}; \quad (4)$$

где,  $\Pi$  - общее обозначение параметров уравнения (1) – (3);  $\Pi_0$  – значения  $I$ ,  $\Delta P$  и  $\Delta U$  при  $\tan\phi=0$ .

Подставив в (4) значения параметров  $I$ ,  $\Delta P$  и  $\Delta U$ , и после преобразования получим:

$$d_I = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\varphi}} ; \quad (5)$$

$$d_{\Delta P} = 1 - \frac{1}{1+tg^2\varphi} ; \quad (6)$$

$$d_{\Delta U} = 1 - \frac{1}{1+ktg\varphi} ; \quad (7)$$

Кроме влияния на экономические показатели электрических сетей, перетоки РМ приводят к нарушениям технических ограничений по допустимым напряжениям в узлах подключения РГ с ФЭС и передачи активной мощности с минимальными потерями.

На рис.1 приведены графики зависимостей  $d = f(tg\varphi)$ , построенные по результатам расчетов  $d_I$ ,  $d_{\Delta P}$  и  $d_{\Delta U}$  при различных значениях коэффициента РМ [2].

Из графика  $d_{\Delta P} = f(tg\varphi)$  следует, что передача РМ по электрическим сетям существенно снижает пропускную способность сети и увеличивает потери активной мощности.

График зависимости  $d_{\Delta U} = f(tg\varphi)$  указывают, что при высоких значениях РМ, потери напряжения в трансформаторах практически полностью определяются соотношением  $k = X/R$ . В нашем случае, графики зависимостей  $d_{\Delta U}$  построены для значений  $k = 1$  и  $k = 3$ .

На основании приказа Инспекции по контролю в энергетике (Узэнергоинспекция) №168 от 09.09.2008 года «Об утверждении Положения о порядке организации работ по компенсации реактивной мощности», нормативные значение коэффициента РМ на стороне 0,4 кВ должны поддерживаться на уровне  $tg\varphi_n = 0,25$  ( $\cos\varphi_n = 0,97$ ).

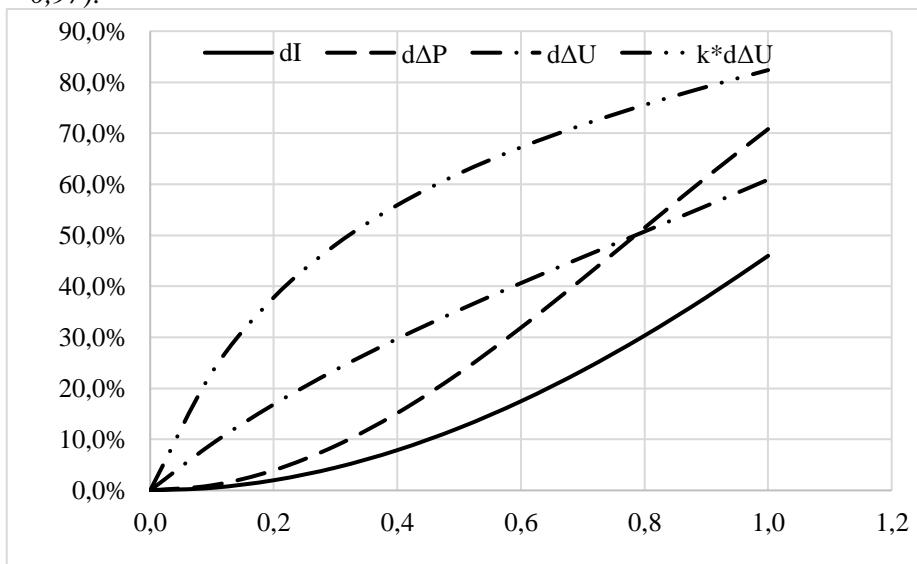


Рис.1. Графики зависимостей  $d = f(tg\varphi)$   
(графики зависимости  $d_{\Delta U} = f(tg\varphi)$  построены для  $k=1$  и  $k=3$ )

Таким образом, высокое значение РМ оказывает значительное влияние на параметры электрических сетей, и как следует из графиков зависимостей (рис.1), даже при поддержании предельного значения коэффициента РМ на уровне нормативного  $\operatorname{tg}\phi_h=0,25$ , потери напряжения  $\Delta U$  будут составлять не менее 27%, и будут увеличиваться по мере роста коэффициента сопротивления  $k = X/R$  линии и (или) трансформатора.

**Возможности регулирования РМ сетевого инвертора ФЭС.** На основании нормативных документов компенсация РМ в электрических сетях с ФЭС должно производиться исходя из необходимости обеспечения требуемой пропускной способности сети при поддержании необходимых уровней напряжения и коэффициента мощности.

Мощность регулирования РМ сетевого инвертора ограничена, и диапазон его выдаваемой реактивной мощности выражается формулой [4]:

$$-\sqrt{S_{PV}^2 - P_{PV}^2} \leq Q_{PV} \leq \sqrt{S_{PV}^2 - P_{PV}^2}; \quad (8)$$

где,  $P_{PV}$  – активная мощность, кВт;  $Q_{PV}$  – реактивная мощность, кВАр;  $S_{PV}$  – полная (кажущаяся) мощность, кВА.

На рис.2. показана кривая мощностей  $P(Q)$  фотоэлектрического инвертора.

Точка А: номинальная активная мощность ФЭС равна  $P_{PV,max}$ , а диапазон регулирования реактивной мощности равен  $[-Q_{PV,I} \div Q_{PV,I}]$ .

Точка В: мощность  $P_{PV,cut}$  включения и выключения инвертора при диапазоне  $[-Q_{PV,2} \div Q_{PV,2}]$  регулирования РМ. В течении дня мощность инвертора может регулироваться в диапазонах  $[-Q_{PV,I} \div Q_{PV,I}] \cup [-Q_{PV,2} \div Q_{PV,2}]$ .

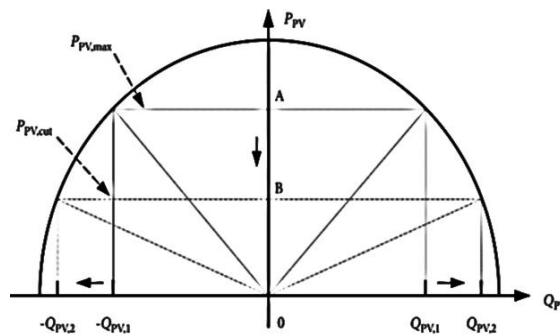


Рис.2. Кривая  $P(Q)$  зависимости инвертора

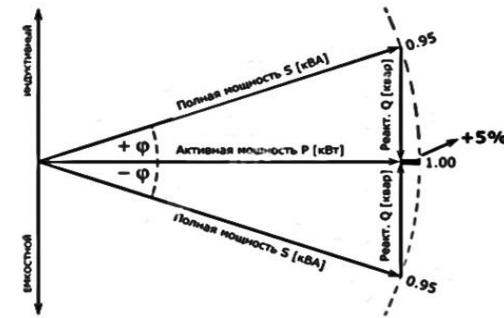


Рис.3. Треугольник мощностей инвертора

На основании стандарта IEEE 1547-2018 [2], функциональные возможности в точке присоединения сетевого инвертора должны обеспечивать коэффициент мощности совместимый с нормальной работой сети.

Для этого, значения коэффициент мощности должны указываться в договорах на присоединение и могут быть на уровне от 0.8 до 1.0 в зависимости от требований энергоснабжающей организации.

Сетевой инвертор ФЭС должен при любых условиях нагрузки обеспечить наличие РМ с соблюдением условий уравнения (8), при которых коэффициент мощности в точке присоединения должна поддерживаться на заданном уровне, например между 0,95 (индуктивный) до -0,95 (ёмкостной), и обеспечивать динамическое регулирование в соответствии с нагрузкой сети, которая меняется с течением времени.

Однако, если сетевой инвертор настроен на высокий коэффициент мощности равный 0,95, инвертор должен будет обеспечить РМ, составляющую 33% от активной (рис.3), связи с чем, становится актуальным решение задач по полной компенсации РМ с применением дополнительного устройства КРМ на выходе ЭФС.

**Моделирование сети с распределённой генерацией.** Компенсация РМ в сетях с помощью сетевых инверторов ФЭС является одним из решений, однако, как было сказано выше, возможности регулирования реактивной мощности сетевого инвертора ограничены при изменении уровня солнечной интенсивности, затенения солнечной панели и изменчивой суточной нагрузки на фидерах.

В современных интеллектуальных сетевых инверторах используются следующие методы РМ: управление регулирования напряжения  $V(\text{var})$ , активной мощности  $P(\text{var})$ , реактивной мощности  $Q(\text{const})$  и коэффициента мощности  $PF(\text{const})$ . В нашем случае для моделирования сети был принят метод управления выходного напряжения  $V(\text{var})$  сетевого инвертора для регулирования РМ в точке присоединения ФЭС.

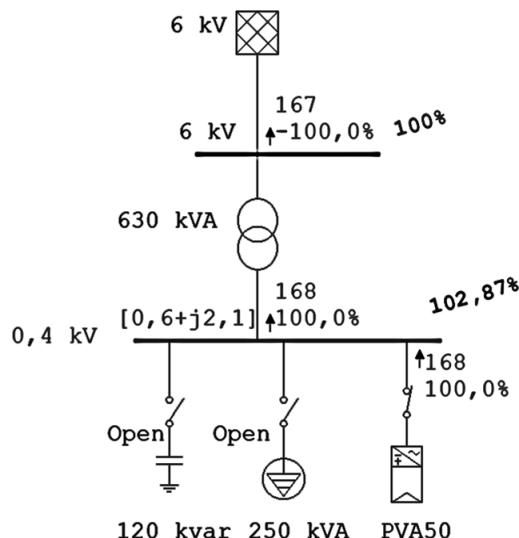


Рис.5. Модель сети при подключении ФЭС

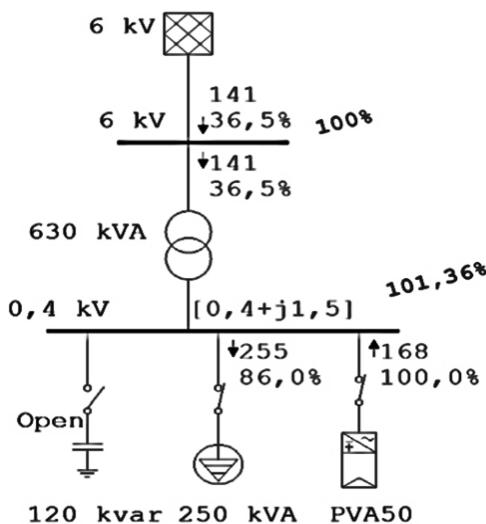


Рис.6. Модель сети при подключении ФЭС и нагрузки

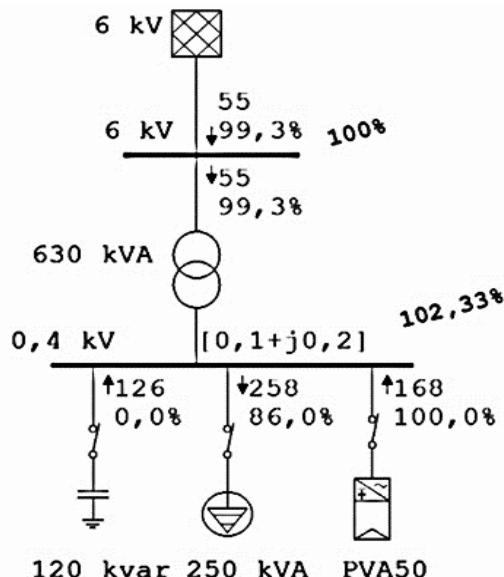


Рис.7. Модель сети при подключении ФЭС, нагрузки и дополнительной КРМ

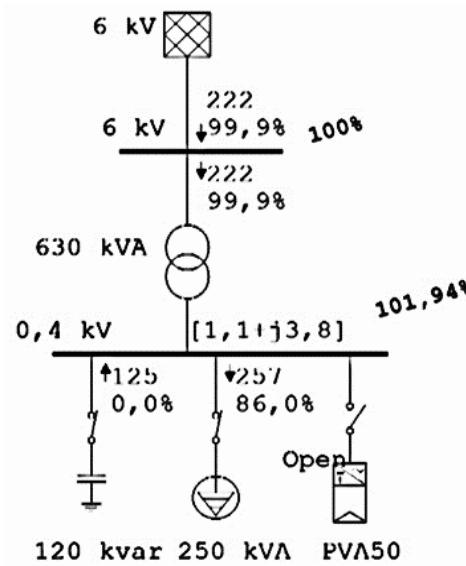


Рис.8. Модель сети при подключении нагрузки и КРМ

Цифровая модель трехфазной сети с ФЭС смоделирована с помощью программного комплекса ETAP (рис.5, рис.6, рис.7, рис.8), которая является средством для анализа режимов систем электроснабжения, переходных процессов и т.д.

Моделирование производилось с учётом подключения к сети ФЭС, нагрузки и КРМ в определённой последовательности:

Подключение (рис.5) только ФЭС, у которой выдаваемая полная мощность 168кВА, цифровая модель программно настроен на  $\cos\phi_n=1,0$ .

Подключение (рис.6) ФЭС + нагрузка 250 кВА,  $\cos\phi_n=0,86$ .

Подключение (рис.7) ФЭС + нагрузка + КРМ с общей мощностью банок 120 кВАр (4x30 кВАр).

При подключении (рис.5) ФЭС PVA50 с мощностью 168 кВА, потери в точке присоединения составили  $S=0,6+j2,1$ .

После подключения к сети (рис.6) ФЭС и нагрузки мощностью 250 кВА потери составили  $S=0,4+j1,5$ .

В третьем случае (рис.7), когда к сети были подключены ФЭС, нагрузка и дополнительный КРМ, потери составили  $S=0,1+j0,2$  и потребляемая из распределительной сети полная мощность снизилась до  $S=55$  кВА.

**Вывод.** Целью данного исследования был анализ влияния РМ на технические характеристики сетей с РГ с ФЭС, изучение оптимального метода регулирования реактивной мощности с помощью сетевого инвертора ФЭС и возможности внедрения дополнительной КРМ для полной компенсации.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

Если требуемая реактивная мощность обеспечивалось бы подходящей дополнительной системой КРМ, то инверторы смогли бы работать с коэффициентом мощности, равным единице, что увеличило бы полезную (активную) мощность инверторов на 5% (рис.3) при той же полной (каждущейся) мощности. Если будет производиться полная компенсация реактивной мощности [3], то после установки статических конденсаторных батарей высвобождается резерв мощности, которая позволит подключить дополнительную нагрузку без увеличения мощности трёхфазного силового трансформатора.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что мероприятие по установке дополнительной КРМ в точке подключения РГ позволит увеличить выход активной энергии ФЭС, снизить потери активной электроэнергии в распределительных электрических сетях, а также при полной компенсации реактивной мощности (рис.8) появляется резервная мощность трансформатора для подключения дополнительной нагрузки.

Кроме этого, применение программного комплекса ЕТАР даёт возможность создания цифровых моделей (цифровых двойником) электрических сетей реальных объектов.

### Литература

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчётов. - М: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Ефремов В.М., Беляевский Р.В. О влияния перетоков реактивной мощности на параметры систем электроснабжения промышленных предприятий. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 3(84). -с. 60- 63.
3. Овсейчук. В, Трофимов. Г и др. Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности // Журнал Новости электротехники 2008. -№4(52).
4. Xingmin Li, Hongwei Li, Shuaibing Li, Ziwei Jiang, Xiping Ma. Review on Reactive Power and Voltage Optimization of Active Distribution Network with Renewable Distributed Generation and Time-Varying Loads. Mathematical Problems in Engineering/2021. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/1196369/>.

*Представлено Национальным научно-исследовательским  
институтом возобновляемых источников энергии  
при Министерстве энергетики Республики Узбекистан*

УДК 622.6.002.5

**ЯНГИ ЭЛЕКТР МОТОР АСОСИДА ШАХТА ЎЗИЮРАР ВАГОНИ ТОРТИШ  
КЎРСАТКИЧЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ****А.Л. Ҳақбердиев, Ф.Н. Тўйчиев**

Уибу мақолада мураккаб технологик шароитли ер ости конларида ишилтиладиган шахта ўзиорар вагонлари юриши қисми учун янги яратилган электр мотори билан жиҳозланган электр юритма томонидан гидиракларда ҳосил бўладиган тортиши кўрсаткичлари тадқиқ қилинган. Бунга кўра юриши қисмининг кинематик схемаси асосида *SimulationX* дастури ёрдамида имитацион модели яратилган. Уибу яратилган имитацион модел ёрдамида ўзиорар вагоннинг ҳаракатига таъсир этувчи қаршилик кучлари ва ҳаракатланиши тезлиги, шунингдек электр моторини ишга тушириши моментларини вақт бўйича ўзгартириши графиклари олинган. Уибу модел ёрдамида максимал қиялик бурчаги аниқланди: икки тезликли асинхрон моторнинг кичик тезлиги (500 айл/мин) учун  $16^\circ$ , катта тезлиги (1000 айл/мин) учун  $9^\circ$  ни ташкил этди. Шахта йўли қиялиги  $\alpha=15^\circ$  бўлганда максимал тортиши кучи 102,2 кН ташкил этади. Шахта йўли қиялиги  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $9^\circ$  бўлганда вагоннинг электр юритмасидаги икки тезликли асинхрон моторнинг кичик тезликтан катта тезлика ўзгартирганда моменти ва ҳаракат тезлигининг ўзгариши келтирилган.

**Калим сўзлар:** шахта ўзиорар вагонлар, юриши қисми, тортиши кўрсаткичлари, тортиши кучи, қутблари ўзгарувчан чулгам, икки тезликли асинхрон моторлар, қиялик бурчаги.

В статье приведены результаты исследований показателей электроприводов колес шахтных самоходных вагонов, оснащенных новыми электрическими моторами, применяемыми в подземных шахтах со сложными горнотехнологическими условиями. В связи с этим, при помощи программы *SimulationX* разработана имитационная модель на основе кинематической схемы ходовой части. По созданной имитационной модели были получены графики изменений силы сопротивлений и скорости движения, а также пусковых моментов по времени, влияющие на движение шахтных самоходных вагонов. С помощью данной модели были определены максимальные углы наклона: для малой скорости вращения асинхронного двухскоростного двигателя (500 об/мин) -  $16^\circ$ , для большей скорости вращения (1000 об/мин) -  $9^\circ$ . При угле наклона шахты  $\alpha=15^\circ$  максимальная тяговая сила составляла 102,2 кН. Приведены результаты изменений момента асинхронного двигателя и скорости движения вагона при переключении с меньшей скорости на большую для наклонов шахтной дороги  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $9^\circ$ .

**Ключевые слова:** шахтные самоходные вагоны, ходовая часть, тяговые показатели, тяговая сила, полюсопереключаемая обмотка, двухскоростные асинхронные двигатели, угол наклона.

*In this state, the results of the study show that the driving and electric wheels of the mine self-propelled wagons are equipped with new electric motors, and the mining and technological conditions of the underground mines are similar. In this system, with the help of the SimulationX program, the simulation model is developed and the basic kinematic scheme is used. With the help of an artificial simulation model, the obtained graph changes the resistance and speed of the engine, as well as the starting moments and time, which controls the engine of self-propelled mine cars. And also using this model, the maximum angle of inclination was determined: for low rotation speed of an asynchronous two-speed motor (500 rpm) - 16°, for high rotation speed (1000 rpm) - 9°. When the shaft is inclined at  $\alpha=15^\circ$ , the maximum thrust force is 102,2 kN. The results of the change in the torque of the asynchronous motor and the speed of the motor car when switching with the mental speed and the slope of the mine road are 0°, 5°, 9°.*

**Key words:** self-propelled mine cars, chassis, traction performance, traction force, pole-changing winding, two-speed asynchronous motors, tilt angle.

**Кириш.** Республикаездаги Тюбегатан калий конида лаҳим ўтиш комбайнлари билан қазиб олинган тоғ жинсини руда туширгичга ёки түгридан – түгри тасмали конвейерлар бункерларига ташишда пневмошинали 5ВС-15М русумли шахта ўзиорар вагонлари (ШЎВ) қўлланилади. Бу ШЎВ лаҳим ўтувчи ва лаҳим ўтиб-қазиб олувчи “Урал-10А” ёки ”Урал-20Р” русумдаги планетар-дискли ишчи органига эга бўлган комбайнлар билан ҳамда “БП-14М” русумдаги бункер-қайта юклагичлар билан биргаликда қўлланилади [1-6].

5ВС-15М турдаги ШЎВ ларини ишлатиш тажрибаси шуни кўрсатадики, эгри чизиқли йўлларнинг мавжудлиги ШЎВ ва бутун комплекснинг иш унумдорлигига салбий таъсир кўрсатади. Эгри чизиқли йўлларда ва ер ости лаҳимлари бирлашмаларида ҳаракатланишда бундай ШЎВ ларининг манёвр қобилиятининг етарли эмаслиги натижасида ҳаракатланиш тезлигини кескин камайтириш (1,5 мартаға) зарурати пайдо бўлади. Шунинг учун шахта ШЎВ лари иш унудорлигини оширишнинг йўлларидан бири унинг ишлатишда ўртacha ҳаракатланиш тезлигини ошириш бўлиб, буни ШЎВ ларининг юритиш қисми электр юритмасини конструктив параметрлари ва структурасини танлаш асосида, уларнинг манёврланиш ва бошқариш қобилиятларини ошириш ҳисобига эришилади [1-6].

Статистикага кўра, ШЎВ ларидаги носозликларнинг 51% юритиш қисми электромеханик тизимиға тўғри келади, шундан 35,3% фидирлак юритмалари ва кўприклариға, 10,5% редукторларнинг тишли узатмалариға ва подшипниклариға, тормозлаш колодкалари ҳамда электр моторларига, 5,2% эса контакт аппаратлариға тўғри келади [7, 8].

ШЎВ нинг техник ва иқтисодий кўрсаткичларини ошириш ва электр энергиясини тежаш мақсадида юритиш қисмидаги мавжуд тортиш электр моторларини энергетик кўрсаткичлари анча юқори бўлган электр мотор билан алмаштириш зарурлиги намоён бўлмоқда.

**Асосий қисм.** Шахта ўзиорар вагони (ШЎВ) тортиш кўрсатгичларининг тадқиқ килиш учун ШЎВ нинг юриш қисми юритмасини моделлаштиришда ўзиорар

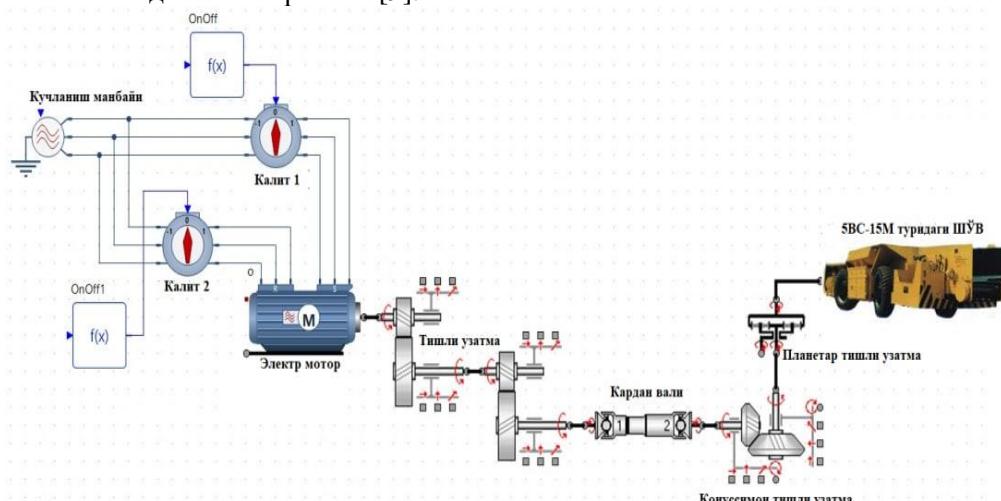
вагоннинг ҳаракатига таъсир этувчи қаршилик кучларини математик ифодаларидан фойдаланилади [8, 9].

## Йўлдан ҳосил бўладиган қаршилик кучлари йифидиси

$$P_y = P_f \pm P_h = G_v(f \cos \alpha \pm \sin \alpha), \quad (1)$$

бу ерда  $P_h = G_v \cdot i$  - қияликтан ҳосил бўлувчи қаршилик кучи,  $P_f = G_v \cdot f \cdot \cos\alpha$  - айланишга қаршилик кучи, кг·к (+ ишораси ҳаракат қияликка, - ишораси ҳаракат нишабликка бўлганда қўйилади);  $G_v$  - юкланган ШЎВ нинг тўла оғирлиги, кг·к;  $f \cdot \cos\alpha \pm \sin\alpha$  ифодаси эса йўлдан ҳосил бўладиган йиғинди қаршилик коэффициенти ўдеб аталали.

Шахта ўзиюар вагони (ШЎВ) юриш қисмидаги янги яратилган электр мотори томонидан ғилдиракларда ҳосил бўладиган тортиш кўрсаткичларини тадқиқ қилиш учун, юриш қисмининг кинематик схемаси асосида *SimulationX* дастури ёрдамида имитацион модели яратилди. 1-расмда *SimulationX* дастури асосида ШЎВ юриш қисмининг модели келтирилган [9].



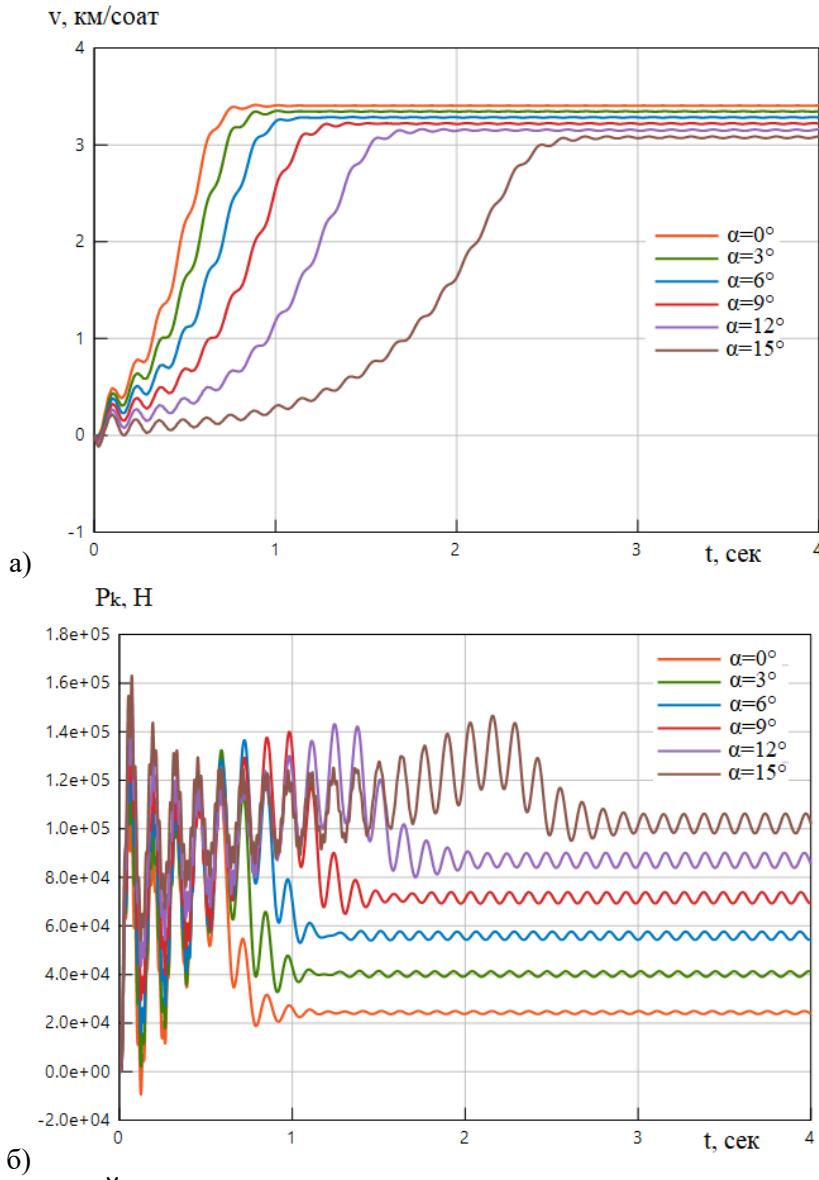
Конкурсная типография

ШÜВ электр юритмасини қуввати 55/26 кВт га тенг бўлган қутблар сони ўзгарувчан чулғам (ҚСҮЧ) ли иккита икки тезликли асинхрон мотор ёрдамида ҳаракатга келтирилади. Маълумки, Тюбегатан калий кони мураккраб кон-техник шароитга эга хисобланиб, ШÜВ юриш йўлининг қиялиги  $15\text{--}16^\circ$  гача етиши мумкин. Ушбу модел ёрдамида максимал қиялик бурчаги аниқланди: икки тезликли асинхрон моторнинг кичик тезлиги (500 айл/мин) учун  $16^\circ$ , катта тезлиги (1000 айл/мин) учун  $9^\circ$  ни ташкил этди [10-12].

Имитацион модел ёрдамида шахта йўли қиялиги  $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ$  бўлган мураккаб кон шароитида умумий оғирлиги 31 тонна бўлган ШЎВ нинг тезлиги ва тортиш кучи тадқиқ қилинди. ШЎВ тезлиги  $v=3\div3,4$  км/соат ораликда ўзгарди, ушбу тезликка эришиш вакти, яъни ўтқинч жараён вакти эса  $t=0,8\div2,7$  с ни ташкил этди.

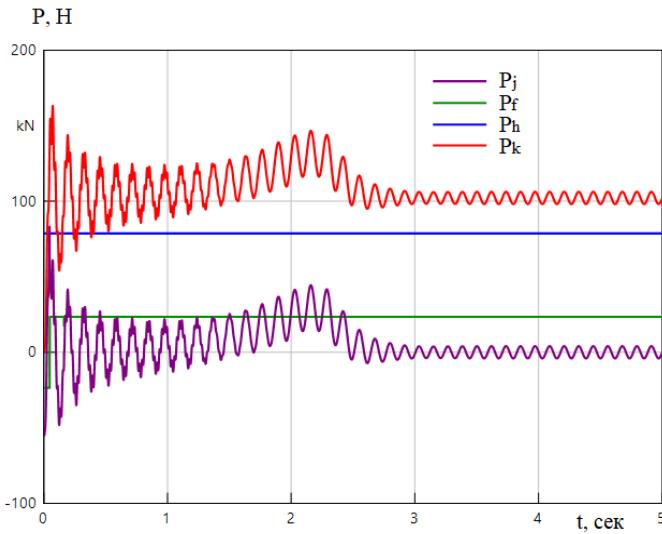
## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ШЎВ ҳаракати давомида етакловчи ғилдираклардаги тортиш қучи  $P_k=23\div105$  кН оралиқда үзгарди (2-расм).

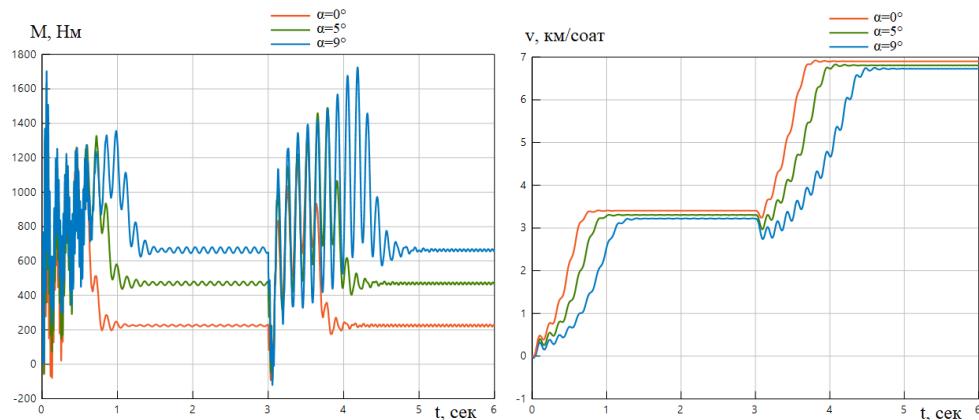


2-расм. ШЎВ юриш қисми характеристикаси: а) тезлик, б) тортувчи куч

ШЎВ ҳаракатланғанда унга бир нечта қаршилик күчлари таъсир этади, буларға киялиқ қаршилиғи ( $P_h$ ), айланишга қаршилиқ ( $P_f$ ), инерсия қаршилиғи ( $P_j$ ) ва ҳавонинг қаршилиғи ( $P_{хаво}$ ). Ҳавони қаршилиқ қучи қолған қаршилик күчларига нисбатан жуда кичик бўлғанлиги сабабли ҳисобга олинмайди.

3-расм.  $\alpha=15^\circ$  бўлганда ШЎВ қаршилик кучларини ўзгариши

3-расмда шахта йўли қиялиги  $\alpha=15^\circ$  бўлганда ШЎВ ҳаракатига таъсир этувчи қаршилик кучларини ўзгариши келтирилган. Ўткинчи жараён вақти  $t=2,7$  сек давом этади, буларга қиялиқ қаршилиги  $P_h=78,7$  кН, айланишга қаршилик кучи  $P_f=23,5$  кН, тортиш кучи  $P_k=102,2$  кН га teng бўлади.

4-расм. ШЎВ электр моторини  $p=6$  (500 айл/мин) томонда ишга туширилиб  $p=3$  (1000 айл/мин) томонга ўзгартирганда момент ва тезликни ўзгариш графиги

4-расмда шахта йўли қиялиги  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $9^\circ$  бўлганда ШЎВ электр юритмасидаги икки тезликли асинхрон моторнинг кичик тезлиқдан катта тезликка ўзгартирганда электр моторнинг моменти (4.а-расм) ва ШЎВ ҳаракат тезлигининг ўзгариш эгри чизиқлари (4.б-расм) кўрсатилган. Бунда электр моторнинг моменти мос ҳолда 230,

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

470, 660 Нм, ШЎВ кичик тезлиқда ҳаракатланғанда унинг тезлиги  $v=3,2, 3,3, 3,4$  км/соат, катта тезлиқда ҳаракатланғанда эса унинг тезлиги  $v=6,7, 6,8, 6,9$  км/соат ни ташкил этади. ШЎВ кичик тезлик билан ишга туширилғанда ўткинчи жараён вақти  $t=0,7-1,2$  с, катта тезлик билан ишга туширилғанда эса ўткинчи жараён вақти  $t=0,8-1,5$  с ни ташкил этади.

**Хулоса.** Шахта ўзиорар вагони тортиш кўрсаткичларини тадқиқ қилиш учун, юриш қисмининг кинематик схемаси асосида SimulationX дастури ёрдамида имитацион модели яратилди. Ушбу яратилган имитацион модел ёрдамида ўзиорар вагоннинг ҳаракатига таъсир этувчи қаршилик кучлари ва ҳаракатланиш тезлиги, шунингдек электр моторини ишга тушириш моментларини вақт бўйича ўзгартириш графиклари олинди. ШЎВ тезлиги  $v=3\div3,4$  км/соат оралиқда ўзгарда, ушбу тезликка эришиш вақти, яъни ўткинчи жараён вақти эса  $t=0,8\div2,7$  с ни ташкил этди. ШЎВ ҳаракати давомида етакловчи филдираклардаги тортиш кучи  $P_k=23\div105$  кН оралиқда ўзгариши аниқланган.

### Адабиёт

1. Тошов Ж.Б., Рисмухамедов Д.А., Тўйчиев Ф.Н., Ҳакбердиев А.Л. Экспериментальное исследование динамических режимов работы электрических моторов ходовой части шахтных самоходных вагонов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. - 2022, №3(96), С. 1-6.
2. Haqberdiev A.L, Toshov J.B. Analysis of the control system of electric motors of the running gear of self-propelled mine cars used in complex mining and technological conditions. E3S Web of Conferences 216, 01135 (2020) RSES 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601135>.
3. Тошов Ж.Б., Рисмухамедов Д.А., Тўйчиев Ф.Н., Ҳақбердиев А.Л. Кутблар сони ўзгарувчан икки тезликли электр моторларнинг динамик иш режимларини экспериментал тадқиқ қилиш // “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари” илмий журнал.– Тошкент, 2022. – №2. – 108-115 б.
4. Tuychiev F.N., Haqberdiev A.L. Development of two-speed asynchronous electric motors for the undercarriage of mine self-propelled cars. E3S Web of Conferences 384, 01044 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401044>.
5. Бобоҷонов М.Қ., Рисмухамедов Д.А. Тўйчиев Ф.Н., Ҳақбердиев А.Л. Шахта ўзиорар вагонлари учун икки тезликли янги АВТМ15-6/12 типидаги электр моторни лойиҳалаш // Ҳалқаро илмий-техник анжуман. «Автоматлаштирилган электр механик ва электр технологик тизимларнинг энергия самарадорлигини оширишнинг долзарб масалалари». – Тошкент, 2022. – 132-135 б.
6. Рисмухамедов Д.А. Тўйчиев Ф.Н., Ҳақбердиев А.Л. Шахта ўзиорар вагонлари электр юритмаси учун кутблар сони ўзгарувчан чулғам ишлаб чиқиши // “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари” журнали. – Тошкент, 2021. – 204-212 б.

7. Ҳақбердиев А.Л. Ер ости кон ишларида ўзиорар вагонлар электр моторларининг ишдан чиқиши сабаблари ва уларни бартараф этиш чоралари // “Ўзбекистон кончилик хабарномаси” журнали. –Навоий, 2015.–№2. – 77÷78 б.
8. Серегин И.Н. Определение оптимальных параметров электромеханической системы ходовой части шахтного самоходного вагона: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06.– Тула, 2000. – 145 с.
9. Ҳақбердиев А.Л. Мураккаб технологик шароитлар учун шахта ўзиорар вагони юриш қисмининг электромеханик тизимини такомиллаштириш. Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация иши – Тошкент, 2023. – 101 б.
10. Тошов Ж.Б., Рисмухамедов Д.А., Тўйчиев Ф.Н., Ҳақбердиев А.Л. Қутблар сони ўзгарувчан икки тезликли электр моторларининг динамик иш режимларини экспериментал тадқиқ қилиш. “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари” илмий журнал. №2. – Тошкент 2022. 108-115 б.
11. Тошов Ж.Б., Тўйчиев Ф.Н., Ҳақбердиев А.Л. Шахта ўзиорар вагони юриш қисми электр юритмаси учун яратилган икки тезликли электр моторни ишчи ва механик хусусиятларини экспериментал тадқиқ қилиш. Халқаро илмий-техник анжуман. «Автоматлаштирилган электр механик ва электр технологик тизимларнинг энергия самараадорлигини оширишнинг долзарб масалалари».– Тошкент, 2022 й. 108-112 б.
12. Тўйчиев Ф.Н., Ҳақбердиев А.Л., Рахимов А.В., Темиров К.М. Шахта ўзиорар вагони юриш қисми электр юритмасини моделлаштириш. Халқаро илмий-техник анжуман. «Зарафшон воҳасини комплекс инновацион ривожлантириш ютуқлари, муаммолари ва истиқболари халқаро илмий- амалий анжуман». – Навоий, 2022 й. 316-320 б.

*Тошкент давлат техника университети  
томонидан тақдим этилган*

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

А.И. Анарбаев, Х.С. Исаходжаев, А.Н. Каракулов, М.А. Короли

Биогаз энергиясидан фойдаланиши технологиясининг энергия самарадорлигини оширишининг муқобил усуллари кўриб чиқлади. Биогаздан самарали фойдаланиши, кейинчалик уни иситиш ва электр энергияси ишлаб чиқарши учун ёқилги сифатида ишлатишнинг комплекс муаммолари ҳам кўриб чиқлади. Иссиқлик насосларидан фойдаланиши технологик схеманинг умумий энергия самарадорлигини ошириши имконини беради. Қаттиқ майи чиқиндиларни полигонларда сақлаш хавфи, хусусан, органик моддаларни биокимёвий йўқ қилиш пайтида ҳосил бўлган биогазнинг атмосферага назоратсиз эмиссияси билан боғлиқ. Биогазни қазиб олиш ва утилизация қилишининг технологик жараёнини ташикил этиши бу муаммони ҳал қиласи. Мақолада органик субстратларни анаеробик қайта ишлаш учун қурилмаларнинг энергия балансининг асосий боғлиқларни келтирилган. Гунгни анаероб қайта ишлаш биореакторининг иссиқлик таъминоти тизимида компрессор иссиқлик насоси ёрдамида уларни анаероб-аеробик тозалашига асосланган гўнг оқава сувларини тозалаши тизимининг технологик схемаси ва ишлаш тартиби кўрсатилган.

**Калим сўзлар:** компрессор иссиқлик насоси, биогаз қурилмаси, иссиқликни қайта тозлаш, гўнгни аеробик тозалаши.

Рассматриваются альтернативные способы повышения энергетической эффективности технологии утилизации биогазовой энергии. Также рассматриваются комплексные проблемы эффективной утилизации биогаза на полигонах и использования его в качестве топлива для теплофикации и получения электрической энергии. Применение тепловых насосов позволяет повысить общую энергетическую эффективность технологической схемы. Опасность при хранении твердых бытовых отходов связана, в частности, с неконтролируемой эмиссией в атмосферу биогаза, генерируемого при биохимической деструкции органического вещества. Организация технологического процесса добычи и утилизации биогаза позволит решить эту проблему. В статье приведены основные зависимости энергетического баланса установок для анаэробной обработки органических субстратов. Показаны технологическая схема и порядок работы системы очистки навозных стоков на основе их анаэробно-аэробной обработки с использованием компрессионного теплового насоса в системе теплоснабжения установки для анаэробного сбраживания.

**Ключевые слова:** компрессионный тепловой насос, биогазовая установка, рекуперация теплоты, аэробная обработка навозных стоков.

*In this article alternative ways of increasing the energy efficiency of biogas energy utilization technology are considered. The complex problems of efficient utilization of biogas at landfills and its subsequent use as a fuel for heating and generating electricity are also considered. The use of heat pumps makes it possible to increase the overall energy efficiency of the technological scheme. The danger during the storage of solid waste at landfills is associated, in particular, with the uncontrolled emission of biogas into the atmosphere, generated during the biochemical destruction of organic matter. The organization of the technological process of extraction and utilization of biogas will solve this problem. The article presents the main dependences of the energy balance of installations for anaerobic treatment of organic substrates. Shown technological diagram and operating procedure of systems for treatment of manure based on its anaerobic-aerobic treatment using compression heat pump in heating system of installation for anaerobic digestion.*

**Key words:** compression heat pump, biogas installation, heat recovery, aerobic treatment of liquid manure.

Несмотря на положительные стороны анаэробной обработки органических отходов, она имеет существенный недостаток – для обеспечения температурного режима в биогазовой установке (БГУ) требуется значительное количество выработанного биогаза (до 60%).

Одним из способов повышения энергетической эффективности биогазовых установок является использование тепловых насосов для рекуперации теплоты исходного навоза в системе теплоснабжения [1,2].

Весь выработанный биогаз используется в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) для привода воздуховодки аэротенка и компрессора теплового насоса.

Теплота из блока утилизации теплоты от ДВС в зимний период (с декабря по февраль включительно) используется для компенсации теплопотерь через ограждающие поверхности биореактора (компрессионный тепловой насос работает только на предварительный нагрев субстрата в реакторе БГУ), а в летний период – для нужд потребителей [3,4].

Для повышения эффективности биогазовой установки рассматривается система очистки органических отходов с применением компрессионного теплового насоса в качестве средства рекуперации теплоты исходного навоза. Схема системы очистки навозных стоков приведена на рис.1.

Система очистки навозных стоков состоит из емкости предварительного нагрева, в котором смонтирован теплообменник; анаэробного биореактора с внутренним теплообменником для поддержания температурного режима сбраживания и выгрузными устройствами, которые связаны с отстойником исходного навоза. В отстойнике исходного навоза смонтирован теплообменник для отбора тепловой энергии от него.

Осветленная фракция из отстойника исходного навоза поступает в аэротенк для последующей очистки, и далее в отстойник. В отстойнике осветленная фракция после аэрации разделяется на очищенную жидкость и избыточный ил [5], который

направляется в емкость предварительного нагрева и после смешивания с исходным субстратом направляется в анаэробный реактор.

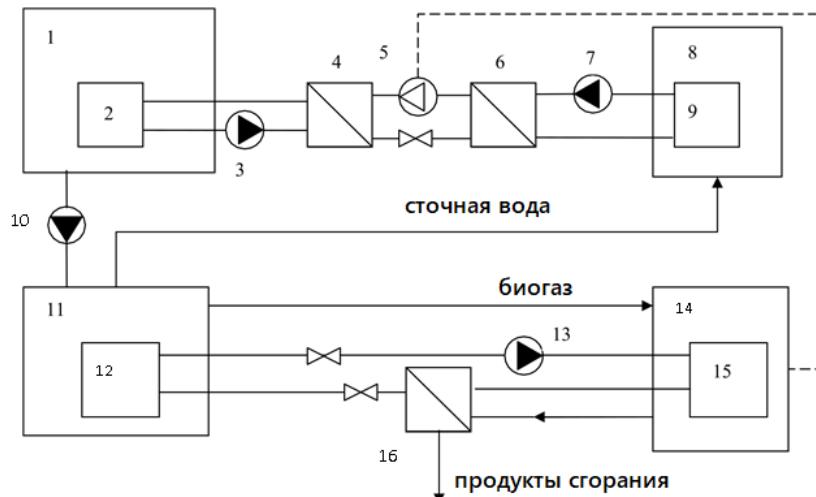


Рис.1. Технологическая схема системы очистки навозных стоков: 1 - емкости предварительного нагрева; 2 – нагреватель в баке; 3 - циркуляционный насос; 4 - конденсаторы теплового насоса; 5 - компрессоры тепловых насосов; 6 - испарители теплового насоса; 7 - водяной циркуляционный насос; 8 - резервуар для сточных вод; 9 - теплообменник в резервуаре сточных вод; 10 – насос фекалий; 11 - метантенк; 12 - утилизация тепла в устройстве разложения; 14 — двигатель внутреннего сгорания; 15 – радиатор охлаждения двигателя внутреннего сгорания; 16 – экономайзер

Теплообменник, расположенный в отстойнике исходного навоза, посредством трубопроводов соединен с испарителем теплового насоса. В испарителе теплового насоса происходит теплообмен между подготовленной водой и низкопотенциальным хладагентом, который после повышения энергетического потенциала в компрессоре теплового насоса направляется в конденсатор теплового насоса [6]. Теплообменник, расположенный в емкости предварительного нагрева, посредством трубопроводов соединен с конденсатором теплового насоса.

В конденсаторе теплового насоса происходит теплообмен между высокопотенциальным хладагентом и подготовленной водой [7], которая затем направляется в теплообменник, расположенный в емкости предварительного нагрева, где происходит теплообмен между подготовленной водой и полученным субстратом после выделения биогаза, в результате чего субстрат нагревается до рабочей температуры процесса сбраживания и подается в анаэробный биореактор [8, 9].

Весь выработанный биогаз используется в ДВС для привода воздуходувки аэротенка и компрессора теплового насоса [10,11].

Основным аппаратом схемы является метантенк, поэтому приведем подробный расчет его тепловой эффективности. Для этого определяем площадь поверхности метантенка с плоским покрытием [12]:

$$S_p = 2\pi r \cdot h + \pi r^2; \quad (1)$$

где  $r$  – радиус метантенка ( $r=3,5$  м);  $h$  - высота метантенка ( $h=7,5$  м).

Установлен коэффициент теплопередачи субстрата в воздух  $k_p = 0,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и теплоемкость субстрата  $c_p = 4098$  Дж/(кг·К). Показатель скорости охлаждения органического субстрата  $m$  [13]:

$$m = S_p k_p \tau_p / G_p c_p; \quad (2)$$

где  $G_p$  – масса субстрата в метантенке ( $G_p = 250000$  кг);  $\tau_p$  — продолжительность нагревания субстрата в метантенке ( $\tau_p = 864\ 000$  с).

Время, необходимое для нагрева субстрата от начальной температуры до требуемой температуры в метантенке [14], секунд:

$$\tau_{\text{подогрев}} = \frac{Q_{\text{под}}^{\text{н}}}{(i_{\text{в}}^{70} - i_{\text{в}}^{50}) g_{\text{вод}} - q_{\text{пот}}}; \quad (3)$$

где  $g_{\text{вод}}$  – расход сетевой воды в подогревателе метантенка ( $g_{\text{вод}} = 1,1$  кг/с для традиционной биогазовой установки;  $g_{\text{вод}} = 0,23$  кг/с для БГУ с утилизацией тепла) [15];  $i_{\text{в}}^{70}$  - энталпия сетевой воды при  $t_{\text{в}} = 70^{\circ}\text{C}$  ( $i_{\text{в}}^{70} = 293$  кДж/кг);  $i_{\text{в}}^{50}$  - энталпия сетевой воды при  $t_{\text{в}} = 50^{\circ}\text{C}$  ( $i_{\text{в}}^{50} = 209,6$  кДж/кг) [12].

При нагреве субстрата определяем среднее количество теплоты, переданное ей в единицу времени [16], кВт:

$$q_{\text{под1}} = \frac{Q_{\text{под}}^{\text{н}}}{\tau_{\text{подогрев}}} + q_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Термическая эффективность поглотителя [17]:

$$\eta_{\text{м}} = \frac{(q_{\text{под1}} - q_{\text{пот}})}{q_{\text{под1}}}. \quad (5)$$

В традиционной схеме общий тепловой КПД равен КПД сбраживания [18].

Тепловой КПД биогазовой установки с утилизацией отбросной теплоты отходов определяется по следующей формуле [19]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{от}}}{Q_{\text{пп}} + Q_{\text{эк}}}; \quad (6)$$

где  $Q_{\text{от}}$  - подводимая теплота к котлу со сточными водами, кВт;  $Q_{\text{пп}}$  - теплота, вводимая нагретым субстратом из бака предварительного нагрева, кВт;  $Q_{\text{эк}}$  - теплота, подводимая с горячей водой из экономайзера, кВт.

В биогазовой установке утилизация теплоты, нагрев сетевой воды, охлаждение продуктов сгорания и утилизация теплоты исходного навоза тепловым насосом имеют положительный технологический эффект.

**Выводы.** С целью повышения энергоэффективности биогазовой установки предложена технологическая схема утилизации сбросного тепла тепловым насосом, позволяющая использовать биогазовые установки в регионах с низкой среднегодовой температурой окружающего воздуха [20].

Тепловой КПД традиционной биогазовой установки составил 39 %, а биогазовой установки с рекуперацией отработанного тепла — 46 %. Следует отметить, что использование вторичных энергоресурсов при производстве биогаза позволяет полностью покрыть их энергетические потребности в теплоте в холодное время года.

### Литература

1. Анарбаев А.И., Захидов Р.А., Қарақулов А.Н. Использование тепловых насосов в теплоснабжении при добыче и утилизации биогаза на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) //Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». 2022 -№3.
2. Раджендран К., Асланзаде С., Тагерзаде М.Ж. Бытовые биогазовые установки — обзор, /Энергия, 2012, том 5, -№ 8. -С. 2911–2942.
3. Krakat, A. Westphal, S. Schmidt, and P. Scherer, “Anaerobic digestion of renewable biomass: thermophilic temperature governs methanogen population dynamics,” *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 76, no. 6, pp. 1842–1850, 2010.
4. J. Lundgren, R. Hermansson, and J. Dahl, “Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, no. 5, pp. 443–453, 2004.
5. T. Zhang, Y. Tan, and X. Zhang, “Using a hybrid heating system to increase the biogas production of household digesters in cold areas of China: an experimental study,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, pp. 1299–1311, 2016.
6. R. Feng, J. Li, T. Dong, and X. Li, “Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 519–526, 2016.
7. A. A. M. Hassanein, L. Qiu, P. Junting, G. Yihong, F. Witarsa, and A. A. Hassanain, “Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy,” *Ecological Engineering*, vol. 82, pp. 336–344, 2015.
8. H. Shi, T. Wang, H. Zhu, Y. Li, L. Rong, and X. Pei, “Heating system of biogas digester by ground-source heat pump,” *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 26, pp. 268–273, 2010. View at: Google Scholar.
9. J. Liu, W. Li, Z. Chen, and W. Sha, “Heating mode of biogas plant in alpine region based on underground water source heat pump,” *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 29, pp. 163–169, 2013. View at: Google Scholar.
10. S. Tiwari, J. Bhatti, G. N. Tiwari, and I. M. al-Helal, “Thermal modelling of photovoltaic thermal (PVT) integrated greenhouse system for biogas heating,” *Solar Energy*, vol. 136, pp. 639–649, 2016.
11. N. Curry and P. Pillay, “Integrating solar energy into an urban small-scale anaerobic digester for improved performance,” *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 280–293, 2015.
12. S.-J. Cao, X.-R. Kong, Y. Deng, W. Zhang, L. Yang, and Z.-P. Ye, “Investigation on thermal performance of steel heat exchanger for ground source heat pump systems using

full-scale experiments and numerical simulations,” Applied Thermal Engineering, vol. 115, pp. 91–98, 2017.

13.G. D. Qin, P. Lou, and X. L. Wu, “Study on warming parallel system with solar energy, air source heat pump and electric heat of biogas fermentation,” Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, vol. 35, pp. 187–194, 2014. View at: Google Scholar.

14.P. Guo, R. J. Ma, and N. Y. Yu, “Operation mode of solar and untreated sewage source heat pump system for heating biogas digester,” Journal of Southwest Jiaotong University, vol. 53, pp. 1087–1094, 2018. View at: Google Scholar.

15.X. M. Pei, H. X. S. Di Zhang, H. G. Zhu, Y. Lei, and Z. Wang, “Collector area optimization of integrated solar and ground source heat pump system for heating biogas digester,” Nongye Jixie Xuebao= Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, vol. 42, pp. 122–128, 2011. View at: Google Scholar.

16.H. X. Shi, D. T. Xu, H. G. Zhu, Y. L. Zhang, X. Z. Meng, and C. C. Guo, “TRNSYS simulation of integrated solar and ground source heat pump for biogas digester heating system,” Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, vol. 48, pp. 288–295, 2017. View at: Google Scholar.

17.J. Kim, H.-J. Choi, and K. C. Kim, “A combined dual hot-gas bypass defrosting method with accumulator heater for an air-to-air heat pump in cold region,” Applied Energy, vol. 147, pp. 344–352, 2015.

18.P. Guo, J. Zhou, R. Ma, N. Yu, and Y. Yuan, “Biogas production and heat transfer performance of a multiphase flow digester,” Energies, vol. 12, No. 10, p. 1960, 2019.

19.Y. Liu, Y. Chen, Y. Zhou, D. Wang, Y. Wang, and D. Wang, “Experimental research on the thermal performance of PEX helical coil pipes for heating the biogas digester,” Applied Thermal Engineering, vol. 147, pp. 167–176, 2019.

20.F. Dong and J. Lu, “Using solar energy to enhance biogas production from livestock residue - A case study of the Tongren biogas engineering pig farm in South China,” Energy, vol. 57, pp. 759–765, 2013.

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом и Институтом проблем энергетики РУз*

УДК 697.97:628.83

**АЙЛАНУВЧИ РЕГЕНЕРАТИВ ИССИҚЛИК АЛМАШТИРГИЧ АЙЛАНИШ  
ЧАСТОТАСИНИ ИССИҚЛИК БЕРИШ КОЭФФИЦИЕНТИГА ТАЪСИРИНИ  
ҮРГАНИШ**

**Х.М. Муратов, Н.О. Усмонов, Ж.Ю. Усмонов**

Регенератив иссиқликтар алмаштиргичлар микроиқлимни ҳосил қилиши тизимларида, газ турбиналари, қозонхоналар ва бошқа юқори ҳароратда ишлайдиган саноат қурилмаларида кенг қўлланилади. Ушбу иссиқликтар алмаштиргичлар газларни совитиш ва иситиш ҳамда намлаш ва қуритиш, юқори потенциалли иссиқликтар ташувчиларнинг иссиқлигини ўзлаштириши учун фойдаланилади. Бугунги кунда энергия истеъмолининг ўсиши ва энергия нархининг ошиши замонавий муҳандислик иншиотларини – турар-жой, савдо ва саноат обьектларини тенг равишда яратишда кенг кўламли энергия тежаси сиёсатини талаб қўлмоқда. Энергияни тежаси учун микроиқлим тизимларини лойиҳалаш ва яратишда иккиламчи энергия ресурсларидан фойдаланиши мақсадга мувофиқ, масалан, хонадан чиқариб юборилаётган ҳавонинг иссиқлиги. Анъанавий шамоллатиш тизимлари энергия ҳажми улар ишлатиладиган обьектнинг муҳандислик тизимлари умумий энергия ҳажмининг ўртача 50-80% ини ташкил этади. Ҳавони шамоллатиш ва мўътадиллаш тизимларида айланувчи регенератив иссиқликтаридан фойдаланиши нисбатан кам капитал маблаг билан тизимга иссиқликтарнинг 85% гача қайтарши имконини беради. Шу муносабат билан, бундай тизимларни тақомиллаштиришда иссиқликтар алмаштиргичларни ҳисоблаши, оптималлаштириши ва самарадорлигини оширишига катта эътибор берини керак. Шундай қилиб, бу иш ҳавони шамоллатиш ва мўътадиллаш тизимларида айланувчи регенератив иссиқликтар ўзлаштиргичлари самарадорлигини оширишдан иборат.

**Калим сўзлар:** айланувчи регенератив иссиқликтар, утилизатори, насадка, иссиқликтаридан иборат, иссиқликтарни берини, шамоллатиш

Регенеративные теплообменники нашли широкое применение в системах жизнеобеспечения, газотурбинных системах, котельных и других высокотемпературных промышленных установках. Данные теплообменники используются для охлаждения и нагрева, увлажнения и осушения газов, утилизации теплоты высокопотенциальных теплоносителей. На сегодняшний день возрастание энергопотребления и повышение цен на энергоносители требуют проведения масштабной энергосберегающей политики при создании современных инженерных сооружений – жилых, коммерческих и промышленных объектов. При проектировании и создании систем жизнеобеспечения, для экономии энергии, целесообразно использовать вторичные энергетические ресурсы, такие, как теплота удаляемого из помещения воздуха. Энергоемкость обычных вентиляционных систем в среднем составляет 50–80% от общей энергоемкости

инженерных систем объекта, на котором эксплуатируются. Использование вращающихся регенеративных теплоутилизаторов в системах вентиляции и кондиционирования воздуха позволяет возвращать в систему до 85% теплоты при сравнительно невысоких капитальныхложениях. В связи с этим, при совершенствовании таких систем значительное внимание необходимо уделить расчету, оптимизации и повышению эффективности теплообменных аппаратов. Таким образом, цель данной работы – повышение эффективности вращающихся регенеративных теплоутилизаторов в системах вентиляции и кондиционирования воздуха.

**Ключевые слова:** вращающийся регенеративный теплоутилизатор, насадка, теплопередающая поверхность, теплоотдача, вентиляция.

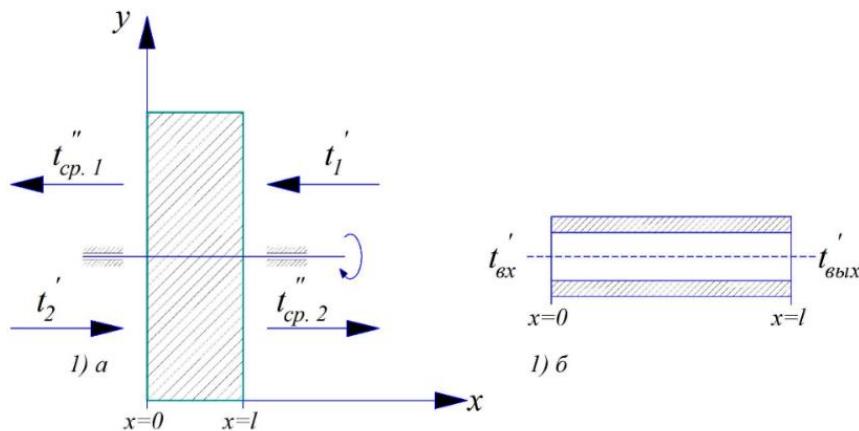
*Regenerative heat exchangers are widely used in life support systems, gas turbines, boilers and other high-temperature industrial installations. These heat exchangers are used for cooling and heating gases, humidification and dehumidification of gases, heat recovery from high-potential heat carriers. Today, the increase in energy consumption and the increase in energy prices require a large-scale energy-saving policy in the creation of modern engineering structures - residential, commercial and industrial facilities alike. When designing and creating life support systems to save energy, it is advisable to use secondary energy resources, such as, for example, the heat of the air removed from the room. The energy intensity of conventional ventilation systems is on average 50–80% of the total energy intensity of the engineering systems of the facility where they are operated. The use of rotating regenerative heat exchangers in ventilation and air conditioning systems makes it possible to return up to 85% of heat to the system at a relatively low capital investment. In this regard, when improving such systems, considerable attention should be paid to the calculation, optimization and increase in the efficiency of heat exchangers. Thus, this work is about increasing the efficiency of rotating regenerative heat exchangers in ventilation and air conditioning systems.*

**Key words:** rotating regenerative heat exchanger, packing, heat transfer surface, heat transfer, ventilation.

**Кириши.** Регенератив иссиқлик алмашинув қурилмалари йирик иссиқлик узатиши юзалағырақ әг бүлған насадканинг иссиқликни галма-гал жамғарып бориши ва қайтариб бериши билан тависфланади. Регенератив иссиқлик алмаштиргичлар чиқарып юборилаётган ҳавонинг иссиқлигини (баъзида совуқлигини) қайтариш учун фойдаланилади, уларни күйидаги турлари мавжуд: барқарор ўзгартыргичли, айланувчи насадкали ва айланадиган ҳаво тақсимлагичли камера [1÷3]. Насадкалар кўриниши барқарор иссиқлик алмаштиргичларда иссиқликни сингдириш режимидан ва уни қайтариб узатиши режимига галма-гал ўзгартыриш учун металл стружкалар, шағал ва пишиқ ғиштлардан тайёрланади [4÷6]. Ушбу қурилмаларнинг камчиликлари уларни катта ўлчамлари ва ўзгартырадиган ҳаво қопқоқларини керакли зичлигини таъминлаш мураккаб эканлиги хисобланади. Натижада, барқарор иссиқлик алмаштиргичлар ҳавони мўътадиллаш ва шамоллатиш тизимларида кенг

кўлланилмайди. Айланувчи регенератив иссиқлик алмаштиргичлар (АРИА) нисбатан кўпроқ кўлланилади.

Бугунги кунда ҳавони мўътадиллаш ва шамоллатиш тизимларида, одатда ҳаво-ҳаволи иссиқлик алмашинув қурилмаларинг бир неча намуналаридан фойдаланилади: айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичлари, пластинкасимон рекуператорлари, оралиқ иссиқлик ташувчи рекуператорлар ва иссиқлик трубалари.



1-расм. Насадкали айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичи (а) ва унинг канали кирқими (б)

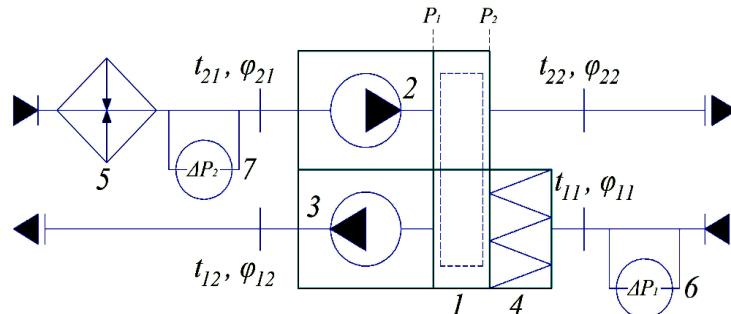
1-а – расмда айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичида иссиқлик ташувчиларнинг ҳаракат йўналишини кўрсатувчи насадка координата ўқларида кўрсатилган. Насадканинг бирламчи канали орқали ҳаво оқимини кўриб чиқамиз (1-б – расм). Насадка айланниш пайтида каналдаги иссиқлик алмашиниши жараёни умуман олган нобарқарор бўлади. Канал сирти ҳарорати насадка узунлиги бўйича ва вақт ўтиши билан ўзгариши [7÷10].

**Синов.** Тажрибанинг мақсади айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичнинг насадкаларидағи иссиқлик жараёнларини тадқиқ қилиш, ҳамда иссиқлик самарадорлигини баҳолаш ва унга таъсир қилувчи кўрсаткичларини аниқлаш имконини берувчи маълумотларни олиш, шунингдек, ўртacha иссиқлик бериш коэффициентларининг кийматларини олиш хисобланади.

Стенд АероМастер ХР04 (Чехиянинг Ремак фирмаси томонидан ишлаб чиқилган) блокли-тортувчи қурилмаси асосида ўрнатилган бўлиб, у сўрувчи (кирувчи) ва тортувчи (чикувчи) линияларда вентилятор, айланувчи регенератив иссиқли ўзлаштиргич ва ҳаво фильтри бўлимларини ўз ичига олади. Қурилманинг ҳаво йўллари тармоғига ўтишлар ёрдамида уланади. Синовдан ўтказилаётган стенд таркибига қуйидагилар киради: ВЛТ 2800 (Данфосс фирмаси) частота регуляторли ХПХР04 айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргич бўлими, кирувчи ва чикувчи йўлларида ҳаво вентиляторлари бўлими, кирувчи ҳаво йўлида фильтр ХРН0 04/К,

СВ-315/9,6 (Арктика фирмаси) электр иситгич, киравчи ва чиқувчи йўлларида ИРИС 315 ўлчаш диафрагмалари.

Синов тадқиқот ўтказиш учун стенд ишлаб чиқилган бўлиб, уни принципиал схемаси 2-расмда кўрсатилган.



2-расм. Тажриба-синов қурилмасининг принципиал схемаси

Вентилятор (2) томонидан хона ҳажми бўйлаб сўриб олинган ҳаво атмосферага чиқариб юборилади, чиқариб юборилаётган ҳаво каналлари электр иситгич (5) ёрдамида белгиланган ҳароратгача иситилади ва регенератив иссиқлик ўзлаштиргичга берилади (1). Хонадан сўриб олинаётган ҳаво регенератив иссиқлик ўзлаштиргичдан кейин, паст ҳароратда (иссиқлик алмашиниши хисобига) атмосферага чиқариб юборилади. Вентилятор (3) ёрдамида хонага берилаётган тоза ҳаво фильтрдан (4) ўтиб, иссиқлик ўзлаштиргичга берилади (1). Атмосферадан сўриб олинаётган ҳаво регенератив иссиқлик ўзлаштиргичда иссиқлик алмашинув хисобига иситилади ва хонага берилади. Иситгич кувватини бошқариш 5 босқичли TRN-D трансформаторидан фойдаланган ҳолда босқичма-босқич амалга оширилади.

Иссиқлик алмашинув насадкали айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичи (АРИЎ) диаметри 700 *мм* ва чукурлиги 200 *мм* бўлган цилиндр бўлиб, қалинлиги 0,09 *мм* бўлган силлик ва гофрировка қилинган ленталардан ташкил топган. Каналлар қирқими қадами 3,5 *мм* баландлиги 2 *мм*ли тенг томонли учбурчак кўринишида шаклланади.

Айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичнинг асосий геометрик таснифлари 1-жадвалда келтирилган. Барча насадкалар алюминийдан тайёрланган, насадка тури – мунтазамdir.

Ўрганилаётган АРИЎнинг иссиқлик самарадорлигини баҳолаш учун тажриба-синов маълумотлари олинди. АРИЎ насадкасининг самарадорлиги совуқ  $W_1$  ва иссиқ  $W_2$  ҳаво оқимларининг сув эквивалентларига боғлик, узатиш бирликлар сони  $NTU$  ва насадка айланниш частотаси  $\frac{W_1}{W_2}$  нисбат орқали ифодаланади. Тажриба-синов маълумотлар иссиқлик самарадорлиги  $E$  ни  $n \left( \frac{W_1}{W_2} \right)$  га боғлиқлиги кўринишида тақдим этилди.

Иссиқлик самарадорлик қийматлари қуидаги формула бўйича аниқланади.

## ТЕПЛО - И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

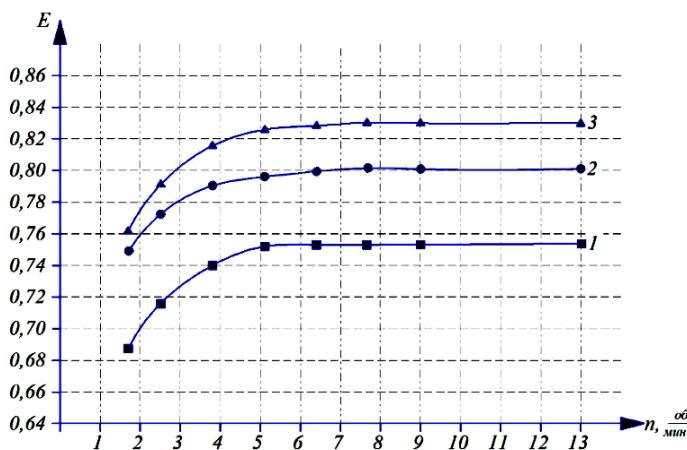
$$E = \frac{W_1 \cdot (t_{12} - t_{11})}{W_{\min} \cdot (t_{21} - t_{11})} = \frac{W_2 \cdot (t_{21} - t_{22})}{W_{\min} \cdot (t_{21} - t_{11})}. \quad (1)$$

1-жадвал

Айланувчи регенератив иссиқлик ўзлаштиргичнинг асосий геометрик таснифлари

№	Таснифлар	Қийматлар
1	Насадкалар жойлашган дискнинг диаметри	0,77 м
2	Насадка чукурлиги	0,2 м
3	Насадка фронталь қирқим юзаси	0,46543 м <sup>2</sup>
4	Насадка жонли қирқим юзаси	0,41656 м <sup>2</sup>
5	Нисбий жонли юзаси	0,895
6	Иссиқлик алмашинув юзаси	217,24 м <sup>2</sup>
7	Насадка ҳажми	0,09309 м <sup>3</sup>
8	Ихчамлилик күрсаткичи	2333,67 м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
9	Насадка оғирлиги	24,5 кг
10	Пластиинка қалинлиги	0,09 мм
11	Насадка баландлиги	2 мм
12	Насадка қадами	3,5 мм
13	Хисобланган эквивалент диаметр	1,534 мм

Насадка айланиш частотаси ўрганилаётган АРИЎнинг иссиқлик самарадорлигига таъсири тажриба-синов ёрдамида аниқланади. Насадка айланиш частотаси ошиши билан АРИЎнинг иссиқлик самарадорлиги асимптотик тарзда ўсади ва маълум бир қийматтага эришилганда самарадорлик деярли ўзгармайди. Шуни таъкидлаш керакки, айланиш частотасини ортиши ҳаво окимини ошишига олиб келади, бу АРИЎнинг иссиқлик самарадорлигига салбий таъсир қиласи, ишқаланадиган қисмларни эскиришига ва электр энегия истемолини ошишига олиб келади.



3-расм. АРИЎ иссиқлик самарадорлиги насадка айланиш частотасига боғлиқлиги

3-расмда ўрганилаётган АРИҮ иссиқлик самарадорлиги  $W_1$  ва  $W_2$  ифодалар билан турли ҳаво сарфида насадка айланиш частотасига боғлиқлиги келтирилган. Олинган маълумотларни таҳлил қилишдан қўриниб турибдики, насадка айланиш частотасининг оптимал қиймати 9 дан 13  $\frac{\text{аил}}{\text{мин}}$  оралиғида деб хисоблаш мумкин:

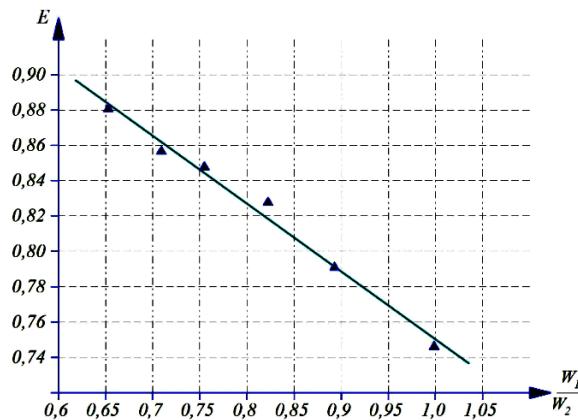
$$1. W_1 = 0,503 \frac{\text{кВт}}{\text{К}}, W_2 = 0,515 \frac{\text{кВт}}{\text{К}}, \frac{W_1}{W_2} = 0,97.$$

$$2. W_1 = 0,503 \frac{\text{кВт}}{\text{К}}, W_2 = 0,567 \frac{\text{кВт}}{\text{К}}, \frac{W_1}{W_2} = 0,89.$$

$$3. W_1 = 0,503 \frac{\text{кВт}}{\text{К}}, W_2 = 0,611 \frac{\text{кВт}}{\text{К}}, \frac{W_1}{W_2} = 0,82.$$

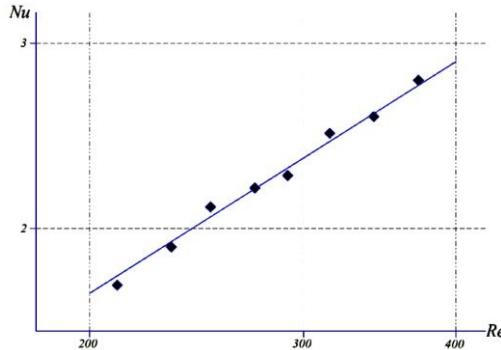
Иссиқлик ҳаво оқимидан насадкага иссиқлик узатишни ўртача аниқ коэффициентларини аниқлаш учун тажриба ўтказилди. Насадкага киришда ҳаво оқимларининг ўртача ҳарорати вақт ўтиши билан доимий равишда сақланиб қолади. Насадқадан чиқишидаги ҳаво оқимларини ўртача ҳарорати қурилма барқарор иш холатига тушгандан кейин аниқланади. Совуқ ҳаво оқими сарфи доимий ушлаб турилади, иссиқ ҳаво оқими сарфи қийматлари  $1400 \frac{\text{м}^3}{\text{соат}}$  дан  $2600 \frac{\text{м}^3}{\text{соат}}$  га оралиқда ўзгариб туради. Насадка айланиш частотаси  $n = 13 \frac{\text{аил}}{\text{мин}}$ . Қайта ишлаш учун иссиқлик мувозанатларидан фарқ 10% дан ошмаган тажриба маълумотлар қабул килинди. Иссиқликни ҳисобланган миқдори сифатида ўртача арифметик қийматлар қабул килинди. Ҳисобланган иссиқ ва совуқ ҳаво оқими бўйича иссиқликни ўртача миқдори ўртасидаги фарқ  $\pm 5\%$  ташкил этди

4-расмда АРИҮ иссиқлик самарадорлигини  $\frac{W_1}{W_2}$  нисбати орқали ифодаланган ҳаво оқими сарфи нисбатига боғлиқлиги кўрсатилган. Аппроксимацион эгри чизик атрофидаги нуқталар тажриба-синов маълумотларини кўрсатади.  $\frac{W_1}{W_2}$  ошиши билан АРИҮда иссиқлик самарадорлик пасаяди.



4-расм. АРИҮ иссиқлик самарадорлиги  $\frac{W_1}{W_2}$  нисбатига боғлиқлиги

АРИҮдаги ҳаво оқимлари таркибидаги намлик ўзгаришларини баҳолашга насадка юзасида иссиқлик алмашынув жараёни нам ҳавони конденсациясиз содир бўлганлигини аниқлашга имкон беради.



5-расм.  $Nu = f(Re)$  мезонли боғлиқлиги

Иссиқлик узатиш коэффициентларини аниқлаш бўйича тадқиқот натижалари турли хил Рейнольдс сонлари орқали Нуссельт сонлари қийматларини олиш имконини беради. Тажриба маълумотларини қайта ишлаш натижалари 5-расмда логарифмик координаталарда келтирилган.

Ўрганилаётган насадкани иссиқлик бериши  $200 \leq Re \leq 400$  оралиқда даражали функция билан аппроксимация қилинади.

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0.73}. \quad (2)$$

Нуқталарни ўртача квадратик оғиши 0,104 дан ошмади.

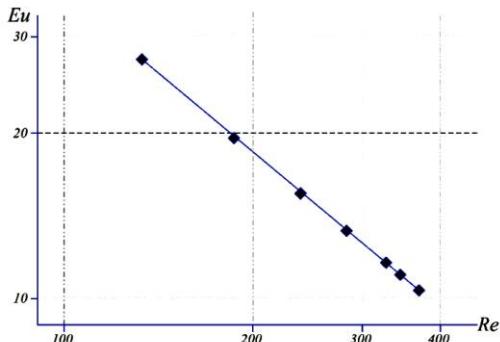
$Nu$  мезони қийматининг натижалари [11÷16] да келтирилган турли муаллифларнинг маълумотлари билан таққосланди, бу қийматлар миқдорий жиҳатдан бир-бира га ҳамда қийматларни кўрсатди. Ҳавони мўътадиллаш ва шамоллатиш тизимларида АРИҮларни ҳисоблаш ва лойиҳалашда босим пасайиши таснифлари унинг иссиқлик узатиш хусусиятларидан кам аҳамиятга эга бўлмайди [17÷19].

АРИҮда босим даражалари фарқини аниқлаш учун тажриба ўтказилди. Статик босим ўлчовлари насадкадан олдин ва кейин ҳаво оқими  $950 \frac{m^3}{сoat}$  дан  $2700 \frac{m^3}{сoat}$  гача бўлган оралиқда насадка айланиш частотаси  $n = 13 \frac{айл}{мин}$  бўлгани аниқланди. Синов-тажриба тадқиқот натижалари Эйлер мезонини  $Eu = f(Re)$  Рейнольдс мезонига боғлиқлиги кўринишида умумлаштирилди.

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot U^2}, \quad (3)$$

бу ерда  $\Delta P$  – ҳаво оқимини босимлар фарқи,  $U$  – каналдаги ҳаво оқимини ўртача тезлиги,  $\rho$  – ҳаво зичлиги.

Синов-тажриба маълумотларни қайта ишлаш натижаси 6-расмда логарифмик координаталарда келтирилган.

6-расм.  $Eu = f(Re)$  мезонли боғлиқлиги

$150 \leq Re \leq 400$  оралигидаги синов-тажриба маълумотларни натижалари даражали функция билан аппроксимацияланган.

$$Eu = 2462,4 \cdot Re^{-0,925}. \quad (3)$$

Тақдим этилган графикларни таҳлил қилиб, назарий тадқиқотлар натижалари синов-тажриба маълумотлар билан яхши мос келади деган хуносага келишимиз мумкин. Тафовутлар  $4\div8\%$ ни ташкил этади. Ҳисоблаш маълумотларини синов-тажриба маълумотларга яхши мос келиши кейинги тадқиқотларда ўрганилаётган АРИЎ учун ҳисоблаш методикасидан фойдаланишини мақбуллигини тасдиқлайди. Айланувчи регенератив иссиқлик алмаштиргичнинг иссиқлик самарадорлиги ва босим йўқотилишини баҳолаш учун маълумотлар, ҳамда иссиқлик узатиш коэффициентларининг ўртача қийматлари олинган.

### Адабиёт

1. Чачанидзе М.К. Эффективность использования регенеративных вращающихся теплообменников блоков утилизации теплоты для систем вентиляции // Диссертация канд. техн. наук. – Ленинград, – 1985. – 139 с.
2. Калашников М.П. Эффективность утилизации теплоты удаляемого воздуха из зданий и сооружений // Вестник ВСГУТУ. – 2018. – № 3(70). – С. 75-81.
3. Ильин В.П. Сопоставление тепловой эффективности регенеративных и рекуперативных теплообменников для систем кондиционирования воздуха. – В.: Вентиляция и кондиционирование воздуха. Сб. РПИ, Рига, –1973. – №6. – С. 35-37.
4. Ильин В.П., Креслинъ А.Я. Вращающиеся тепло – и массообменные аппараты для систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Водоснабжение и санитарная техника, 1972. – № 10. – С. 35-37.
5. Карпич Е.Е., Ильин В.П. Исследование и расчет вращающихся регенеративных теплообменников для систем кондиционирования воздуха и вентиляции // Исследование, расчет, проектирование санитарно-технических систем. – 1979. – №2. – С. 21-34.

6. Рекомендации по проектированию систем утилизации тепла удаляемого воздуха в теплоутилизаторах типа «воздух-воздух». – М.: ГПИ Сантехпроект, ТашЗНИИЭП, 1983. – 128 с.
7. Усмонов Н.О. Создание математической модели процессов вращающегося регенеративного теплоутилизатора в системе кондиционирования воздуха // Вестник ТашГТУ, 2019. – №1. – С. 100-106.
8. Усмонов Н.О. Ҳавони мўътадиллаш тизимларида табиий совуклик манбаларининг имкониятлари. PhD дисс. – Тошкент, 2019. – 140 с.
9. Усмонов Н.О., Мавжудова Ш.С. Теплоутилизатор в системах вентиляции и кондиционирования воздуха /Международная научно-практическая конференция «Инновация-2018». Сборник научных статей. Ташкент, – С. 89-91.
10. Городилов А.А. Интенсификация процесса тепломассообмена в контактных аппаратах с регулярной насадкой. Диссертация канд. техн. наук. – Москва, 2016. – 147 с.
11. Chunmei Guo, Yu Li, Xianli Li, Ruxue Bai, Chuans'huai Dong. Design Selection Method of Yexhaust Air Heat Recovery Type Indirect Yevaporative Cooler // Sustainability 2023, 15, 7371. <https://doi.org/10.3390/su15097371>.
12. Tuncay Yilmaz, Orhan Büyükalaca. (2003) Design of Regenerative Heat Yexchangers // Heat Transfer Yengineering, 24:4, 32-38, DOI: 10.1080/01457630304034.
13. Orhan Büyükalaca, Tuncay Yilmaz. Influence of rotational speed on yeffectiveness of rotary-type heat yexchanger // Heat and mass transfer 38 (2002) 441-447. DOI 10.1007/s002310100277.
14. Yewa Zender-Swiercz. A Review of Heat Recovery in Ventilation // Yenergies 2021, 14, 1759. DOI 10.3390/yen14061759.
15. Монаркин Н.Н. и др. Математическая модель процесса аккумуляции тепловой энергии в стационарном переключающемся регенеративном теплоутилизаторе // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (4) – С. 759-764.
16. Алешин А.Е. Моделирование процессов тепломассопереноса в регенеративных теплообменниках систем кондиционирования / Автореферат дисс. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2016. – 16 с.
17. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с.
18. Усмонов Н.О., Мухтаров Ф.Х. Теплотехника. Учебное пособие. – Т.: Изд-во ТашГТУ, 2023. – 234 с.
19. Усмонов Н.О., Исаходжаев Х.С. Моделирование и автоматизация тепловых процессов в теплоэнергетике. Учебное пособие. – Т.: Изд-во ТашГТУ, 2023. – 210 с.

ЎзР ФА “Энергетика муаммолари институти”,  
Тошкент ҳалқаро молиявий бошқарув ва технологиялари  
университети ва Тошкент давлат техника  
университети томонидан тақдим этилган

УДК 620.9

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В УЗБЕКИСТАНЕ

Т.Х. Насиров, Ш.В. Хамидов

*Мазкур мақола замонавий энергия тежовчи технологиялар асосида Ўзбекистон Республикасида энергия самарадорлигини ошириши масалаларига багишланган. Иқтисодиётнинг энергия сизимдорликнинг ҳозирги ҳолати ва узоқ муддатли истиқболда барқарор иқтисодий ўсишига тўсиқ бўлаётган энергия ресурсларидан самарасиз фойдаланиши сабаблари таҳлил қилинади.*

**Калим сўзлар:** энерготизим, энергия самарадорлиги, энергия сизимдорлиги, ишончлилик, энергия хавфсизлиги.

*Статья посвящена вопросам повышения энергоэффективности в Республике Узбекистан на основе современных технологий энергосбережения. Анализируются современный уровень энергоемкости экономики, причины неэффективного использования энергетических ресурсов, являющихся препятствием для достижения устойчивого экономического роста на долгосрочную перспективу.*

**Ключевые слова:** энергосистема, энергоэффективность, энергоемкость, надежность, энергобезопасность.

*The article is devoted to the issues of increasing energy efficiency in the Republic of Uzbekistan based on modern energy saving technologies. The current level of energy intensity of the economy and the reasons for the inefficient use of energy resources, which are an obstacle to achieving sustainable economic growth in the long term, are analyzed.*

**Key words:** energy system, energy efficiency, energy intensity, reliability, energy security.

**Введение.** Обеспечение энергоэффективности содействует укреплению энергетической безопасности страны, снижению себестоимости промышленной продукции, ее конкурентоспособности на рынки, решению экологических проблем при энергопроизводстве. В настоящее время важной задачей является практическая реализация поставленных целей энергоэффективности на основе малозатратных мер, подкрепленных необходимыми финансовыми и кадровыми ресурсами. Предстоит многое сделать по созданию институциональной базы для продвижения целей энергоэффективности. Имеющиеся резервы энергоэффективности не всегда удается реализовать в связи с недостатками законодательной базы или слабого их применения. Необходимо создание условий для привлечения инвестиций в проекты повышения энергоэффективности.

**Основная часть.** Исходя из структуры генерации электроэнергии к 2030 году цель Узбекистана - компенсировать нарастающий дефицит электроэнергии за счёт увеличения доли ВИЭ до 25% от общего объема [1].

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Это создаст нерешённые пока проблемы снижения надёжности энергосистемы Узбекистана и устойчивости параллельной работы с Объединённой энергосистемой Центральной Азии и России [2].

Вместе с тем имеющийся технический потенциал энергосбережения в Узбекистане составляет не менее 20% годового производства электро- и теплоэнергии.

Энергоемкость представляется как отношение потребления энергоресурсов к ВВП, он снижается с развитием энергосберегающих технологий производства. Единицей измерения энергоемкости является кое/\$15p – килограмм нефтяного эквивалента на доллар США при постоянном обменном курсе, ценах и паритете покупательной способности 2015 года [3].

В мировом разрезе глобальная энергоёмкость снизилась в 2022 году на 1,2%, в период 2009–2019 годы на 1,9% в год. В 2022 году мировое энергопотребление возросло на 2,1%, а рост ВВП 3%. При этом значения и тенденции энергоёмкости существенно отличаются для различных стран мира в силу разной структуры экономики. К странам с высоким удельным энергопотреблением (кое/\$15p) относятся Иран – 0,251, Кувейт – 0,228, Венесуэла – 0,206, Россия – 0,204, Украина – 0,193, ЮАР – 0,187, Тайвань – 0,182, Узбекистан – 0,179, Канада – 0,173, Нигерия – 0,161, Китай – 0,145, Казахстан – 0,1414 [3].

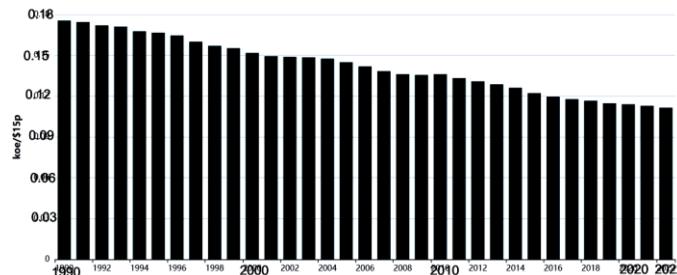


Рис.1. Мировая тенденция изменения энергоемкости кое/\$15p за 1990–2022

Высокая энергоемкость производства и низкая его энергоэффективность в Узбекистане являются серьезным препятствием устойчивого экономического развития страны, и поэтому, проблема повышения энергоэффективности производства входит в разряд первоочередных задач.

Энергоемкость ВВП в Узбекистане достигает 1 т.н.э./1000 долл. США, что в 4–5 раз больше, чем в развитых странах мира. В то же время потребление первичной энергии в Узбекистане на 1 человека примерно в 5 раз меньше, чем в США, и в 2,5 раза меньше, чем в России. Причинами столь высокого современного уровня энергоемкости экономики являются:

- неэффективность экономических стимулов энергосбережения;
- относительно низкий уровень внутренних цен на энергетическое сырье и продукты его переработки, и вытекающая из этого незаинтересованность на всех уровнях управления и у населения в обеспечении рационального использования и экономного расходования топлива и энергии;

- низкая оснащенность энергопотребителей техническими средствами учета и контроля за расходованием энергоресурсов;
- высокая энергозатратность производственных процессов из-за большой доли устаревшего производственного оборудования;
- а главное - отсутствие на предприятиях производственных служб по энергосбережению и повышению энергоэффективности;
- недостаточная информированность населения по вопросам энергосбережения.

Неэффективное использование энергетических ресурсов является главным препятствием для достижения устойчивого экономического роста национальной экономики на долгосрочную перспективу.

Причины этого положения хорошо известны. Это и недостаточная заинтересованность управления предприятий, и неспособность технического персонала разработать технико-экономическое обоснование мер по повышению эффективности использования энергии.

Что необходимо сделать в этом направлении в первую очередь? Практика развитых стран [5–7] показывает, что меры по сбережению энергии должны быть составной частью всеобъемлющей государственной программы управления предприятием - отраслью - экономикой, только в этом случае результаты сбережения энергии будут значительными и длительными.

Вопросы экономии топлива, тепла и электроэнергии следует рассматривать в связи со сбережением совокупных производственных ресурсов, т.е. как элемент ресурсосбережения. Эффективность и приоритетность энергосберегающих мероприятий необходимо определять на основе не только энергетической, но и социальной, экологической и экономической оценок.

По степени значимости 2-ой компонентой стратегии эффективного использования энергии (ЭИЭ), после ценообразования, считается институциональный аспект, обеспечивающий координацию и мотивацию всех заинтересованных в ЭИЭ структур (производителей, проектировщиков, строителей и инвесторов).

3-ей компонентой в ЭИЭ является обучение и распространение информации. Все эти компоненты должны иметь механизмы финансового и экономического стимулирования вместо административно-нормативной системы энергоуправления и штрафных санкций.

Абсолютным приоритетом среди энергосберегающих мероприятий, как в ТЭК, так и у потребителей, обладают малозатратные мероприятия, осуществляемые за счет улучшения организации функционирования мероприятий, внедрения системы материального стимулирования, неукоснительного соблюдения правил использования энергии.

Кардинальное изменение технологии производства требует, как правило больших капитальных затрат и окупается за 5–7 лет и более, что потребует значительных инвестиций. При ограниченности финансовых ресурсов в техническом соревновании за инвестиции особое место занимают энергетические технологии, так как они оказывают влияние на все другие технологии.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

**Техническое соревнование за инновационные инвестиции.** Реализация потенциала энергосбережения может осуществляться на основе современных технологий энергосбережения в следующих направлениях [4]:

*В энергетике:*

- комбинированная выработка тепла и электрической энергии (газотурбинные и парогазовые установки);
  - увеличение коэффициента извлечения нефти и газа и повышение эффективности их переработки и транспортировки;
  - обогащение угля на месте добычи и внедрение эффективных технологий его сжигания;
  - регулируемый электропривод и др.

*В жилищно-коммунальном секторе:*

- оснащение всех потребителей приборами контроля и расхода энергоносителей;
  - применение панелей с улучшенными теплозащитными свойствами;
  - децентрализованное энергоснабжение;
  - применение тепловых насосов;
  - применение для освещения энергоэффективных (газоразрядных и светодиодных) ламп;
  - использование малоэнергоемкой бытовой аппаратуры и др.

*В промышленности строительных материалов:*

- замена технологии мокрого способа получения цементного клинкера сухим;
- производство керамического кирпича с повышенной пустотностью;
- выпуск изделий на основе отходов (зола, шлаки и др.);
- повышение эффективности использования топлива, утилизация отходящих газов и др.

*В сельском хозяйстве:*

- передовые технологии водопользования;
- оптимизация режимов магистральных каналов машинного орошения;
- улучшение структуры парка сельхозмашин и др.

Важнейшим направлением в энергосбережении является внедрение **возобновляемых и альтернативных источников энергии** во всех отраслях экономики с наращиванием их доли в энергобалансе, в соответствии с динамикой исчерпания ископаемых видов топлива и по мере увеличения мощности накопителей энергии. Если это не проходит при существующих технологиях ВИЭ и тарифах на энергоносители, то выход следует искать в грантных/беспроцентных инвестициях.

В этом случае одновременно решаются проблемы снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

С привлечением зарубежного капитала целесообразно создавать демонстрационные зоны высокой энергоэффективности, что успешно реализовано во многих странах Восточной Европы и России.

По опыту передовых стран [5–8] целесообразно создание специальных структур, ответственных в масштабе страны за проведение государственной политики в области энергосбережения.

**Система энергоуправления.** Решение любых задач энергосбережения и повышения энергоэффективности производства требует создания и функционирования четкой системы энергоуправления (энергетического менеджмента). Система энергоуправления предприятия обязательно должна иметь прямую связь между текущим контролем и управлением (рис.2).

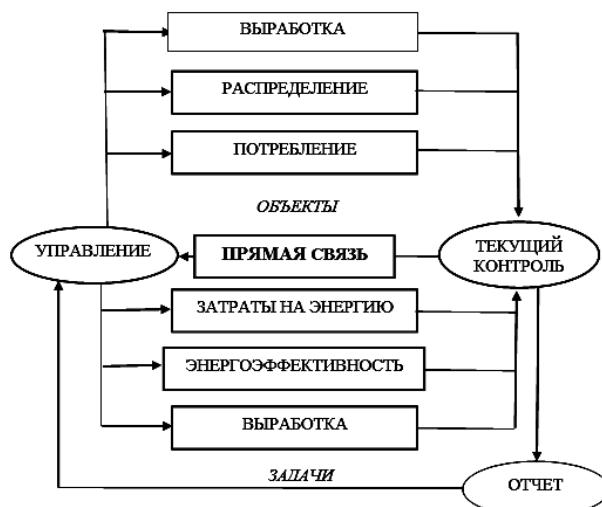


Рис.2. Система энергоуправления

В свою очередь постановка и решение задач в системах энергоуправления невозможны без детального энергетического аудита (обследования) текущего состояния энергопользования на предприятиях.

В Узбекистане до настоящего времени еще не проводятся в полном объеме энергетические обследования (энергоаудиты), предусмотренные Законом РУз «О рациональном использовании энергии». Это связано с:

незавершенностью разработки отдельных, предусмотренных Законом, нормативно-правовых документов;

недостатком подготовленных специалистов, как по аудиту, так и на производстве.

Управление энергией или энергетический менеджмент основан на контроле с помощью приборов. Внедрение приборов коммерческого учета энергоносителей для оплаты лишь первый и необходимый этап. Значительно больший объем разнообразных стационарных и переносных приборов необходим для налаживания текущего контроля за энергопотреблением и анализа возможностей повышения энергоэффективности. Не только крупные компании, но и небольшие предприятия в развитых странах используют сегодня программы непрерывного контроля энергопотребления с компьютерной обработкой данных (Monitoring@Targeting) и постановки задач по энергосбережению.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

Затраты, необходимые для проведения энергоаудитов и организации работ по энергосбережению несоизмеримы с тем эффектом, который может быть получен в результате реализации рекомендаций и предложений. Экономический эффект от инвестиций в эту область даже в лучших компаниях мира, имеющих высокий уровень энерготехнологий, на порядок превышает объем инвестиций.

Таким образом, решение обеих задач (проведение аудитов и мониторинг энергопотребления) требует закупок или собственного производства приборов технического учета и контроля расхода энергоносителей, а также подготовки специалистов для аудиторских и производственных служб по энергоуправлению (энергетическому менеджменту). С учётом мирового опыта необходимо создать службы по энергосбережению на всех крупных предприятиях с координацией их работы с региональными центрами энергоуправления по электро-, тепло- и газоснабжению.

В заключение приведём предложения специалистов Узбекистана по энергосбережению и энергоэффективности:

– обязательное внедрение должности энергоменеджера на крупных предприятиях с расходом энергоресурсов в объёме, определённом Постановлением Правительства в соответствии с Законом рациональном использовании энергии. энергосбережении. При этом, энергоменеджер должен иметь сертификат об окончании курса повышения квалификации в аккредитованных центрах обучения по направлению – управление энергопотреблением, энергоаудит, энергосбережение и повышение энергоэффективности (по отраслям). Для подготовки энергоменеджеров необходимо создать аккредитованные учебные центры. В настоящее время проводится работа с фондом ЛСА (Япония) по созданию учебного центра при научно-исследовательском институте возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики Республики Узбекистан;

– разработка правил и механизмов заключения договоров на поставку энергоресурсов; правил, стимулирующих их экономию;

– разработка и внедрение механизмов Добровольного договора между энергоёмкими предприятиями и регуляторами по энергосбережению, по которому устанавливаются взаимные обязательства. Подобная практика получила широкое распространение в ЕС. Добровольные договоры, предусматривающие меры стимулирования и поощрения энергосбережения в виде льгот и налоговых вычетов, обычно нацелены на энергоёмкие предприятия, где обязательная система энергоменеджмента (СЭМ) и энергоаудит имеют большое воздействие на результат (например, Дания и Швеция).

Однако подобные виды энергосберегающей деятельности сложно подсчитать количественно заранее и определить результаты экономии для того, чтобы установить реалистичные показатели для Добровольного договора.

С другой стороны, в Великобритании, Словении и Германии налоговые вычеты или освобождение от налогов, а также вычеты или освобождение от экологических пошлин, которые зависят от выполнения количественных показателей.

Для стимулирования внедрения энергоэффективных технологий необходимо утвердить перечень объектов и технологий, которые относятся к объектам и техноло-

гиям высокой энергетической эффективности, предоставив им соответствующие таможенные и налоговые льготы.

### Литература

1. Концепция обеспечения Республики Узбекистан электрической энергией на 2020–2030 годы. / 2020. Официальный сайт Министерства энергетики Республики Узбекистан.
2. Насиров Т.Х., Трофимов Г.Г., Шамсиев Х.А., Воротницкий В.Э. Проблемы и пути обеспечения параллельной работы энергосистем России и Центральной Азии // Электрические станции. 2022, №10. –С.2-9.
3. [URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html> (дата обращения: 12.09.2021)].
4. Насиров Т.Х., Басов О.В., Тохтахунов К.А. Энергосберегающие технологии для Узбекистана / монография – Ташкент: Фан ва технология, 2017. -279 с.
5. Обеспечение энергоэффективности. Развитие энергетической политики, задачи и возможности. / Секретариат Энергетической Хартии. Сентябрь 2007. При участии ЕБРР и Euroheia & Power.
6. UNECE. Политика повышения энергоэффективности: Передовой опыт. Европейская экономическая комиссия ООН. Серия публикаций ЕЭК ООН по энергетике. Нью-Йорк и Женева, 2015.
7. Инвестиции в энергоэффективность. Устранение барьеров. Секретариат Энергетической Хартии. 2004.
8. Углубленный обзор политики Республики Узбекистан в области энергоэффективности. Протокол к Энергетической Хартии по энергоэффективности и связанным с ней экологическим аспектам ПЭЭСЭА. Секретариат Энергетической Хартии, 2022.
9. Khamidov Sh.V., Shamsiev Kh.A., Shamsiev B.Kh. Technical and organizational aspects of increasing the reliability of the Unified Power System of Central Asian countries. Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems” (RSES 2021) AIP Conference Proceedings 2552, 010001 (2023).

*Представлено Институтом энергетических  
проблем Академии наук РУз*

УДК 621.316

### УПРАВЛЕНИЕ НЕСИММЕТРИЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ

**И.У. Рахмонов, Э.Г. Усманов, Б.Б. Холихматов**

Уибу мақола 0,4 кВ ли тармоқларда кучланиши носсиметриясини камайтириши учун мұлжалланған қурилмани ишилаб чиқши ва таұлғыл қилишига бағишиланған. Мақолада кучланиши симметриясининг оптимал даражасыга әриишии учун қурилманинг асосий тамойиллари, унинг таркибий қисмлари ва назорат қилиши үсуллари мұхокама қилинади. Тақдим этилған тадқиқтот натижалари қурилманинг электр таъминоти сифатини ошириши ва электр тармоқларининг барқарор ишилашини таъминлашдаги самарадорлигини тақидлайды.

**Калит сұзлар:** Кучланиши носсиметрияси, кучланиши гармоникалари, индуктивлик, тиристор, бир чизиқли схема.

Данная статья посвящена разработке и анализу устройства, предназначенного для уменьшения несимметрии напряжения в электрических сетях 0,4 кВ. В статье рассмотрены основные принципы устройства, его компоненты и методы управления для достижения оптимального уровня симметрии напряжений. Представленные результаты исследований подчеркивают эффективность устройства в повышении качества электроснабжения и обеспечении стабильной работы электрических сетей.

**Ключевые слова:** Несимметрия напряжения, гармоники напряжения, индуктивность, тиристор, однолинейная схема.

*This article is devoted to the development and analysis of a device designed to reduce voltage asymmetry in 0.4 kV electrical networks. The article discusses the basic principles of the device, its components and control methods to achieve an optimal level of voltage symmetry. The presented research results highlight the effectiveness of the device in improving the quality of power supply and ensuring stable operation of electrical networks.*

**Keywords:** *Voltage asymmetry, voltage harmonics, inductance, thyristor, one-line circuit.*

В сетях 0,4 кВ часто наблюдается несимметричная их работа, т.е. напряжения в разных фазах могут отличаться друг от друга. Несимметричные режимы в электрических сетях возникают по следующим причинам: 1) неодинаковые нагрузки в различных фазах; 2) неполнофазная работа линий или других элементов в сети; 3) различные параметры линий в разных фазах.

Наиболее часто несимметрия напряжений возникает из-за неравенства нагрузок фаз. В городских и сельских сетях 0,38 кВ несимметрия напряжений вызывается в основном подключением однофазных осветительных и бытовых электроприемников малой мощности. Количество таких однофазных

электроприемников велико, и их нужно равномерно распределять по фазам для уменьшения несимметрии. Однако в настоящее время из-за быстрого развития бытовой электрической техники такое решение практически затруднительно.

В сетях высокого напряжения несимметрия вызывается, как правило, наличием мощных однофазных электроприемников, а в ряде случаев и трехфазных электроприемников с неодинаковым потреблением в фазах. К таким потребителям относятся дуговые сталеплавильные печи. Основные источники несимметрии в промышленных сетях 0,38-10 кВ - это однофазные термические установки, руднотермические печи, индукционные плавильные печи, печи сопротивления и различные нагревательные установки. Кроме того, несимметричные электроприемники - это сварочные аппараты различной мощности. Тяговые подстанции электрифицированного на переменном токе железнодорожного транспорта являются мощным источником несимметрии, так как электровозы имеют однофазные электроприемник [1].

Несимметрия отрицательно сказывается на рабочих и технико-экономических характеристиках вращающихся электрических машин. Ток прямой последовательности в статоре создает магнитное поле, вращающееся с синхронной частотой в направлении вращения ротора. Токи обратной последовательности в статоре создают магнитное поле, вращающееся относительно ротора с двойной синхронной частотой в направлении, противоположном вращению. Из-за этих токов двойной частоты в электрической машине возникают тормозной электромагнитный момент и дополнительный нагрев, главным образом ротора, приводящие к сокращению срока службы изоляции.

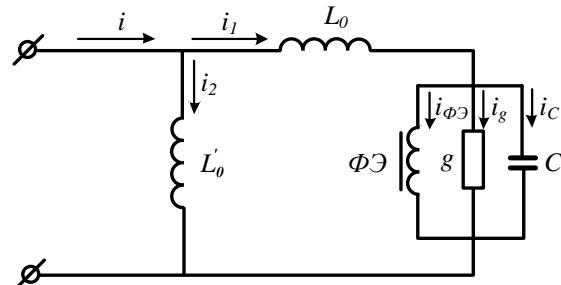


Рис.1. Эквивалентная схема — это параллельный колебательный контур, включенный последовательно с линейной индуктивностью и параллельно со второй линейной индуктивностью

В асинхронных двигателях возникают дополнительные потери в статоре. В ряде случаев приходится при проектировании увеличивать номинальную мощность электродвигателей, если не принимать специальные меры по симметрированию напряжения. В синхронных машинах кроме дополнительных потерь и нагрева статора и ротора могут начаться опасные вибрации. Из-за несимметрии сокращается срок службы изоляции трансформаторов, синхронные двигатели и конденсаторных батарей уменьшают выработку реактивной мощности [2].

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Исследования, проведённые авторами, при создании симметрирующего устройства, показали, что в качестве чувствительного органа стабилизатора можно использовать параллельный колебательный контур с падающим участком амплитудной характеристики.

Рассмотрим фазовые соотношения параллельного феррорезонансного контура, включенного последовательно с линейной индуктивностью и соединенной параллельно второй линейной индуктивности (рис.1).

Для проведения теоретического анализа примем те же допущения, что и для ранее рассмотренной цепи. Кроме этого, пренебрегаем потерями в сердечнике линейного дросселя, ввиду их малости [3].

Определим амплитудно – фазовое соотношение между напряжением  $U_{\text{вх}}$  и током  $i_1$ .

Исследование проводится методом медленно меняющихся амплитуд. Исследуемая цепь описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\varepsilon = \psi \phi \omega e + \Delta \psi \omega e \text{ ж} \quad (1)$$

где

$$i = i_C + i_g + i_{\phi\vartheta} \quad (2)$$

Здесь:

$$i_C = wC \frac{d^2\phi}{dt^2} \quad (3)$$

$$i_g = w g \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

$$i_{\phi\vartheta} = \frac{K}{w} \phi^7 \quad (5)$$

Подставляя соответствующие значения токов согласно (3), (4), (5) в уравнение (2) из равенства (1) получим:

$$u = w \frac{d\phi}{dt} + w C L_0 \frac{d^3\phi}{dt^3} + w g L_0 \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{K L_0}{w} \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

Введем базисные и безразмерные величины, соответствующие уравнению (6):

$$y = \frac{u}{U_0}; x = \frac{\phi}{\phi_0}; \Phi_0 = \sqrt{\frac{64\omega^2 w^2 C}{35K}}; U_0 = \omega w \phi_0; \tau = \omega t \quad (7)$$

С учетом выражений (7), после несложных преобразований уравнение (7) будет иметь следующий вид:

$$y = \frac{dx}{d\tau} + \omega^2 C L_0 \frac{d^3x}{d\tau^3} + \omega g L_0 \frac{d^2x}{d\tau^2} + \omega^2 C L_0 \frac{64}{35} \frac{dx}{d\tau} \quad (8)$$

принимая безразмерные коэффициенты:

$$\beta = \omega^2 C L_0; \gamma = \omega g L_0 \quad (9)$$

имеем

$$y = \frac{dx}{d\tau} + \beta \frac{d^3x}{d\tau^3} + \gamma \frac{d^2x}{d\tau^2} + \beta \frac{64}{35} \frac{dx}{d\tau} \quad (10)$$

Проинтегрируем данное уравнение:

$$\int y dx + c = x + \beta \frac{d^2 x}{d\tau^2} + \gamma \frac{dx}{d\tau} + \frac{64}{35} \beta x^7 \quad (11)$$

где  $c$  — постоянная интегрирования [4-6].

Решение (11) будем искать в виде:

$$x = X_m \sin(\tau + \psi) \quad \text{при} \quad y = Y_m \sin \tau \quad (12)$$

Производное от  $x$ ; имеет вид:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{dX_m}{d\tau} \sin(\tau + \psi) + X_m \cos(\tau + \psi) + \frac{d\psi}{d\tau} X_m \cos(\tau + \psi) \quad (13)$$

С учетом того, что  $X_m >> \frac{dX_m}{d\tau}$  и  $X_m >> \frac{d\psi}{d\tau} X_m$  можно в первом приближении принять:

$$\frac{dx}{d\tau} = X_m \cos(\tau + \psi) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{d\tau^2} &= \frac{d^2 X_m}{d\tau^2} \sin(\tau + \psi) + \frac{dX_m}{d\tau} \cos(\tau + \psi) + \frac{dX_m}{d\tau} \frac{d\psi}{d\tau} X_m \cos(\tau + \psi) + \\ &+ \frac{dX_m}{d\tau} \cos(\tau + \psi) - X_m \sin(\tau + \psi) - X_m \frac{d\psi}{d\tau} \sin(\tau + \psi) + \\ &+ \frac{dX_m}{d\tau} \frac{d\psi}{d\tau} \cos(\tau + \psi) + X_m \frac{d^2 \psi}{d\tau^2} \cos(\tau + \psi) - X_m \frac{d\psi}{d\tau} \sin(\tau + \psi) \\ &- X_m \frac{d\psi}{d\tau}^2 \sin(\tau + \psi) \end{aligned} \quad (15)$$

Из (15) пренебрегаемая слагаемыми второго порядка и учитывая первую гармонику магнитного потока имеем:

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = 2 \frac{dX_m}{d\tau} \cos(\tau + \psi) - 2X_m \sin(\tau + \psi) - X_m \sin(\tau + \psi) \quad (16)$$

Подставляя (15) и (16) в уравнение (11), получим:

$$\begin{aligned} Y_m \cos \tau &= -X_m \sin(\tau + \psi) - 2\beta \frac{dX_m}{d\tau} \cos(\tau + \psi) + 2\beta \frac{d\psi}{d\tau} \sin(\tau + \psi) + \\ &+ \beta X_m \sin(\tau + \psi) - \gamma X_m \cos(\tau + \psi) - \beta X_m^7 \sin(\tau + \psi) \end{aligned} \quad (17)$$

После несложных тригонометрических преобразований сгруппируем коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях:

$$Y_m \sin \psi = -X_m + 2\beta X_m \frac{d\psi}{d\tau} + \beta X_m - \beta X_m^7 \quad (18)$$

Для стационарного состояния:

$$Y_m \sin \psi = \beta X_m + \beta X_m - X_m^7 \quad (19)$$

$$Y_m \cos \psi = -\gamma X_m \quad (20)$$

Совместное решение уравнений (19), (20) дает амплитудное значение входного напряжения, в относительных единицах и угол фаз между напряжением источника питания и магнитным потоком  $\Phi \mathcal{E}$ .

$$Y_m = \sqrt{\left[ \beta (I - X_m^6) \right]^2 - \gamma^2} \quad (21)$$

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

$$\operatorname{tg}\psi = -\frac{\beta(1-X_m^6)-1}{\gamma} \quad (22)$$

Для построения ВАХ цепи и определения его амплитудно-фазовой характеристики необходимо определить зависимости  $I=f(\Phi)$  и  $\phi=f(U_{ex})$ . Перепишем уравнение (2) с учетом (3), (4) и (5):

$$i=wC\frac{d^2\phi}{dt^2}+wg\frac{d\phi}{dt}+\frac{K}{w}\phi^7 \quad (23)$$

введя новые безразмерные и базисные величины:

$$z=\frac{i}{I_0}; \quad I_0=\omega^2 wC\Phi \quad (24)$$

и учитывая выражения (7), (9) перепишем уравнение (24) в виде:

$$z=\frac{d^2x}{d\tau^2}+\frac{g}{\omega C}\frac{dx}{d\tau}+\frac{64}{35}x^7 \quad (25)$$

или

$$z=\frac{d^2x}{d\tau^2}+\frac{g}{\delta}\frac{dx}{d\tau}+\frac{64}{35}x^7 \quad (26)$$

Допустим, что:

$$z=Z_m(\sin(\tau-\varphi)) \quad (27)$$

подставим выражении (11), (12) и (25) в уравнение (27) и учитывая основную гармонику магнитного потока имеем:

$$Z_m \sin(\tau-\varphi) = -X_m \sin(\tau+\psi) + \frac{\xi}{\delta} X_m \cos(\tau+\psi) + X_m^7 \sin(\tau+\psi) \quad (28)$$

После несложных преобразований и группировки коэффициентов при одинаковых тригонометрических функциях имеем:

$$Z_m \sin\varphi = -(X_m^6 - 1) X_m \sin\psi - \frac{\gamma}{\beta} X_m \cos\psi \quad (29)$$

$$Z_m \cos\varphi = (X_m^6 - 1) X_m \cos\psi - \frac{\gamma}{\beta} X_m \sin\psi \quad (30)$$

Совместное решение уравнений (29) и (30) дает амплитудное значение тока нагрузки в относительных единицах и угол фаз между током нагрузки и напряжением питающей сети:

$$Z_m = X_m \sqrt{(1-X_m^6)^2 - \left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^2} \quad (31)$$

$$\operatorname{tg}\phi = -\frac{(X_m^6 - 1) \operatorname{tg}\psi \frac{\gamma}{\beta}}{(X_m^6 - 1) \frac{\gamma}{\beta} \operatorname{tg}\psi} \quad (32)$$

Напряжения на индуктивности  $L'_0$  определяется из формулы:

$$u = L'_0 \frac{di}{dt}$$

отсюда

$$i_2 = \frac{1}{L'_0} \int U_m \sin\omega t dt = -\frac{U_m}{\omega L'_0} \cos\omega t \quad (33)$$

Ток на неразветвленном участке цепи определяется, как:

$$i = i_1 + i_2 \quad (34)$$

или в относительных единицах:

$$z = z_1 + z_2 = Z_{lm} \sin(\tau - \psi_1) - \frac{Y_m}{\beta'} \cos \tau,$$

где  $\beta' = \omega^2 CL_0'$ :

$$Z_m s(\tau - \psi) = Z_{lm} \sin(\tau - \psi) - \frac{Y_m}{\beta'} \cos \tau,$$

$$Z_m \sin \tau \cos \varphi - Z_m \cos \tau \sin \varphi = Z_{lm} \sin \tau \cos \varphi_1 - Z_m \cos \tau \sin \varphi_1 - \frac{Y_m}{\beta'} \cos \tau \quad (35, a)$$

Выделим синусные и косинусные составляющие

$$Z_m \sin \varphi = Z_{lm} \sin \varphi_1 + \frac{Y_m}{\beta'} \quad (35, b)$$

Совместное решение уравнений (35, a) и (35, b) дает амплитудное значение тока, в относительных единицах, на неразветвленном участке цепи и угол фаз между этим током и напряжением питающей сети

$$Z_m = \sqrt{\left( \frac{Z_{lm} \tan \varphi_1}{1 + \tan^2 \varphi_1} \right)^2 + \left( \frac{Z_{lm}}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_1}} \right)^2} \quad (36)$$

$$\tan \varphi = \tan \varphi_1 + \frac{Y_m}{\beta' Z_{lm}} \quad (37)$$

Полученные результаты по формуле (37) имеют как положительное, так и отрицательное значение:

- отрицательное значение угла  $\varphi$  соответствует опережению фазы тока нагрузки, от напряжения питающей сети;
- положительное значение угла  $\varphi$  соответствует отставанию фазы тока нагрузки от напряжения источника питания.

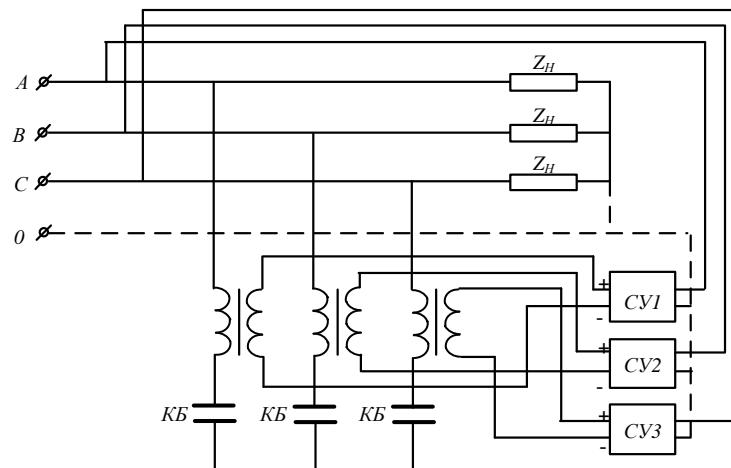


Рис.2. Однолинейная схема симметрирующего устройства

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

Таким образом если в неразветвленный участок рассмотренной цепи включить трансреактор, то с вторичных его обмоток можно получить сигнал для управления тиристоров включенных в плечи диодного моста. Такое включение позволят получить выпрямленное напряжение, величина которого изменяется обратно пропорционально величине напряжения питающей цепи [7].

На рис.2 показана схема подключения предлагаемого устройства в трехфазную цепь.

Как видно из этой схемы каждая система управления соответственно подключены к той фазе четырех проводной цепи, что и конденсаторы мощность которую регулирует. Следовательно, при изменении напряжения в фазе А сработает СУ1 получающий питание с фазы А и включает КБ подключенную к этой фазе.

Таким образом, используя параллельный колебательный контур в системе управления конденсаторными батареями можно создать систему плавного управления, генерируемую конденсаторными батареями мощность в питающую сеть [8,9].

**Заключение.** В данной статье было исследовано устройство для уменьшения несимметрии в электрических сетях. Рассмотрены дифференциальные уравнения, описывающие процессы в системе, а также представлена схема симметрирующего устройства. Устройство состоит из системы, управляющей конденсаторами через тиристоры, что позволяет эффективно компенсировать несимметрию и обеспечивать более стабильное электрическое напряжение.

Результаты исследования подтверждают эффективность и перспективность данного устройства в решении проблемы несимметрии в электрических сетях. Оно способно снизить влияние несимметрии на работу электрооборудования, повысить качество электроэнергии и снизить риск возникновения сбоев и поломок.

Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию более эффективных и надежных систем для уменьшения несимметрии в электрических сетях. Такие системы будут способствовать более стабильной работе электрооборудования, снижению потерь энергии и повышению энергоэффективности систем электроснабжения.

В целом, данное исследование представляет значимый вклад в область управления несимметрией в электрических сетях и может быть полезным для специалистов в области электроэнергетики и электротехники.

### Литература

1. Li, Y., Wang, L., Chen, Z., & Liu, X. (2020). Impact of Voltage Asymmetry on Melting Behavior of Conductors in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(3), 1030-1038.
2. Попов А. Н. Повышение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий за счет уменьшения несимметрии фазных напряжений //ЭФТЖ. – 2011. – Т. 6. – С. 26.

3. Самарин Г.Н., Ружьев В.А., Егоров М.Ю. Способы коррекции уровней напряжения и несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ // Известия СПбГАУ. 2017. №4 (49).
4. Усманов Э.Г. Стабилизатор тока на основе вольтодобавочного трансформатора. "Проблемы энерго- и ресурсосбережения" 2022. Специальный выпуск №81. С. 39-44.
5. Usmanov, E.G. E3S Web of Conferences, 384, 01034, (2023), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401034>
6. Rakhmonov I.U., Xolixmatov B.B. Influence of voltage asymmetry on the intensity of the melting process // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, 10(7), 20833-20836.
7. Usmanov, E. AIP Conference Proceedings, 2552, 050020, (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0111537>
8. Руди Дмитрий Юрьевич, Антонов Александр Игоревич, Гоненко Татьяна Владимировна, Клеутин Владислав Иванович, Руппель Александр Александрович, and Руппель Елена Юрьевна. "Методы снижения несимметрии напряжения в электрических сетях 0,4-10 кВ" Омский научный вестник, no. 2 (158), 2018, pp. 75-77.
9. Москалев Юрий Владимирович. Определение параметров компенсирующего устройства с несимметричной структурой для уменьшения несимметрии напряжений и компенсации реактивной мощности в низковольтной трехфазной электрической сети // Известия Транссиба. 2016. №4 (28).

*Представлено Ташкентским государственным  
техническим университетом*

## ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ ПОДСТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**С.Ф. Амиров, С.С. Халиков, Сарвар С. Халиков**

Мақолада хавфликни олдиндан таҳлил қилиши усули билан, ҳодисаларнинг оқибатини таҳлил қилишида ишламай қолиши турларини аниқлаши учун зарур бўлган элементлар аниқланган. Электр таъминоти подстанциясининг ишдан чиқганда ва жорий номинал параметрларининг рухсат этилган қийматидан четланганда потенциал хавфлили элементлари ва узеллари келтирилган. Муаллифлар томонидан электр таъминоти подстанцияси ишончлигини тадқиқот қилиши учун статистик усули танлаб олинган бўлиб, унда вақт бўйича боғлиқ бўлган эксплуатация ва экспериментал маълумотлар бўйича ишончлиликнинг кўрсатгичлари ва тавсифлари, шунингдек уларнинг тақсимланиши қонуни аниқланган. Ишламай қолишисиз ишилаш вақтини тақсимланишининг статистик зичлиги бўйича ушибу ўрнатилдики, электр таъминоти подстанциясининг ишламай қолишисиз ишилаш вақтининг тақсимланиши экспоненциал қонунга мос келиши ўрнатилган.

**Калим сўзлар:** ишончлилик, электр таъминоти подстанциясм, статистик усул, тақсимланиши қонулари, экспоненциал қонуни.

В статье методом предварительного анализа опасностей выявлены элементы определения видов отказов при анализе последствий событий. Приведены элементы и узлы подстанций электроснабжения, потенциально представляющие опасность при выходе их из строя, либо при отклонении параметров текущих номинальных параметров от допустимых значений. Для исследования надежности подстанции электроснабжения авторами выбран статистический метод, по которому на основе эксплуатационных и экспериментальных данных определены показатели надежности и характеристики их зависимости от времени, а также закон их распределения. По статистической плотности распределения времени безотказной работы установлено, что время безотказной работы подстанции электроснабжения соответствует экспоненциальному закону распределения.

**Ключевые слова:** надежность, подстанция электроснабжения, статистический метод, законы распределения, экспоненциальный закон.

In the article, by the method of preliminary analysis of hazards, elements are identified for determining the types of failures in the analysis of the consequences of events. The elements and components of the power supply substation are presented, potentially dangerous if they fail or if the parameters of the current nominal parameters deviate from their allowable values. To study the reliability of the power supply substation, the authors chose a statistical method, which, according to operational and experimental data, determined the reliability indicators and the characteristics associated with them, depending on time, as well as the law of their distribution. According to the statistical distribution density of

*the uptime, it was found that the uptime of the power supply substation corresponds to an exponential distribution law.*

**Key words:** reliability, power supply substation, statistical method, distribution laws, exponential law.

Многолетняя эксплуатация электрооборудования подстанции электроснабжения (ПЭ), привела к отклонению их технических характеристик от заводских и появлению нежелательных явлений. Методом предварительного анализа опасностей выявлены элементы определения видов отказов при анализе последствий событий [1-3]. На рис.1 и 2 приведены элементы и узлы ПЭ, потенциально представляющие опасность при выходе их строя, либо при отклонении параметров текущих номинальных параметров от допустимых значений.

В результате появления неплановых отключений ПЭ приводят к нарушению бесперебойного электроснабжения потребителей. Поэтому задача количественного определения надежности электрооборудования ПЭ и разработка рекомендаций повышения долговечности является актуальной.

Как известно, существуют два метода исследования надежности: аналитический и статистический [1]. Для исследования надежности ПЭ авторами выбран статистический метод, который по эксплуатационным и экспериментальным данным определяет показатели надежности и связанные с ними, характеристики, в зависимости от времени, а также законы их распределения.

Здесь приводятся результаты исследований надежностей электрооборудования ПЭ на примере подстанции электроснабжения «Чукурсай» в городе Ташкенте, предназначеннной для электроснабжения железнодорожного электроподвижного состава и других потребителей железной дороги, которая введена в эксплуатацию 1959-60 годах. По суточным ведомостям электрооборудования ПЭ «Чукурсай» определены количественные значения критериев надежности. Она получает питание от двух независимых источников, так как электрифицированные участки железной дороги — потребители первой категории. Как известно, при выборе схемы главных электрических соединений тяговой подстанции необходимо учитывать следующие общие требования: надежность работы, экономичность, удобство эксплуатации, безопасность обслуживания и возможность расширения.

Требование надежности является основным. Под надежностью тяговой подстанции понимается свойство (способность) выдавать мощность в контактную сеть и не тяговым потребителям в соответствии с заданным графиком (для тяговых нагрузок — с заданным графиком движения поездов), обеспечивая при этом качество электрической энергии в соответствии с действующими нормами [1, 2].

По суточным ведомостям электрооборудования ПЭ «Чукурсай» определены количественные значения критериев надежности: средняя наработка на отказ  $-T_0$ , среднее время ремонта  $-T_{\text{рем}}$ , коэффициент готовности  $-K_g$ , интенсивность (опасность) отказов  $-\lambda(t)$  и коэффициент отказов  $K_0$ . Построена гистограмма функции плотности распределения  $f(t)$  времени безотказной работы ПЭ.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Как известно, существуют следующие теоретические законы распределения плотности: экспоненциальный, нормальный, Рэлея,  $\gamma$  - распределение и распределение Пуассона [1].



Рис.1. Элементы и узлы подстанции электроснабжения, потенциально представляющие опасность при выходе их из строя

По статистической плотности распределения времени безотказной работы (табл. 1) установлено, что время безотказной работы ПЭ соответствует экспоненциальному распределению.

Таблица 1  
Статистическая плотность распределения времени безотказной работы

$t$ (ч)	0÷100	100÷200	200÷400	400÷600	600÷800
$f^0(t) \cdot 10^{-3}$	9,422	2,514	1,665	1,183	1,0584
$f^T(t) \cdot 10^{-3}$	10,9	4,586	2,627	1,335	1,069

По данным табл. 1 построены кривые  $f^3(t)$  и  $f^T(t)$  (рис.3.).



Рис.2. Процессы и условия, потенциально представляющие опасность для ПЭ при отклонении текущих параметров от допустимых их значений

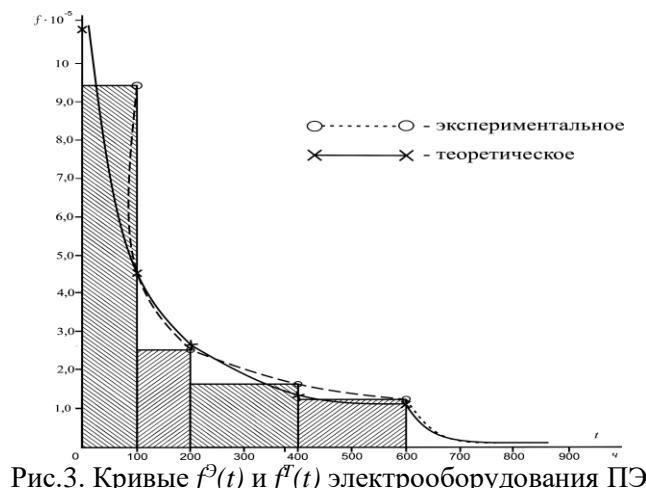


Рис.3. Кривые  $f^3(t)$  и  $f^T(t)$  электрооборудования ПЭ

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Как видно из рисунка, теоретическая  $f^T(t)$  сохраняет основные существенные особенности статистического распределения и довольно хорошо согласуется с экспоненциальными данными  $f^0(t)$ .

Для подтверждения того, что действительно ли время безотказной работы ПЭ распределяется по экспоненциальному закону, производилась оценка степени согласованности теоретического  $f^T(t)$  и статистического  $f^0(t)$  распределений с помощью критерия хи-квадрат Пирсона и критерия академика А.Н.Колмогорова. В результате оба критерия согласия подтвердили гипотезу о том, что время безотказной работы ПЭ распределяется по экспоненциальному закону.

На основе этого закона определены доверительные пределы: средней наработки на отказ ПЭ (табл.2) в зависимости от доверительной вероятности  $\alpha$ . Здесь  $T_{0.B}$  и  $T_{0.H}$  - верхние и нижние доверительные пределы средней наработки на отказ. В результате исследований определены характеристики ремонтопригодности СД.

Таблица 2

Доверительные пределы средней наработки на отказ ПЭ

$\alpha$	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99
$r_1$	1,618	1,670	1,709	1,758	1,81
$r_0$	1,43	1,381	1,35	1,33	1,29
$T_{0.B}(ч)$	235	239	243	247	251
$T_{0.H}(ч)$	99	95	93	90	87

На основе результатов приведенных в табл.2. доверительных пределов средней наработки на отказ, построены их графики, которые приведены на рис.4. Здесь  $r_1$  и  $r_0$  - коэффициенты,  $T_{0.B}$  и  $T_{0.H}$  - верхние и нижние доверительные пределы средней наработки на отказ.

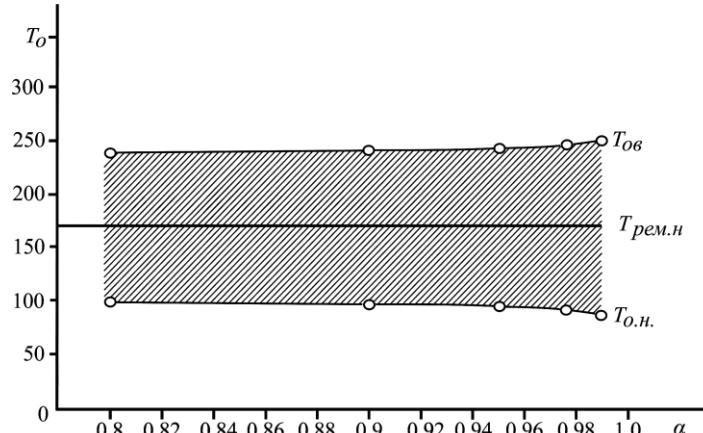


Рис.4. Доверительные пределы средней наработки на отказ ПЭ

Необходимо отметить, что характеристики определены в целом для ПЭ конкретного типа. При необходимости, используя вышеприведенную методику расчета, можно вычислить количественные характеристики надежности каждого элемента ПЭ

для получения сравнительных оценок и принимать конкретные решения для каждого элемента ПЭ.

Эти характеристики позволяют контролировать уровень надежности при эксплуатации ПЭ, своевременно выявлять основные причины отказов и устанавливать их характер, определять надежность основных комплектующих устройства ЭП и их отдельных частей, принимать конкретные меры по повышению надежности ЭП. Полученные данные могут быть полезными для вновь проектируемых ЭП. Это также позволит принимать меры по удлинению срока их службы или облегченных режимов работы ПЭ [4-9].

Необходимость такого структурного выделения элементов ПЭ обусловлена различиями в степени угроз безопасности каждого элемента, в связи с различиями функционального назначения и различиями технологических процессов.

**Заключение.** Выявлены элементы и узлы ПЭ, потенциально представляющие опасность при выходе их из строя, процессы и условия, потенциально представляющие опасность для них при отклонении текущих параметров от допустимых их значений.

По суточным ведомостям электрооборудования ПЭ «Чукурсай» определены количественные значения критерииев надежности. Построена гистограмма функции плотности распределения времени безотказной работы ПЭ.

По статистической плотности распределения времени безотказной работы установлено, что время безотказной работы ПЭ соответствует экспоненциальному закону распределения. Определены доверительные пределы средней наработки на отказ ПЭ. Они будут полезными при анализе безопасности ПЭ, прогнозе, изучении возможной надежности для различных условий работы, а также анализе отказов примененных элементов, определения оптимального значения риска и управления безопасности ПЭ.

## Литература

1. Андрейков В.А. Количественное определение надежности электро- агрегатов. - М.; ВНИИЭМ. 1966. - 87 с.
2. Халиков С.С., Халиков С.С. Применение нейронной сети для вероятностного анализа безопасности при эксплуатации подстанции электроснабжения // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. ТГТУ., – Т. 2021. №4. - С. 194-199.
3. Халиков С.С., Халиков С.С. Вопросы определения надежности и оценки безопасности электрической подстанции напряжением 10 кВ // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. ТГТУ., – Т. 2021. №3. -С. 94-102;
4. S.Khalikov, U.Boqijonov, N.Muminov, N.Iktomov, E.Yuldashev. Operational Management of Substation Safety Power Supply. AIP Conference Proceedings 2552, 060017 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0117222> 2552, 060017 © 2023 Author(s).
5. Амиров С.Ф., Тоиров О.З., Халиков С.С., Халиков С.С. Вопросы применения нейронной сети для вероятностного анализа безопасности при эксплуатации подстанции электроснабжения. /Международная научно-техническая

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

конференция «Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем». 3-4.03.2022. - С. 387-389.

6. Амиров С.Ф., Тоиров О.З., Халиков С.С., Халиков С.С. Надежность и безопасность подстанции электроснабжения /Международная научно-техническая конференция: «Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем». 3-4.03.2022. - С. 385-387.

7. Халиков С.С., Халиков С.С. Оперативное управление безопасностью подстанции электроснабжения /Международная научно-техническая конференция: «Актуальные проблемы системы электроснабжения». 25-26.11.2021. - С. 287-289.

8. Халиков С.С. Определение надежности и оценка безопасности подстанции электроснабжения. /Республика илмий-техник анжумани: Электротехника, электромеханика, электротехнологиялар ва электротехника материаллари. 22 dekabr 2021 yil. – Andijon. ISBN: 978-9943-4292-7-7. 147-148 б.

*Представлено Ташкентским государственным  
транспортным университетом*

**УДК: 621.316.1**

## ЎЗИНИ ТУТУВЧИ ИЗОЛЯЦИЯЛАНГАН СИМЛИ ҲАВО ЛИНИЯЛАРИНИНГ ИШОНЧЛИЛИК КЎРСАТКИЧЛАРИНИ ТАХЛИЛИ

**А.Д. Таслимов, И.Ю. Давлетов, Х.М. Аминов**

Мақолада электр тармоқлари корхоналаридан олинган статистик маълумотлар асосида изоляцияланган (“СИП”) ва изоляцияланмаган симли ҳаво линияларининг узилишилари ва уларнинг ойлар бўйича тақсимланишининг гистограммалари йил ойлари ва кун соатлари бўйича қурилиб, уларнинг ишончлилик кўрсаткичлари таҳлил қилинади. Таҳлиллардан маълум бўлишича, тақсимловчи электр тармоқларида максимал узилишилар куннинг маълум вақтларида, яъни истеъмолчининг электр энергиясига талаби юқори бўлган пайтларда содир бўлади ва бундан истеъмолчи электр энергиясининг узилишидан кўпроқ зарар кўради. Шу билан бирга, 0,38 ва 10 кВ кучланиши ҳаво линияларида ўзини тутувчи изоляцияланган (“СИП”) симдан фойдаланганда ишончлилик кўрсаткичларининг қийматлари тегишили равшида аниқланган: аварияли носозликлар частотаси 3,7 ва 3,4 узилиш/100 км-йил; ўртacha тикланиш вақти 2,5 ва 5,8 соат; режалаштирилган узилишилар давомийлиги 0 ва 6 соат. Электр таъминотининг ишончлилиги нуқтаи назаридан тизимининг энг заиф элементлари 10 ва 0,38 кВ кучланишили тақсимлаши тармоқлари бўлиб, улар қишилоқ истеъмолчилари электр таъминотидаги барча узилишиларнинг 60...80% тўғри келади.

**Калим сўзлар:** ҳаво линия, сим, изоляцияланган, изоляцияланмаган, ишончлилик, носозлик, узилиш, тикланиш вақти.

В статье на основе статистических данных, полученных от предприятий электрических сетей для изолированных (“СИП”) и неизолированных проводов построены гистограммы распределения отключений и их длительность по месяцам года и часам суток, а также проведен анализ надежности воздушных линий при применении изолированных и неизолированных проводов. Из анализа установлено, что максимум отключений в распределительных сетях приходится на такое время суток, когда потребитель остро нуждается в электроэнергии, и ущерб от перерывов электроснабжения наиболее велик. При этом показатели надежности для ВЛ 0,38 и 10 кВ с применением проводов “СИП” соответственно составят: частота аварийных отказов 3,7 и 3,4 откл./100 км-год; среднее время восстановления 2,5 и 5,8 ч; продолжительность плановых отключений 0 и 6 ч. По уровням надежности электроснабжения наиболее слабыми элементами системы электроснабжения являются распределительные сети 10 и 0,38 кВ, на долю которых приходится 60...80% всех отключений электроснабжения сельских потребителей.

**Ключевые слова:** воздушная линия, провод, изолированный, неизолированный, надежность, отказ, отключение, время восстановления.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

In the article, on the basis of statistical data obtained from enterprises of electrical networks for insulated (“SIW”) and non-insulated wires, histograms of the distribution of outages and their duration by months of the year and hours of the day are constructed and an analysis of the reliability of overhead lines using insulated and non-insulated wires is carried out. From the analysis it is established that the maximum outages in distribution networks occur at a time of day when the consumer is in dire need of electricity and the damage from power outages is greatest. At the same time, the reliability indicators for 0.38 and 10 kV overhead lines using “SIW”, respectively, will be: the frequency of emergency failures is 3.7 and 3.4 off/100 km-year; mean recovery time 2.5 and 5.8 hours; the duration of scheduled outages is 0 and 6 hours. In terms of power supply reliability, the weakest elements of the power supply system are distribution networks of 10 and 0.38 kV, which account for 60 ... 80% of all power outages for rural consumers.

**Keywords:** *overhead line, wire, insulated, uninsulated, reliability, failure, shutdown, recovery time.*

**Кириши.** Ўзбекистон Республикасида тақсимловчи электр тармоқларини 2025-йилгача ривожлантириш стратегиясига мувофиқ истеъмолчиларни электр энергияси билан таъминлашнинг ишончлилиги ва самарадорлигини ҳамда электр энергияси сифатини таъминлашга қаратилган комплекс вазифалар белгилаб берилди. Хусусан, қишлоқ истеъмолчиларини электр энергияси билан таъминлаш муаммоларини ҳал қилишда замонавий техник жиҳатдан жиҳозланган тақсимловчи электр тармоқлари учун янги тамойиллар, техник ечимлар ва техник воситалардан фойдаланиш тавсия этилади [1, 2].

Ҳозирги вақтда Республикаизнинг қишлоқ ҳаво электр тармоқларида ўзини тутувчи изоляцияланган симлар (“СИП”) кўлланилмоқда. Шу билан бирга, эксплуатация маълумотларига кўра, “СИП” симлар ёрдамида 0,38 ва 10 кВ кучланишли ҳаво линиялари (ХЛ) учун электр таъминотининг ишончлилик кўрсаткичларини аниқлаш қийин вазифа хисобланади. Бунинг сабаби сифатида “СИП” симлар қўлланиладиган электр тармоқлари корхоналарида амалий статистик маълумотларни ийғиш ва таҳлил қилиш қийинчиликлари кўрсатиб ўтилади [3,4]. Бундан ташқари, ҳозирги вақтда Республикаизда қишлоқ электр тармоқларининг 0,38 ва 10 кВли ҳаво линияларида “СИП” симларнинг етарли даражада кўлланиламаётганлигини ҳам айтиш мумкин.

**Асосий қисм.** [5, 6] адабиётларда электр тармоқлари корхоналари ва лойиҳа ташкилотларидан олинган маълумотлар асосида изоляцияланган ва изоляцияланмаган (очик) симлардан фойдаланишнинг ишончлилиги ва самарадорлигини таҳлили келтирилган. Тадқиқотда 15 та электр тармоқлари корхонаси иштирок этган ва 0,38-10 кВ кучланишли ҳаво линияларининг изоляцияланмаган (очик) ва изоляцияланган симлар параметрлари бўйича маълумотлар олинган. Шу билан бирга, ишончлиликни баҳолаш учун изоляцияланган ва очик симли ҳаво линиялари элементларининг солиштирма шикастланиш кўрсаткичларидан, яъни 100 км ХЛ ларда бир йилда содир бўладиган носозликлар сонидан фойдаланилган.

“Худудий электр тармоқлари” АЖдан ҳаво линияларининг техник ҳолати бўйича олинган статистик маълумотлар шуну кўрсатади, электр тармоқларида 6-10 кВ кучланишли ҳаво линияларининг шикастланиш даражаси йилига 100 км учун 7,4 та носозликни ташкил этади (1-жадвал).

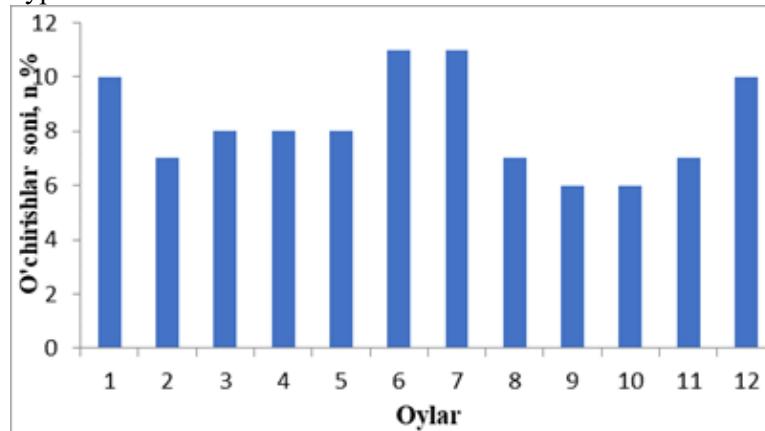
1 жадвал

Кузати ш йили	Бузилиш лар сони, та	Узатилма ган ЭЭ, кВт·соат	Ўчирил ган ХЛ сони, та	ХЛ узунлиги, км	Бузилишлар сони, 100 км ХЛ учун, Ўчи/100км	Ўчирилган ХЛ сони, 100 км учун, Ўчи /100 км	Узатилмаган ЭЭ, битта ўчирилиш учун, кВт·соат
2016	8237	70883	9019	109847	7,5	8,1	77
2017	7641	65491	8849	108948	7,0	8,1	74
2018	8615	69504	9122	108490	7,9	8,4	76
2019	8006	59630	9665	107585	7,3	9,0	61
2020	7592	63740	8853	105098	7,2	8,4	71,9

6-10 кВ кучланишли кишлоқ электр тармоқларини ишлатишида бузилишлар кўрсаткичлари

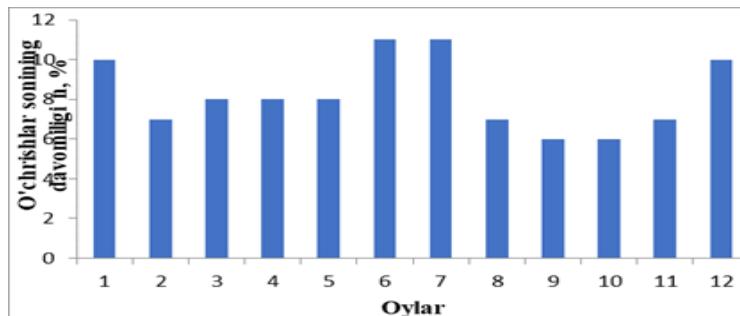
Жадвалдан кўриниб турибдики, 6-10 кВ кучланишли очик симли ҳаво линиялари учун ўртача шикастланиш даражаси ҳар 100 км учун йилига 7,8 носозлик, изоляцияланган ҳаво линиялари учун эса - бу кўрсаткич йилига 1,4 носозликни ташкил қиласди. Бу шуни англатади, 6-10 кВли изоляцияланган ХЛларининг шикастланиши очик симли ҳаво линияларига нисбатан 5 баробардан пастдир. Шу билан бирга, 0,38 кВ кучланишли очик ва изоляцияланган ХЛларининг шикастланиш даражаси мос равишда йилига 100 км учун ўртача 10 ва 1,7 носозликларни ташкил қиласди. Бу шуни англатади, изоляцияланган ХЛ ларининг шикастланиши анъанавий ХЛ билан солиширганда тахминан 6 баравар пастдир.

1 – 4-расмларда статистик маълумотларга асосан қурилган узилишлар сони ва давомийлигининг (тақсимланиш гистограммалари) йил ойлари ва кун соатларига боғлиқлиги кўрсатилган.

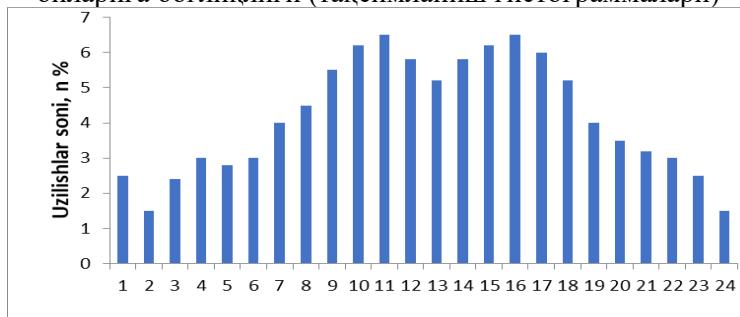


1-расм. 10 кВли ХЛларининг авариявий узилишлари сонини йил ойларига боғлиқлиги (тақсимланиш гистограммалари)

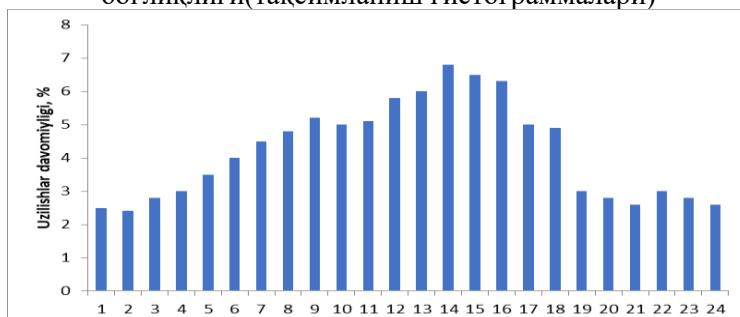
## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ



2 -расм. 10 кВли ҳаво линияларининг авариявий узилишлари давомийлигини йил ойларига боғлиқлиги (тақсимланиш гистограммалари)



3-расм. 10 кВли ҳаво линияларининг авариявий узилишларини кун соатларига боғлиқлиги(тақсимланиш гистограммалари)



4-расм. 10 кВли ҳаво линияларининг авариявий узилишлари давомийлигини кун соатларига боғлиқлиги(тақсимланиш гистограммалари)

Расмлардан кўриниб турибдики, линияларнинг энг кўп сонли узилишлари қишине ойларига тўғри келади. Бунда, авариявий ўчиришларнинг аксарияти кундузги соат 8 дан 17 соатгача содир бўлади. Шу билан бирга, давомийлик бўйича авариявий ўчиришларнинг максимал киймати 8 дан 17 соатгача бўлган вақтга тўғри келади. Бу шуни англатадики, истеъмолчи томонидан электр энергияси энг кўп истеъмол килингандан, кўп сонли авариявий ўчиришлар содир бўлади, бу эса электр таъминоти узилишларидан энг катта зарарга олиб келади.

Бундан ташқари, изоляцияланган ҲЛларда аниқланган носозликлар сони бўйича статистик маълумотларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, уларни йигишида бўладиган нуқсонлар кўп сонли авариявий ўчиришларга олиб келади. Бу, биринчи навбатда, изоляцияланган ҲЛларни йигишида ходимларнинг тайёргарлиги билан боғлиқ бўлади [5].

Очиқ симли 0,38 кВ кучланишли ҳаво линияларининг шикастланиш сабаблари таҳлили шуни кўрсатадики, паст кучланишли линияларнинг конустркттив хусусиятлари билан боғлиқ бўлган симларни ўралашиши истеъмолчиларни электр таъминотидан узилишига сабаб бўлади. Симларнинг кўп микдорда ўралашиши бир кесим юзали фаза симлари, кўчани ёритиш сими ва одатда нолли симни ҲЛнинг бир таянчидан осилганлиги билан боғлиқ [6]. Симлар ўралашишига яна бир сабаб шамол кучи ҳисобланади, унинг натижасида симларнинг турли частоталарда чайқалишига олиб келади. 0,38 кВ кучланишли ҳаво линиясининг носимметрик юкланиши ҳам симларнинг ўралишига олиб келади. Демак, ҳаво линияларида симларнинг ўралишиши асосан линиянинг конструкциясига боғлиқ бўлади.

Юқоридагилар асосида қўйидаги хуносалар чиқариш мумкин:

- 0,38 кВ кучланишли ҳаво линияларининг умумий носозлигидан 26,1%и симларни ўралишиши ва 29,9% и эса симларнинг узилиши билан боғлиқ;
- изоляторларнинг шикастланиши билан боғлиқ бўлган 0,38 кВли ҳаво линияларининг носозликлар частотаси 0,1 ўчириш / км-йилни ташкил этади;
- 0,38 кВ кучланишли электр узатиш линияларидаги носозликлар сони йилига 100 км учун 33,26 тани ташкил этади.

Шундай қилиб, юқоридаги таҳлилдан кўриниб турибдики, 0,38 кВ кучланишли ҳаво линияларини ишдан чиқишига олиб келадиган асосий сабаблар симларни ўралишиши, уларнинг узилиши ва изоляторларнинг шикастланиши ҳисобланади.

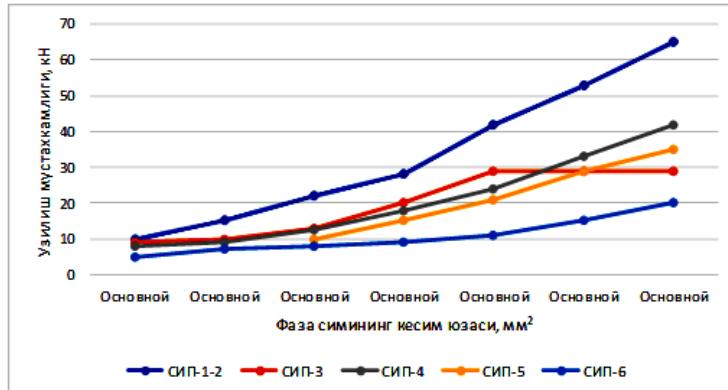
Симларнинг тўлиқ ўралишишини бартараф этиш учун уларнинг конструкцияси ҳисобига айлантирилган изоляцияланган “СИП” симлар ишлатилади. Бунда изоляцияланган симлар ишлатилганда изоляторлар ишлатилмайди, бу эса ҲЛларда изоляторлар билан боғлиқ носозликлар пайдо бўлишини бартараф этади.

Изоляцияланган “СИП” симли линияларнинг механик мустахкамлигини баҳолаш учун 5-расмда 0,38 кВ кучланишли ҳаво линияларида ишлатиладиган симларнинг узилиш мустахкамлигини фаза симининг кесим юзасига боғлиқлиги кўрсатилган.

Ҳозирги вақтда, паст кучланишли қишлоқ электр тармоқларидағи ҳаво линияларида анъанавий А маркали очиқ симлар энг кўп кўлланилади. 5-расм таҳлили шуни кўрсатадики, “СИП” симларнинг узилиш кучи 0,38 кВ кучланишли электр тармоқларида ишлатиладиган анъанавий “А” маркали симларга қараганда анча юқори. Масалан, 0,38 кВ кучланишли ҳаво линияларининг энг кенг тарқалган кесим юзалари учун ўзини тутувчи изоляцияланган “СИП” симларнинг узилиш кучи анъанавий “А” маркали симларга қараганда тўрт баравар юқори. Шунинг учун изоляцияланган симларнинг узилишлари сонини 25%ини ташкил этади. Юқори механик мустахкамликка эга бўлган “СИП” симларнинг қўлланилиши авария холатда таянчни ёки арматурани

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

бузилишига олиб келишини ҳисобга олинса, унда қийматни камайтириш мумкин. Бунда истеъмолчиларнинг электр таъминоти сим ерга тушганда ҳам тўхтамайди.



5-расм. 0,38-10 кВ ҳаво линиялари симларининг узилиш мустахкамлигини фаза симининг кесим юзасига боғлиқлиги

Ҳаво линияларининг асосий элементларидан бири таянчлар бўлиб, уларнинг шикастланиши электр узатиш линияларининг ишдан чиқишига олиб келади. 0,38 кВли ҳаво линиясидаги таянчлар сони уйларга кириш тармоқлари сони билан белгиланади ва амалда симларнинг механик хусусиятларига боғлиқ эмас. Амалий ҳисоб-китобларда очик изоляцияланмаган ва изоляцияланган симли ҳаво линиялари учун таянчларнинг шикастланишлари сони бир хил олинади. Умуман олганда, изоляцияланган симли ҳаво линияларида таянчлардаги юклама очик симли ҳаво линияларига қараганда камроқ ва симнинг осилиш баландлиги пастроқ бўлганлиги сабабли, изоляцияланган симли ҳаво линияларида таянчларнинг шикастланиши камроқ бўлиши керак [6].

2-жадвалда очик ва изоляцияланган симли ҳаво линияларининг симларнинг ўралашиши, симларнинг узилиши ва изоляторларнинг шикастланиши натижасида содир бўлган носозликлари частотасини ҳисоблаш натижалари кўрсатилган.

Жадвалдан кўриниб турибдики, очик симли ҳаво линияларининг носозликлари частотаси симларнинг ўралашиши сабабли 0,086 узилиш/км-йил, симларнинг узилиши туфайли 0,099 узилиш/км-йил, изоляторларнинг шикастланиши туфайли 0,1 узилиш/км. -йил ни ташкил этади. Изоляцияланган симларда симларнинг ўралашиши ва изоляторларнинг шикастланиши сабабли ҳеч қандай носозликлар бўлмайди ва симларнинг узилиши сабабли бўладиган носозликлар 75% га камаяди. Унда носозликларнинг частотаси 0,072 узилиш/км-йил ни ташкил қиласди. Олинган натижалардан маълум бўладики, изоляцияланган симлардан фойдаланганда 0,38 кВ ҳаво линияларининг шикастланиши изоляцияланмаган симларга нисбатан тахминан 2,6 баравар кам бўлади [6]. Шуну таъкидлаш керакки, ҳаво линиясининг носозликлар частотасининг ҳисобланган қиймати 0,38 кВли ҳаво линиясининг эксплуатация жараёнидада олинган маълумотларга тўғри келади.

2 жадвал

Ҳаво линиясининг носозликлари частотаси, узилиш/км-йил

Сим	Носозликлар сабаби			Носозликлар частотасининг қиймати,
	Симларнинг ўралашини сабабли	Симларнинг узилиши сабабли	Изоляторларнинг шикастланиши сабабли	
Изоляцияланмаган	0,086	0,099	0,1	0,1851
Изоляцияланган (“СИП”)	-	0,072	-	0,072

“Тошкент худуди электр тармоқлари” АЖда олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, 0,38 кВ кучланишили изоляцияланмаган симли ҳаво линиясининг носозликлар частотаси 100 км учун йилига 17 та узилишни ташки этади. Изоляциялангаган симлар ишлатилганда эса, 0,38 кВ ҳаво линиясининг носозликлар частотаси 100 км учун йилига 3,7 та узилишни ташкил этади. Демак, изоляцияланган симлардан фойдаланганда 0,38 кВли ҳаво линияларининг шикастланиши изоляцияланмаган симларга нисбатан тахминан 4,6 барабар кам [6].

Ҳозирги вақтда кишлоқ электр тармоқларидағи 0,38 ва 10 кВ кучланишили ҳаво линияларида “СИП” симлар етарли даражада кўлланилмайди ва изоляцияланган симли ҳаво линияларини ишлатишда уларнинг тиклаш вақти хақида маълумотлар мавжуд эмас. Шунинг учун, изоляцияланган симли ҳаво линияларининг тикланиш вақти 0,38 кВли очик симли ҳаво линиялари билан бир хил қабул қилинади, яъни 2,5 соат олинади.

Юқоридагиларни инобатга олган ҳолда, “Тошкент худудий электр тармоқлари” АЖ да мавжуд 0,38 кВ кучланишили “СИП” симли ҳаво линияларининг прогноз қилинган ишончлилик кўрсаткичлари куйидагиларни ташкил этади: авариявий носозликлар частотаси 3,7 узилиш/100 км-йил; ўртача тикланиш вақти 2,5 соат; режалаштирилган ўчиришлар билан боғлиқ эквивалент узилишлар давомийлиги 0 с.

“Тошкент худудий электр тармоқлари” АЖ қарашли 10 кВли тақсимлаш тармоқларидаги носозликлар таҳлили шуни кўрсатади, 10 кВ ҳаво линияларининг йилига ўртача носозликлар сони 100 км га 13,3 ни ташкил этади. Шу билан бирга, 10 кВ кучланишили ҳаво линияларининг умумий носозлигидан 3,3 узилиш/100 км-йил таси (24,8%) таянчларнинг шикастланиши ва бузилишига, 5,4 узилиш/100 км-йил таси (40,7%) симларнинг узилиши ва ўралашшига, 2,8/100 км-йил таси (21%) изоляторларнинг тешилиши ва носозликларига ва 13,5%ни бошқа сабабларга тўғри келади. Изоляцияланган симли 10 кВли ҳаво линияларининг тикланиш вақти эса, 10 кВли очик симли ҳаво линияларини билан бир хил деб қабул қилинади, яъни 5,8 соат олинади.

Бундан ташқари статистик маълумотларнинг таҳлили шуни кўрсатади, изоляцияланган ҳаво линияларининг режалаштирилган ўчиришлар частотаси авариявий узилишлар частотасига мутаносиб равища 4 барабар камаяди. Унда “Тошхудудий электр тармоқлари” АЖ корхонасидан олинган статистик маълумотларига ишлов бериш асосида 10 кВ ҳаво линиялари учун режали ўчиришлар частотаси аниқланди ва у 100 км линия учун йилига 9 та ўчиришларни ташкил этди. Бундан тахмин қилиш мумкинки, ҳаво линиясида режалаштирилган

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

ўчиришлар частотаси 2,3 узилиш/100 км-йил ни ташкил қиласи. Унда изоляцияланган ҳаво линияларининг режалаштирилган узилишлар давомийлиги 6 соатни ташкил этади, яъни 10 кВли изоляцияланмаган ҳаво линиялари билан бир хил бўлади.

**Хуласа.** 1. Қишлоқ электр тармоқларидағи ҳаво линияларининг ишончлилик кўрсаткичлари: авариявий носозликлар частотаси 3,4 узилиш/100 км-йил; ўртача тикланиш вақти 5,8 соат; режалаштирилган ўчиришлар частотаси 2,3 узилиш/100 км-йил; режалаштирилган ўчиришлар давомийлиги 6 соатни ташкил этади;

2. Қишлоқ электр тармоқларининг ҳолати электр таъминоти ишончлилигининг паст даражаси билан тавсифланади. Бунда, электр таъминоти тизимининг энг заиф элементлари 6-10 ва 0,38 кВ кучланишли тақсимловчи тармоқлари бўлиб, уларнинг хисобига қишлоқ истеъмолчиларининг электр таъминоти бўладиган узилишларнинг 60 ... 80% и тўғри келади;

3. Қишлоқ тақсимловчи электр тармоғининг энг носоз элементлари - изоляторлар ва изоляцияланмаган симлар хисобланади. Ушбу элементларнинг носозликлари сабабли ўчиришлар сони изоляторлар учун -21,0%, симлар учун -40,7% ни ташкил қиласи.

### Адабиёт

1. Стратегия развития распределительных электрических сетей в Республике Узбекистан до 2025 года. АО «Региональные электрические сети».
2. Катренко Г.Н. Новые подходы к построению распределительных электрических сетей 0,4-35кВ //Электрические сети и системы, 2013, -№ 5. -С. 25-29.
3. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства. Учебник. -М.: Колос, 2006. - 368 с.
4. Таслимов А.Д., Аминов Х.М. Применение самонесущих изолированных проводов в сельских электрических сетях. /Актуальные проблемы системы электроснабжения. Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Ташкент. ТашГТУ, 2022. - С. 89-91.
5. Анализ показателей надежности и технического состояния объектов распределительных сетей за 2015-2020 г. -Т.:АО “Худудий электр тармоқлари”, 2021.
6. Обобщение опыта эксплуатации сельских воздушных линий 0,38-10 кВ с изолированными и неизолированными проводами. -Т.:АО “Худудий электр тармоқлари”, 2022.

*Тошкент давлат техника университети ва  
Урганч давлат университетлари томонидан тақдим этилган*

UDK: 621.365.3

## ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF USING ELECTRODES IN THE STEEL MELTING PROCESS

I.U. Rakhmonov, M.F. Korjobova

*Ushbu maqolada elektrda po'lat eritish pechlarida qo'llaniluvchi elektrodlarning turlari va klassifikatsiyasi keltirilgan. Tadqiq etiluvchi masalalar grafit elektrodlarning texnik xarakteristikalari asosida keltirilgan. Shuningdek, maqolada po'lat eritish jarayonida sarf bo'luvchi elektrodlar miqdori va uning oshib ketishiga sabab bo'luvchi omillar tahlil qilingan. Bundan tashqari, eritish jarayoni uzlusizligi va sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatuvchi elektrodlar sinishi va shikastlanish holatlari tahlil qilinib, bu sabablarga yechim bo'luvchi takliflar berib o'tilgan.*

**Kalit so'zlar:** elektrod klassifikatsiyalari, texnologik jarayon, elektrodlar sarfi, energiya isrofi, elektrodlar sinishi.

*В данной статье представлены виды и классификация электродов, используемых в электроплавильных печах для стали. Исследовательские вопросы обсуждаются на основе технических характеристик графитовых электродов. Кроме того, в статье анализируется количество и факторы, влияющие на износ электродов в процессе производства стали. Кроме того, проводится анализ электродов, негативно влияющих на непрерывность и качество процесса обработки стали, предлагаются рекомендации по устранению этих проблем.*

**Ключевые слова:** классификация электродов, технологический процесс, расход электродов, энергетические потери, поломки электродов.

*In this article, the types and classifications of electrodes used in electric arc furnaces are presented. Research issues are discussed based on the technical characteristics of graphite electrodes. Additionally, the factors contributing to the consumption of electrodes in the steelmaking process and the reasons for their deterioration are analyzed. As well as, the article examines the testing and failure conditions of electrodes that adversely affect the continuity and quality of the steelmaking process, providing proposed solutions to these issues.*

**Keywords:** electrode classifications, technological process, electrode consumption, energy waste, breakage of electrode.

**Introduction.** Electrodes are the main element in the operation of steel melting furnaces. Not only electrodes directly affect the timely and high-quality melting of the slag but also, reducing the consumption of electricity in metal melting is one of the most important tasks. Because of the process of metal melting is 40-70% of the whole process and the consumption of electricity is 60-80%. Acceleration of the metal melting as much as possible, the electric arc between the electrodes and the metal plays a very important role

for the quality continuation of the technological process. After all, when melting steel, electrodes are damaged, broken, and as a result, the arc goes out and the melting process is disturbed. So that depending on the mechanical and thermal tolerance of electrodes and their use in melting processes, the selection of their production process, materials, selection of electrode types in accordance with the process is one of the urgent problems. As well as, high quality melting of metal in a specified period time directly depends on the electrodes. Today, the use of furnaces is increasing, and the demand for electrodes is increasing directly after the increase in power. One of the biggest problems in the process of metal melting today is damage (breakage) of electrodes.

**Main part.** The following tasks are considered in this article:

- The first part begins with an analysis of the types of electrodes, followed by a discussion of the characteristics of reliable electrodes used directly in the process of steel smelting in electric arc furnaces.
- The second part of the main part analyzes how many electrodes are needed to melt steel of the given amount in the technological process.
- The third section addresses the most significant challenges in electrode usage in melting technologies, accompanied by scientifically grounded suggestions to overcome these challenges.

These are scientists who have worked on scientific research: In Central Asia [1, 5], in Foreign countries [6, 10].

**Part 1.** Electrodes used in the steel industry are divided into several types based on their application and the types of manufactured products. They are selected for durability and thermal stability of the electrodes. Their names are indicated in the following diagram, Fig.1.

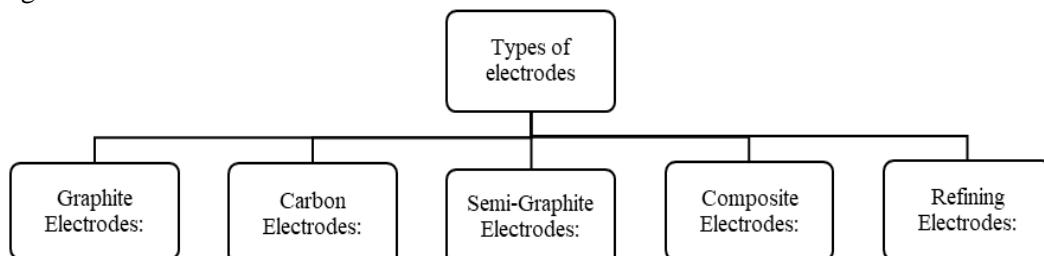


Fig.1. Types of electrodes

The electrodes of an arc steelmaking furnace work in extremely difficult conditions. Therefore, a number of specific requirements are imposed on the material for the manufacture of electrodes. They must have sufficient mechanical strength at low and high temperatures; have high electrical conductivity; be resistant to oxidation in the working space of the furnace and outside it, provide reliable contact in the heads of the electrode holders and the junction points of the electrode sections, have a low cost. Currently, only electrodes made of carbonaceous material meet such requirements [9, 10].

Graphite electrodes are used in electric arc furnaces for several reasons. Because the temperature of the furnace is very high (1600-1800°C), electrodes that can withstand this temperature are graphite electrodes [9]. The 1 table has types of graphite electrodes.

Table 1

Types of graphite electrodes and their characteristics

Types of Graphite Electrodes	Characteristics
Regular Power (RP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suitable for applications with current density &lt; 17 A/cm<sup>2</sup>.</li> <li>- Mainly used in ordinary power electric furnaces.</li> <li>- Moderate performance and cost.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Designed for applications with current density &lt; 22 A/cm<sup>2</sup>.</li> <li>- Suitable for EAF and ladle furnaces.</li> <li>- Better performance than RP electrodes.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suited for applications requiring current density &gt; 25 A/cm<sup>2</sup>.</li> <li>- Ideal for ultra-high power steelmaking EAFs.</li> <li>- Utilizes high-quality needle coke.</li> </ul>
Ultrahigh Power (UHP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Engineered for extremely demanding conditions.</li> <li>- Current density &gt; 25 A/cm<sup>2</sup>.</li> <li>- Exceptional performance and durability.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizes premium needle coke.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizes premium needle coke.</li> </ul>
Super High Power (SHP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizes premium needle coke.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizes premium needle coke.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizes premium needle coke.</li> </ul>

Above are the types and classifications of electrodes, of which the most widely used in the steel melting process are UHP and SHP graphite electrodes. For example, due to improper use of graphite electrodes in technological processes and operations, electrodes can be broken and damaged. As a result, the metal melting time increases, and the cost of the product increases. If broken graphite electrodes fall into the furnace, carbon content may be added to the slag and stop the melting process in the furnace. This leads to the deterioration of the properties of steel and the decrease in the price of the product by the purchasing companies, and in some cases, non-purchases occur.

**Part 2.** In addition, broken or damaged electrodes cause an increase in the consumption of electrodes and an increase in the price of the product. As a result, the amount of profit metallurgical plants receive from the sale of these products will decrease significantly. Therefore, it is necessary to reduce the consumption of electrodes in order to increase technical and economic indicators in steel production. In many countries (in particular, Uzbekistan) steel smelting furnaces of large and medium capacity are used.

Take graphite electrodes as an example, the production technology of high-quality graphite electrodes for heavy-duty arc furnaces is quite complex. The high cost of charge materials and high power consumption determine the very high cost of special graphite electrodes for heavy-duty furnaces (\$1500-2000 per 1 ton). Because of the high cost of graphite electrodes, the cost of electrodes during the operation of furnaces of ordinary power for smelting carbon steels is 8% of the cost of steel; when operating heavy-duty furnaces, such costs can exceed 15% of the cost of steel, in some cases reaching 30%. The

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

consumption of graphite electrodes fluctuates within a significant range, which during normal operation of furnaces is 4–8 kg/t (in a well-functioning heavy-duty steel-smelting furnace, the total consumption of electrodes was 4 kg/t of steel).

According to the above points, we can say that the consumption of graphite electrodes in EAF steelmaking depends not only on the quality of the electrodes but also on the level of operation and management of steelmaking. While high-quality graphite electrodes are essential, the level of operation and management in the steelmaking process is equally crucial in minimizing electrode consumption and optimizing the overall efficiency of EAF steelmaking operations.

**Part 3.** So what factors influence electrode breakage or failure? When these factors were analyzed, it was studied that there was too much factor dependence. The below in fig. 2 follows the main 3 factors, which are [10].

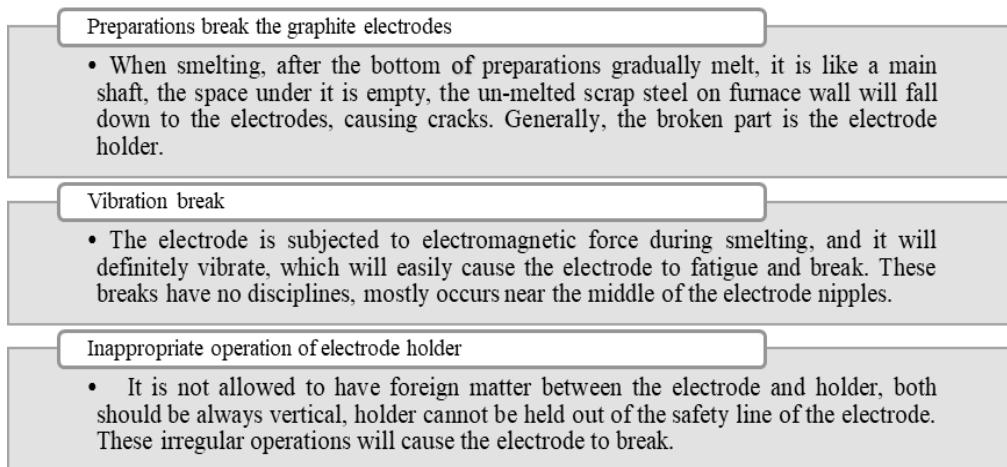


Fig.2. Factors causing breakage and damage of graphite electrodes

To minimize electrode consumption and prevent breakage and failure in steel melting furnaces, it is crucial to employ proper electrode usage techniques. Table 2 illustrates key solution factors that mitigate electrode damage. Preserving the integrity of graphite electrodes during the steel melting process positively impacts both economic efficiency and metal quality.

Table 2

Key solution factors to mitigate electrode damage in steel melting furnaces

Factor	Description
Correct Electrode Phase Sequence	Ensure the correct electrode phase sequence and rotation (counterclockwise direction) to maintain stability and efficiency during the melting process.
Scrap Distribution	Evenly distribute scrap in the furnace, placing larger scrap pieces at the bottom of the furnace to optimize the melting process and reduce stress on electrodes.

Avoid Non-Conductive Materials in Scrap Steel	Prevent the presence of non-conductive materials in scrap steel, as they can interfere with the conductivity of the electric arc and lead to electrode damage.
Proper Electrode Alignment	Align the electrode pillar with the furnace top hole and ensure that the electrode pillar is parallel to maintain efficient energy transfer and electrode longevity.
Maintain Tilting System	Keep the tilting system in good condition and ensure stable operation to maintain the correct angle and position of the electrodes during the melting process.
Avoid Clamping at Electrode Joints and Holes	When using electrode grippers, avoid clamping at the electrode joint and the hole of the electrode joint to prevent mechanical stress and potential damage.

By adhering to these guidelines and best practices, steel melting furnaces can optimize their electrode usage, reduce consumption, and preserve the integrity of graphite electrodes. This, in turn, leads to improved economic efficiency and higher-quality metal production.

Another problem is that during steel production in electric arc furnaces, there are high-energy losses. Firstly, they are associated with the unsatisfactory quality of carbon-graphite electrodes and their improper operation. Also, in below other reasons that reduce the efficiency of the furnace installation are given [6]:

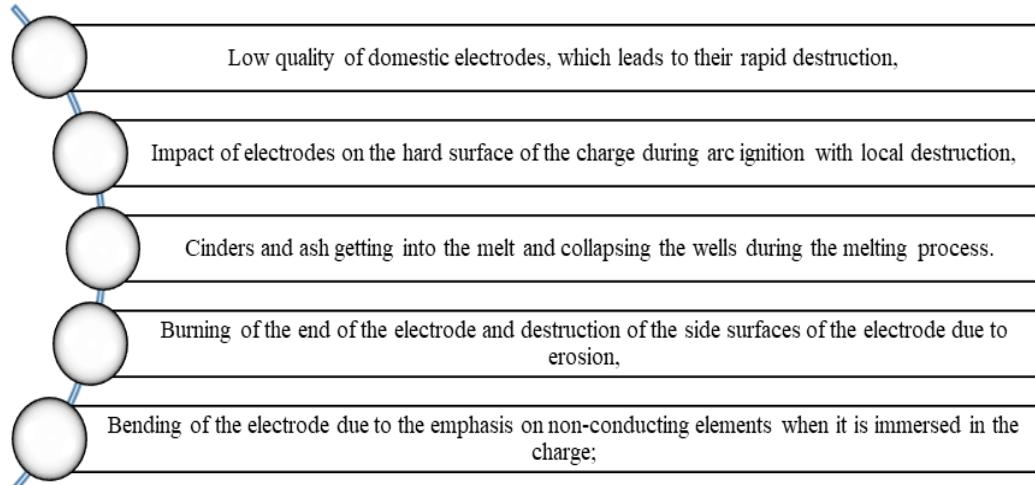


Fig. 3. Factors causing energy waste in steel smelting technology

Based on the above-mentioned issues, there are concerns regarding energy inefficiency, increased electrode consumption, and the adequacy of electrode strength and durability in the steel production process when using electrodes. Addressing these challenges through the provision of solutions enhances the technological process quality.

**Conclusion.** Electrodes ensure high-quality melting of scrap in the technological process. For this, it is important to have accurate information about the types and classification of electrodes and to choose special electrodes. Firstly, in this article, an analysis of the utilization of graphite electrodes in electric arc furnaces for steel production was conducted, examining its manufacturing technology and the associated raw materials technology. This is mainly because of the complexity of the production technology of graphite electrodes and their production according to the requirements of steel melting furnaces, and their price increases. That is why in this article, the consumption of graphite electrodes in the process of steel melting is given, and if the electrodes are damaged or broken, the condition of the consumption of the electrodes and what problems they cause are considered. As well as, the technical characteristics of graphite electrodes, which are the main element of the steel melting process, are given, the problems that may arise in their use in the technological process are analyzed (fig.2), and several solutions are given (table 3). As well as, in this article, suggestions for reducing the consumption of electrodes are given:

1. Low-quality steel scrap or incorrect proportioning can lead to inadequate slag formation, which in turn prolongs the smelting process. Prolonged smelting directly contributes to higher power consumption and increased electrode usage and losses.
2. Mismatched electric furnace power supply equipment and electrode specifications can lead to problems. Electric arc furnace power transmission involves high-current and low-voltage operations. Overloading and prolonged operation can result in the most significant loss and consumption of graphite electrodes.
3. During the oxidation phase, chemical energy is deliberately elevated to enhance smelting intensity. Throughout the smelting process, there is a deliberate increase in the amount of oxygen blown to achieve rapid melting and elevate furnace temperatures within the high-temperature flame. In this furnace environment, electrodes often experience significant issues such as layering and surface oxidation.
4. The technical aspects of electric furnace configuration and operation are critical. This includes choosing the power transmission curve and gear during operation, controlling arc starting and arc stabilization voltage and current, and effectively coordinating the use of long, medium, and short arcs. Additionally, the configuration and utilization of water cooling systems are crucial factors that significantly impact the service life and consumption of electrodes.

### References

1. Hoshimov F.A., Rakhmonov I.U., Niyozov N.N. Technology to reduce energy costs in the electric steel melting shop // E3S Web of Conferences 209, 07017 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907017>.
2. Hoshimov F.A., Rahmonov I.U. Rationing of electricity production in the rolling of ferrous metallurgy // European Science review Scientific journal – № 11–12. – 2014 (November-December). – Austria, Vienna.

---

3. Rakhmonov I.U., Niyozov N.N. Optimization setting of steel-smelting industry in the issue of alloy steels // E3S Web of Conferences, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901077>.
4. Hoshimov F.A., Rasulov A.N., Taslimov A.D., Rakhmonov I.U. The current state of electrometallurgy in Uzbekistan /Hoshimov F.A. et.al. – Vienna: “East West” Assosiation for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2017. – 84 p.
5. Кузнецов Д.М., Коробов В.К. Факторы, влияющие на эксплуатационную стойкость графитированных электродов в дуговых электропечах. //Металлург, 2000. - №6.
6. Маслов Д.В. Определение основных параметров, влияющих на целостность электродных свечей в дуговых печах. // Электротехника. 2013. - №8. – С.43-47.
7. Heikkinen, E. P., & Fabritius, T. (2012). Modelling of the Refining Processes in the Production of Ferrochrome and Stainless Steel. Recent Researches in Metallurgical Engineering-From Extraction to Forming. InTech, 186, 65-88.
8. Cosh, T.A.: "Graphite electrode consumption in electric arc furnaces". J. Iron & Steel Soc., March 1957, p. 328/32.
9. D.V. Maslov, "Development of algorithms and control systems for arc steel-melting furnaces that reduce electrode breakdowns", *PhD Thesis*, 2014.
10. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. and Astashova G.V. The comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces, *2016 2nd Int. Conf. Ind. Eng. Appl. Manuf. (ICIEAM)*, pp. 1-7, 2016.

*Presented by Tashkent State  
Technical university*

УДК 621.323

### ЕМ МАЙДАЛАШ ҚУРИЛМАЛАРИДА ҚЎЛЛАНИЛАЁТГАН АСИНХРОН МОТОРЛАРНИ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ҚИЛИШ ЖАРАЁНЛАРИДА ЧАСТОТАЛИ БОШҚАРИШ ОРҚАЛИ ЭНЕРГИЯ ВА РЕСУРС ТЕЖАШ ТАҲЛИЛИ

Н.Б. Пирматов, А.Т. Паноев

Уибу мақолада ем майдалаши қурилмаларининг асинхрон электр моторининг тезлигини частотали усулда бошқариб энергия тежамкорлигига эришиши келтирилган. Частотавий бошқарши тежамлидир, чунки у асинхрон моторининг тезлигини ростлаши ҳисобига фойдали иши коэффициентини ошириши ва қуввати истрофини камайтиришини таъминлайди. Ем майдалаши қурилмаларини ишга тушириши ва бошқаршида частота ўзгартигич ёрдамида амалга оширилиши қўрсатилган бўлиб, у автомат ва мотор орасида ўрнатилади ва моторнинг айланниш частотасини бошқаради. Электр моторининг тезлигини ўзгартириши учун илгари тишили узатма (шестерёнка) редукторлардан фойдаланилар эди. Бу эса ўз навбатида турли қийинчиликлар келтириб чиқарган. Ишлаб чиқарши технологияларни ўзига хос томонларидан келиб чиқсан холда электр моторининг айланниш сонини камайтириши ёки кўпайтиришига тўғри келса, электр юритмада қўшимча механизмлардан фойдаланиши, ўз навбатида электр моторнинг қувватини ошишига олиб келган. Частота ўзгартичлар ёрдамида бевосита, электр мотор частотасини ўзгартириб айланшилар сонини назорат қилиши мумкин. Бу усулнинг қулийликларидан бири шундаки ток ва айланувчи момент ўртасида мустаҳкам боғлиқлик бўлгани боис, частота ўзгартигич моторни ишга тушириши вақтида ишга тушириши токини пасайтириши имконини беради. Моторни ишга тушириши вақтида мотор силлиқ ишга тушади ва ишга тушириши вақтида электр энергияси тежсалади.

**Калим сўзлар:** энергия тежамкорлик, электр юритма, частота ўзгартигич, оптимал бошқарув, энергетик мезонлар, иичи механизмлар, энергия самарадорлик, бошқарув тизимлари, фойдали иши коэффициенти, қувват коэффициенти.

В статье приведены данные о достижении энергоэффективности за счет частотного управления скоростью асинхронного электромотора установки для измельчения кормов. Частотное управление является энергосберегающим, поскольку повышает коэффициент полезного действия асинхронного двигателя за счет стабилизации скорости асинхронного мотора и снижает потери мощности. Показан режим пуска и управления оборудованием для измельчения кормов применением преобразователя частоты, который устанавливается между автоматическим выключателем и мотором и управляет частотой его вращения. Ранее для изменения скорости электродвигателя использовались шестеренчатые редукторы, что, в свою очередь, приводило к возникновению различных трудностей. При необходимости изменения числа оборотов электромотора, в связи с особенностями технологии производства, применение дополнительных механизмов в

электроприводе приводило к увеличению мощности электромотора. С помощью частотных преобразователей можно непосредственно регулировать число оборотов двигателя, изменяя частоту подаваемого тока. Одним из преимуществ данного метода является то, что преобразователь частоты позволяет уменьшить пусковой ток при пуске мотора. При этом мотор запускается плавно, что позволяет сберегать электроэнергию во время пуска.

**Ключевые слова:** энергосбережение, электропривод, преобразователь частоты, оптимальное управление, энергетические критерии, рабочие механизмы, энергоэффективность, системы управления, КПД, коэффициент мощности.

*In this article, covers the way of the achievement of energy efficiency through frequency control of the speed of asynchronous electric motor of feed grinding equipment. Frequency control is saving because it improves the efficiency of the induction motor by rectifying the speed of the induction motor and reduces power loss. It is shown how to start and control the equipment for grinding feed using a frequency converter, which is installed between the machine and the motor and controls the speed of the motor. Previously, front gearboxes were used to change the speed of the electric motor, which, in turn, led to various difficulties. If it is necessary to reduce or increase the number of revolutions of the electric motor due to the peculiarities of the production technology, the use of additional mechanisms in the electric drive, in turn, led to an increase in the power of the electric motor. With the help of frequency converters, the speed can be directly controlled by changing the frequency of the electric motor. One of the advantages of this method is that since current and torque are closely related, the frequency converter can reduce the starting current when starting the motor. When starting, the motor starts smoothly, which saves energy during startup.*

**Key words:** energy saving, electric drive, frequency converter, optimal control, energy criteria, operating mechanisms, energy efficiency, control systems, efficiency and power factor

**Кириш.** Республикаизда иктисадиётнинг муҳим тармоқларидан бири ҳисобланган электроэнергетикани жадал ривожлантириш ва қишлоқ хўжалиги корхоналаридаги ём майдалаш қурилмаларини эксплуатация қилиш жараёнида, ём майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторларини тезлигини янги технологиялар асосида бошқариш усули орқали, энергия ва ресурс тежамкорликка эришиб, сифатли маҳсулот ишлаб чиқариш ҳозирги куннинг долзарб муаммолардан бири ҳисобланилади. Мазкур соҳанинг ривожланишида Республикаиз Президенти томонидан жуда кўп фармон ва қарорлар қабул қилинган.

Шу фармон ва қарорлардан 2016 йил 22 декабрдаги ПҚ-2692 –сон «Саноат тармоқлари корхоналарининг жисмоний ишдан чиқкан ва маънавий эскирган машина ускуналарини жадал янгилаш, шунингдек ишлаб чиқариш харажатларини камайтиришга оид қўшимча чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 23 август 2017 йил №ПҚ-3238 қарори «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежайдиган технологияларни янада жорий этиш чора-

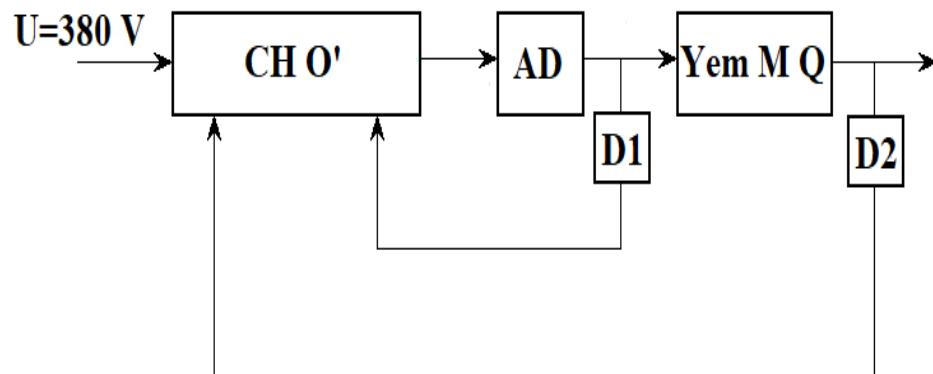
## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли 2017-2021йй «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги жумладан, иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сифимдорлигини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежовчи янги технологияларни кенг табиқ этиш, ишлаб чиқариш унумдорлигини ошириш вазифалари белгиланган. Бундан ташқари Ўзбекистон Республикасининг 1997 йил апрел ойида қабул қилинган «Энергиядан рационал фойдаланиш» (№412-1) қонуни, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012 –сон “2017-2021йилларда ижтимоий соҳа ва саноат соҳаларида энергия самарадорлигини ошириш, қайта тикланувчан энергия манбаларини қўллашни янада кенгайтириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарорларни ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий хуқуқий хужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда мазкур илмий мақола муайян даражада хизмат қилади. Маълумки ҳозирги вақтда Республикаизда қишлоқ хўжалиги соҳаси борган сари такомиллашиб, ривожланиб бормоқда. Ҳозирги кунда қишлоқ хўжалигига қўлланилаётган ем майдалаш қурилмаларидан фойдаланиш ҳамда унга бўлган эҳтиёжлар йилдан-йилга ошиб бормоқда. Маълумки электр станциялар томонидан ишлаб чиқариладиган электр энергия истеъмолининг 70 – 80 фоизи электр моторларига тўғри келади [2]. Шу сабабли бугунги кунда, ем майдалаш қурилмаларидан қўлланиладиган асинхрон электр моторларини эксплуатация қилиш жараёнида уларнинг самарали ишлшини таъминлаш, энергетик қурилмаларнинг электр энергия истеъмоли режимларини замонавий автоматлаштирилган электр тизимлар ёрдамида бошқаришни такомиллаштириш, ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторларининг иш жараёнида содир бўладиган кисқа туташувларни олдини олиш, энергетик қурилмаларнинг таъмири учун кетадиган сарф-харажатларни сезиларли даражада камайтириш, қолаверса электр энергиядан оқилона фойдаланиш ҳамда энергия ва ресурсларни тежашга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шунинг учун ҳам ем майдалаш қурилмаларини эксплуатация қилиш жараёнида энергия тежамкор усувлар орқали эксплуатация қилиш ҳозирги куннинг долзарб муаммоларидан бири ҳисобланилади [6].

**Асосий қисм.** Ҳозирги кунда “Бухоропарранда” АЖ ва “Пахта селексияси, уруғчилиги етиштириш агротехнологиялари илмий тадқиқот институти Бухоро илмий тажриба станцияси (ПСУЕАИТИ Бухоро ИТС)” корхоналари мисолида қўлланилиб келинаётган турли хил қувватдаги, турли хил типдаги асинхрон моторлар ҳар-хил давлатларда ишлаб чиқарилган бўлиб, ем майдалаш қурилмалари қўлланилиб келинмоқда. Бу ем майдалаш қурилмаларидан КДУ-2;0-1, типдаги универсал ем майдалаш қурилмасини оладиган бўлсак, бунда бу ем майдалаш қурилмасининг асинхрон моторини бир неча усувлар ёрдамида ишга тушириш мумкин. Бу универсал ем майдалаш қурилмаси билан буғдой сомони, маккажўхори уруғи, беда пояси, соя широти, буғдой, тариқ, арпа, маккажўхори пояси, гўзапоя, маккажўхори сўтасини майдалашимиз ва бошқа барча қишлоқ хўжалигига етиштириладиган уруғларни ҳам майдалаш имкониятига эга. Бу универсал ем майдалаш қурилмаларини ишга тушириш вақтида, майдалаш қурилмасининг асинхрон моторида жуда катта ишга тушириш токи ҳосил бўлади, бундан ташқари

емларни ёки пояларни бирданига кўп кетиб қолган вақтда, майдалагичнинг асинхрон моторининг айланиш тезлиги пасайиб, юкламаси ошиб кетиши натижасида моторнинг ишлаш муддати қисқаради. Универсал ем майдалаш қурилмасининг асинхрон мотори чулғамлари қизиши натижасида куйиш ҳолатлари ва реактив қувват истеъмол қилишига, электр энергиясининг жуда кўп истроф қилинишига, ресурс истрофгарчилигига олиб келади. Универсал майдалаш қурилмасининг асинхрон моторини ишга тушириш жараёнида, ишга тушириш токи номинал токидан 5-7 баробар юкори бўлади [1]. Бу жараён қисқа муддат давом этади, тезлашиб олганидан сўнг эса, асинхрон мотордаги ток минимал қийматга тушиб кетади. Шунинг учун бу универсал ем майдалаш қурилмасини эксплуатация қилиш жараёнида, қурилманинг асинхрон моторини ишга тушириш токини камайтириш, айланиш тезлигини юкламага мос равишда бошқариш, реактив қувватини қоплаш, таъминот кучланишини стабиллаштириш учун ҳамда электр энергиясини ва ресурс тежаш мақсадида, ишга туширишнинг куйидаги усулларидан фойдаланилади. Шу усуллардан бири бу универсал ем майдалаш қурилмасининг асинхрон моторини тезлигини частота ўзгартгич ёрдамида бошқариш усули хисобланилади [4-8]. Бу универсал ем майдалаш қурилмасини ишга тушириш ва бошқаришда Хитой давлатида ишлаб чиқарилган E100 типли қуввати эса  $P = 37$  кВт га эга бўлган частота ўзгартгич ёрдамида амалга оширилади. У автомат ва асинхрон мотор орасида ўрнатилади ва асинхрон моторнинг айланиш частотаси частота ўзгартгич орқали бошқарилади, натижада электр энергия тежалишига олиб келади [3-11]. Ўтказилган тажрибалар 1- расмда кўрсатилган.

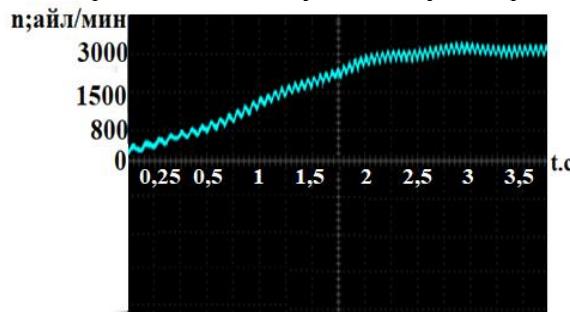


1-rasm. Yem maydalash qurilmalarining asinxron motorini chastotali boshqarishning yopiq funksional sxemasi: CHO' - chastota o'zgartgich; D- asinxron dvigatel; YeMQ - yem maydalash qurilmasi; D1-D2- tezlik datchiklari

Бунда универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторини ишга тушириш ва бошқаришда частота ўзгартгич ёрдамида амалга оширилади. Тезлиги частотани ўзгаририб ростланадиган асинхрон электр юритмаларни статик

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

режимларида электр энергиядан иқтисод қилиш билан бир қаторда динамик режимларида ҳам электр энергиядан самарали фойдаланиш мүмкін [5-10]. Универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторини түғридан түғри-тармоқ кучланишини бошқармасдан ишга тушириш вақтида ишга тушириш токининг номинал статор токига нисбатан 5 – 7 марта катта бўлиши статор чулғамида электр энергия исрофини ошиб кетишига олиб келади, агар асинхрон мотор ва ишчи механизмларининг инерцион моменти катта бўлса, ўтиш жараёни жуда узок давом этади [1]. Натижада статор чулғами изоляциясининг руҳсат этилган хароратидан юқори даражада қизишига олиб келиши ва изоляциянинг ишдан чиқишига олиб келади. Шунинг учун ҳам универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторларини эксплуатация қилиш жараёнида асинхрон моторининг айланиш тезлигини частотани ўзгартириб ростланадиган асинхрон моторларни ишга туширишда частотани маълум конуният бўйича бошқариб ишга тушириш, статор токининг ўта ошиб кетишидан сақлайди ва шунда ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон мотори иссиқлик режими бўйича нормал ишга туширилади [7-12]. Маълумки, универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторини түғридан-түғри ишга тушириш вақтида катта электромагнит моментлари ва токлар юзага келади. Электромагнит моментларининг катта амплитудали силтанишлари асинхрон мотор статор чулғамида хавфли динамик юкланишларни ҳосил қилиши мүмкін ва шунингдек, электр юритманинг кинематик занжирларида механик зўриқишлиарни юзага келтириши ҳам мүмкін [8-11]. Шунинг учун ҳам универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторини ишга тушириш ва тўхтатишларнинг силлиқ кечишини таъминлашда, яъни катта динамик зўриқишлиарни пайдо бўлишига йўл кўйилмаслик асихрон моторининг ишлаш муддатини узайтиради [1].



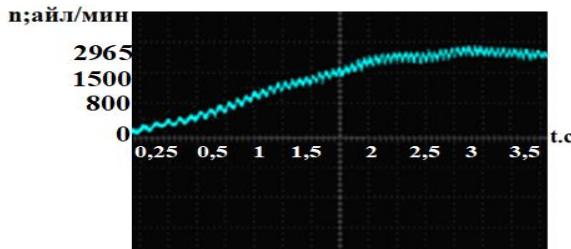
2-расм. Ем майдалаш қурилмасининг қуввати  $P=30$  кВт айланиш тезлиги  $n=3000$  айл/мин бўлган, асинхрон моторининг салт ишлаш режимидағи тармоққа улаб ишга тушуриш тезлигининг осциллограммаси

Биз универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон моторини экспериментал тадқиқотлар ўтказиш жараёнида осциллограмма орқали энергия тежамкорлигига эришиш мумкинлигини аниқлададик. Буни қуйидаги 2-расмда универсал ем майдалаш қурилмасининг қуввати  $P=30$  кВт айланиш тезлиги  $n=3000$

айл/мин бўлган, асинхрон моторининг салт ишлаш режимидағи тармоққа улаб ишга тушириш тезлигининг осциллограммаси кўрсатилган.

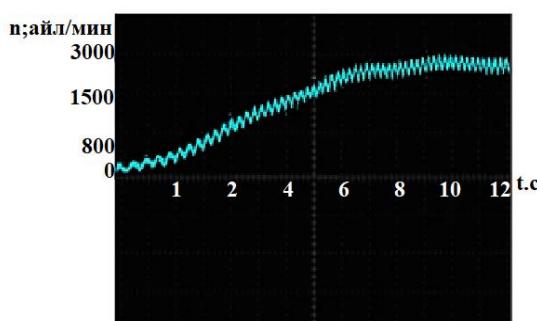
Бу осциллограммадан шуни кўриш мумкинки универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон мотори 2 секундда номинал тезлигка  $n = 2985$  айл/мин га эришишини кўриш мумкин. Демак асинхрон моторида энергия истеъмоли меёрида истеъмол қилаётганигини билиш мумкин.

Кейинги осциллограммада худди шу кучланишдаги ва худди шу қувватдаги асинхрон моторларини юклама режимида ишлаш жараёнидаги тезлигининг осциллограммаси кўрсатилган. Буни қуйидаги 3-расмда универсал ем майдалаш қурилмасининг қуввати  $P = 30$  кВт айланиш тезлиги  $n = 3000$  айл/мин бўлган, асинхрон моторини юклама режимида тармоққа улаб ишга тушириш тезлигининг осциллограммаси кўрсатилган.



3- расм. Ем майдалаш қурилмасининг қуввати  $P = 30$  кВт айланиш тезлиги  $n = 3000$  айл/мин бўлган, асинхрон моторини юклама режимида тармоққа улаб ишга тушириш тезлигининг осциллограммаси

Бу осциллограммадан шуни кўриш мумкинки универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон мотори 3,5 секундда  $n = 2965$  айл/мин га эришади. Демак, асинхрон моторида энергия истеъмоли меёрида эмас. Универсал ем майдалаш қурилмасининг асинхрон мотори оғир режимда, меёридан кўп реактив энергия истеъмол қилиб ишлаётганигини билиш мумкин. Шу сабабли электр энергияси жуда кўп сарф бўлади.



4-расм. Ем майдалаш қурилмасининг қуввати  $P = 30$  кВт айланиш тезлиги  $n = 3000$  айл/мин бўлган, асинхрон моторининг юклама режимида частота ўзгартгич орқали ишга туширишда тезликнинг осциллограммаси

Кейинги осциллограммада худди шу кучланишдаги ва худди шу қувватдаги универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон мотори юклама режимида частота ўзгартгич орқали улаб ишга тушириш осциллограммаси кўрсатилган. Буни

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

---

куйидаги 4-расмда универсал ем майдалаш қурилмасининг қуввати  $P = 30$  кВт айланиш тезлиги  $n = 3000$  айл/мин бўлган, асинхрон моторини юклама режимида частота ўзгартгич орқали тармоққа улаб ишга тушириш тезлигининг осциллограммаси кўрсатилган.

Бу осциллограммадан шуни қўриш мумкинки универсал ем майдалаш қурилмаларининг асинхрон мотори 8,5 секундда номинал тезлиқда  $n = 3000$  айл/мин га яқин тезлиқда эришади. Натижада энергия истеъмоли кам сарфланганлигидан далолат беради.

**Хулоса.** “Бухоропарранда” АЖ ва “Пахта селексияси, уругчилиги етиштириш агротехнологиялари илмий тадқиқот институти Бухоро илмий тажриба станцияси (ПСУЕАТИ Бухоро ИТС) корхоналари мисолида қўлланилиб келинаётган Украина давлатида ишлаб чиқарилган КДУ-2;0-1 типдаги универсал ем майдалаш қурилмасининг асинхрон моторини эксплуатация қилиш жараёнида статик ва динамик режимини оптимал бошқарилишига эришилди, яъни Хитой давлатида ишлаб чиқарилган Е100 типли қуввати эса  $P = 37$  кВт га эга бўлган частота ўзгартгич ёрдамида бошқариш орқали электр энергия истеъмолининг 17% гача тежалишига, асинхрон мотор тезлигини ростлашга, электр юритмани силлиқ ишга тушириб, тўхтатиш орқали электр юритма ФИК ни ошишига ва асинхрон моторнинг қувват исрофини камайтиришни таъминланишига эришилди. Универсал ем майдалаш қурилмасининг асинхрон электр юритма частота ўзгарткичидан тезликни ростлаш жараёнида кучланишни ростлаш векторли усулда амалга оширилиши, тезликни аниқ даражада бўлишини таъминлайди. Электр юритманинг ишончли ишлашини, частотанинг кичик қийматларида моментни оширишини ва динамик исрофларнинг камайиши шартлари тўлиқ бажарилишига эришилди.

### Адабиёт

1. Аллаев Қ.Р. Электромеханик ўткинчи жараёнлар. Ўкув қўлланма.-Т.: “Молия” нашриёти, 2007 йил. -272 б.
2. Baratov R., Pirmatov N., Panoev A., Chulliyev Ya., Ruziyev S. and Mustafoqulov A. Achievement of electric energy savings through controlling frequency convertor in the operation process of asynchronous motors in textile enterprises IPICSE 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1030 (2021) 012161 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012161.
3. Имомназаров А.Т. Асинхрон моторларнинг минимум қувват исрофи режимида ишлаши асослари // Тош ДТУ хабарлари. – Тошкент, 2005, № 2, 33 – 38 б.
4. Ҳошимов О.О., Имомназаров А.Т. Электромеханик тизимларда энергия тежамкорлик. -Тошкент:«ЎАЖБНТ» Маркази, 2004, -96 б.
5. Pirmatov N., Panoev A. Frequency control of asynchronous motors of looms of textile enterprises E3S Web of Conferences, 2020, 216, 01120.
6. Baratov R., Pirmatov N. Low - Speed generator with permanent magnets and additional windings in the rotor for small power wind plants and micro hydro power plants IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 883(1), 012183.

7. Авербах И.А., Барац Е.И., Браславский И.Я., Ишматов З.Ш. Электропривод и автоматизация промышленных установок как средства энергосбережения– Екатеринбург: Свердловск энергонадзор, 2002. – 28 с.
8. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод /Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений.–М.: Издательский центр «Академия», 2004. –256 с.
9. Аллаев К.Р., Хошимов Ф.А. Энергосбережения на промышленных предприятиях. - Т.: Фан, 2011: -207 с.
10. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока - Новоуральск: НГТИ, 2001. - 250 с.
11. Хашимов А.А., Арипов Н.М. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод шелкомотания. Монография. -Ташкент: ТГТУ, 2002. – 144 с.
12. Авербах И.А., Барац Е.И., Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Электропривод и автоматизация промышленных установок как средства энергосбережения /– Екатеринбург: Свердловгосэнергонадзор, 2002. – 28 с.
13. Schneider Electric. Устройства плавного пуска и торможения Altistart 48. Каталог 2002. ART. 011237RU.
14. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для вузов / Г.Б. Онищенко.– М.: РАСХН, 2003. – 320 с.

*Тошкент давлат техника университети ва  
“ТИҚҲММИ”МТУ Бухоро табиий ресурсларни  
бошқарни институтлари томонидан тақдим этилган*

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРА В  
КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ГОРОДА ТАШКЕНТА

**Н.Р. Авезова, А.Э. Хайтмухамедов, К.А. Самиев**

Бугунги кунда энергиянинг анъанавий турлари, жумладан, нефт ва газ истеъмолининг тобора ортиб бораётгани, қазиб олинадиган ёқилги захираларининг камайиши билан бир қаторда, тоза ва қайта тикланадиган энергия манбаларига ҳар қачонгидан ҳам кўпроқ эътибор қаратишни талаб этади. Бундай шароитда қуёш энергиясидан иссиқлик ва электр энергиясини ишилаб чиқаришининг энг ишончилийларидан бири сифатида эътироф этилган. Ушбу мақолада Тошкент шаҳрининг иқлим шароитида ишилаб чиқилган DGU 17910 дастурий маҳсулотидан фойдаланган ҳолда параболоцилиндрик контцентраторининг (ПК) иссиқлик параметрлари натижаларини текшириши бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган. Тадқиқот натижалари шуну кўрсатади, Тошкент шаҳри учун йилик сиртга тушувчи нормал нур қуёш энергиясининг максимал қиймати  $12626,29 \text{ МЖ/м}^2$ , олинган фойдали энергия ва иссиқлик энергия йўқотишлари эса мос равишида  $7679,805 \text{ МЖ/м}^2$  ва  $4946,485 \text{ МЖ/м}^2$  ни ташкил қилади. Шу билан бирга, Кёррен-Геигер иқлим таснифи бўйича Тошкент ёзги иссиқ ўрта ер денгизи иқлими (*Csa*) га эга [1-3] ва унинг иқлим шароитида ПК ўртача ойлик иссиқлик самарадорлиги 73,29% ни ташкил қиласи.

**Калим сўзлар:** параболоцилиндрик контцентратор, тўғридан-тўғри нормал нурланиш, қуёш энергияси, иссиқлик самарадорлиги, фойдали энергия.

На сегодняшний день постоянно растущее потребление традиционных видов энергии и энергоносителей, в том числе нефти и газа, помимо уменьшения запасов ископаемого топлива, как никогда требует большего внимания к чистым и возобновляемым источникам энергии. В этих условиях солнечная энергетика признана одним из самых надежных вариантов получения тепловой и электрической энергии. В данной работе представлены методика расчета и результаты исследований по валидации результатов энергетических показателей, по части преобразования солнечной энергии в тепловую энергию параболоцилиндрического концентратора (ПЦК), с помощью разработанного программного продукта DGU 17910 в климатических условиях города Ташкента. Результаты исследований показывают, что максимальное значение поступающей солнечной энергии на нормальную к лучу поверхность для города Ташкента в год составляет  $12626.29 \text{ МДж/м}^2$ , при этом получаемая полезная энергия и потери тепловой энергии равняются  $7679.805 \text{ МДж/м}^2$  и  $4946.485 \text{ МДж/м}^2$ , соответственно. При этом отметим, что Ташкент имеет горячий летний средиземноморский климат (*Csa*) по

классификации климатов Кёппена-Гейгера [1-3], и в его климатических условиях параболоцилиндрический концентратор обладает среднемесячной тепловой эффективностью до 73,29%.

**Ключевые слова:** параболоцилиндрический концентратор, прямая нормальная радиация, солнечная энергия, тепловая эффективность, полезная энергия.

*Today, the ever-increasing consumption of traditional forms of energy, including oil and gas, in addition to reducing fossil fuel reserves, requires more attention than ever to clean and renewable energy sources. In these conditions, solar energy is recognized as one of the most reliable options for generating thermal energy and electricity. This paper presents the calculation method and the results of studies on validating the results of energy indicators, regarding the conversion of solar energy into thermal energy of a parabolic trough concentrator, using the developed software product DGU 17910 in the climatic conditions of the city of Tashkent. The results of this study show that the maximum value of input solar energy on the surface normal to the beam for the city of Tashkent per year is 12626.29 MJ/m<sup>2</sup>, while the received useful energy and thermal energy losses are equal to 7679.805 MJ/m<sup>2</sup> and 4946.485 MJ/m<sup>2</sup>, respectively. On the other hand, Tashkent according to the Köppen-Geiger climate classification has a hot-summer Mediterranean climate (Cs<sub>a</sub>) [1-3] and in its climatic conditions parabolic trough collector has an average monthly thermal efficiency of up to 73.29%.*

**Key words:** parabolic trough collector, direct solar radiation, solar energy, thermal efficiency, useful energy.

**Введение.** В связи с активным ростом численности населения и промышленности развитием выросли показатели потребления энергии в мировой экономике. За последние годы глобальное расходование энергоресурсов удвоилось, а к концу века ожидается его утройение [4]. Следовательно, технический прогресс и экономический рост стран будут зависеть, главным образом, от адекватного преобразования и использования источников энергии. В настоящий момент чрезмерное использование ископаемого топлива в различных сферах жизни и промышленности приводит к огромным изменениям климата и глобальному потеплению. Таким образом, необходимость использования чистых видов топлива и энергии имеет первостепенное значение. Жизнеспособной альтернативой для удовлетворения спроса на энергию является разработка технологий, максимально использующих потенциал возобновляемых ресурсов [5]. В связи с этим, многие страны в настоящее время приступили к использованию возобновляемых источников энергии из-за растущего спроса и нехватки невозобновляемой энергии, используемой для охлаждения, нагрева воздуха и воды, в крупных и мелких отраслях промышленности, в целях орошения и производства электроэнергии [6]. Некоторые системы, такие как фотоэлектрические панели, непосредственно преобразуют солнечную энергию в электричество [7], а некоторые системы, такие как ПЦК, преобразуют солнечное излучение в электрическую и одновременно в тепловую

энергию [8,9]. ПЦК позволяет быть более экономичным и безопасным для окружающей среды по сравнению с солнечными коллекторами с вакуумными трубками последнего поколения (ETC-20) и плоскими солнечными коллекторами (FPC-A26), доступными на рынке [10]. Он имеет приемлемую стоимость около 275 евро/м<sup>2</sup> [11] и среднегодовую оптическую эффективность 60% [12]. Кроме того, в ПЦК используются простые конструкции, требующие меньшего количества материала для получения коэффициентов концентрации от 15 до 45, и они эффективно работают при температурах до 550°C с расплавленными солями и до 400°C с термальными маслами [13–16].

В последние годы использование ПЦК в мире в основном наблюдается в бытовых и промышленных масштабах [17]; например, в бытовых условиях: в виде нагрева воды, тепла для промышленных процессов [18–22], производства солнечного пара [23], солнечной химии [24], процессов дегидратации [25], орошения [26], солнечного охлаждения [27], солнечной печи [28,29], абсорбционного теплового насоса [30], производства электроэнергии [31] и т. д. Однако их использование может быть расширено в других областях, поможет сократить потребление ископаемого топлива и ограничить выбросы парниковых газов. Хотя основным недостатком ПЦК является то, что характеристики теплопередачи зависят от погоды, производительности рециркуляции, производительности жидкого теплоносителя (ЖТН) и условий эксплуатации, ПЦК по-прежнему обеспечивают более высокую тепловую эффективность, чем другие системы концентраторов [10,32].

В связи с вышеупомянутым, имеется интерес к использованию ПЦК в отраслях экономики Узбекистана, преимущественно в теплый период года для получения среднепотенциального тепла [33-35].

В настоящей работе предложены результаты исследований по влиянию внешних климатических факторов на основные энергетические показатели ПЦК для города Ташкента.

**Описание системы ПЦК.** Для изучения влияния метеорологических и климатических показателей конкретной местности на вышеуказанные основные энергетические показатели рассмотрим эталонный ПЦК с точными характеристиками и размерами. В связи с этим, авторами, в качестве объекта исследования был выбран ПЦК, представленный в работе [36] (в Сандийской национальной лаборатории (СНЛ)) для выполнения численного моделирования. На рис.1 показана фотография ПЦК СНЛ, который является эталоном численного моделирования в настоящей работе, весогабаритные и оптико-энергетические показатели которого указаны в табл.1.



Рис. 1. ПЦК СНЛ [37]

Таблица 1

Характеристики ПЦК СНЛ

Символ	Параметр	Значение	Ед. изм.
$W$	Ширина	5	м
$L$	Длина	7.8	м
$D_{\text{рес.вн.}}$	Внутренний диаметр ресивера	$66 \cdot 10^{-3}$	м
$D_{\text{рес.нар.}}$	Наружный диаметр ресивера	$70 \cdot 10^{-3}$	м
$D_{\text{пок.вн.}}$	Внутренний диаметр наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера	$109 \cdot 10^{-3}$	м
$D_{\text{пок.нар.}}$	Наружный диаметр наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера	$115 \cdot 10^{-3}$	м
$F$	Фокусное расстояние	1.71	м
$P_{\text{окр.воз.}}$	Давление внешней среды	101	кПа
$\rho_{\text{отр.}}$	Отражательная способность концентратора	0.83	-
$\gamma$	Коэффициент перехвата	0.99	-
$\varepsilon_{\text{рес.}}$	Излучательная способность ресивера	0.14	-
$\varepsilon_{\text{пок.}}$	Излучательная способность наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера	0.9	-
$\sigma$	постоянная Стефана-Больцмана	$5.67 \cdot 10^{-8}$	Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup>
$\tau$	Коэффициент пропускания наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера	0.95	-
$\alpha$	Поглотительная способность ресивера	0.96	-
$f_{\text{рес.}}$	Геометрический коэффициент испускаемого излучения ресивером	1	-
$f_{\text{ист.рад.}}$	Геометрический коэффициент солнечной концентрации	0.001537	-
$V$	Скорость объемного потока	50	л/мин
$M$	Массовый расход теплоносителя	0.716	кг/с
$T_{\text{вн.}}$	Входная температура теплоносителя	373.15	К
$K_{\text{пок.}}$	Теплопроводность наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера	0.185	Вт/мК
-	Тип жидкости	Syltherm 800	-
-	Тип коллектора	LS-2	

Для изучения основных теплотехнических параметров таких, как выходная температура рабочей жидкости с ресивера и энергетический КПД ПЦК, относительно каждого месяца года, была предложена численная модель, которая

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

учитывает влияние климатических показателей местности. Входными данными для данной модели являются климатические данные города Ташкента, включающие в себя температуру окружающей среды, интенсивность солнечного излучения, скорость ветра и т.д., в соответствии с [38] (рис.3).

Распишем уравнение теплового баланса для рассматриваемой системы:

$$\dot{Q}_{mn.,вх.} + \dot{Q}_{сол.} = \dot{Q}_{mn.,вых.} + \dot{Q}_{ном.}; \quad (1)$$

где  $\dot{Q}_{сол.}$  - падающая прямая солнечная радиация на поверхность концентратора,  $\dot{Q}_{mn.,вх.}$  - количество теплоты теплоносителя на входе в ресивер,  $\dot{Q}_{mn.,вых.}$  - количество теплоты теплоносителя на выходе из ресивера,  $\dot{Q}_{ном.}$  - тепловые потери из ресивера.

Падающая прямая солнечная радиация на поверхность концентратора определяется по уравнению [39] :

$$\dot{Q}_{сол.} = G \cdot A_{апер.}; \quad (2)$$

где  $G$  - падающая прямая солнечная радиация на  $1 \text{ м}^2$  поверхности концентратора, а  $A_{апер.}$  - площадь апертуры (перпендикулярного изображения) концентратора.

Из-за наличия оптических потерь часть солнечной энергии, падающей на поверхность концентратора, отражается от поверхности концентратора, и отраженные лучи падают на поверхность ресивера [40]:

$$\dot{Q}_{погл.} = \eta_{опт.} \cdot \dot{Q}_{сол.} \quad (3)$$

В уравнении (3) параметр  $\eta_{опт.}$  указывает соотношение поглощенного излучения к падающей прямой солнечной радиации на поверхность концентратора, и его величина может быть вычислена по уравнению (4):

$$\eta_{опт.} = \rho_{отр.} \cdot \tau \cdot \alpha \cdot r; \quad (4)$$

где  $\rho_{отр.}$  - коэффициент отражения концентратора,  $\tau$  - коэффициент пропускания наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера,  $\alpha$  - коэффициент лучепоглощения абсорбера (внутренней трубы),  $r$  - коэффициент перехвата.

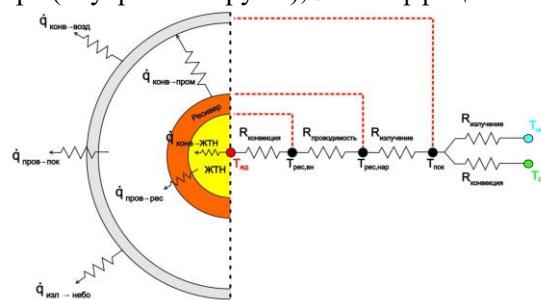


Рис. 2. Поперечное сечение солнечного концентратора

Для получения основных тепловых уравнений необходимо учитывать все виды теплообмена в системе параболоцилиндрического концентратора. На рис.2 представлена принципиальная схема тепломассообменных процессов, в которых

учитываются теплопередача и тепловое сопротивление различных компонентов системы. Поток полезной энергии, переданной жидкости вычисляется по (5) [41]:

$$\dot{Q}_{\text{пол.}} = \dot{Q}_{mn, \text{вых}} - \dot{Q}_{mn, \text{вх.}} = M_{mn} \cdot C_p \cdot (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}). \quad (5)$$

Поскольку температура жидкости на выходе из концентратора в (5) неизвестна, уравнение (6) можно использовать для расчета полезной энергии [40]:

$$\dot{Q}_{\text{пол.}} = F_{\text{отв.}} \cdot [(G \cdot \eta_{\text{опт.}} \cdot A_{\text{апер.}}) - (A_{\text{рес.}} \cdot U_{\text{пот.}} \cdot (T_{\text{вх.}} - T_{\text{окр.}}))]; \quad (6)$$

где  $F_{\text{отв.}}$  - коэффициент теплоотвода,  $A_{\text{рес.}}$  - площадь боковой поверхности трубы абсорбера,  $U_{\text{пот.}}$  - коэффициент теплопередачи концентратора,  $T_{\text{окр.}}$  - температура окружающей среды. Кроме того,  $F_{\text{отв.}}$  определяется по уравнению (7) [42]:

$$F_{\text{отв.}} = \frac{M_{\text{тп.}} \cdot C_p}{A_{\text{рес.}} \cdot U_{\text{пот.}}} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-A_{\text{рес.}} \cdot U_{\text{пот.}} \cdot F'}{M_{\text{тп.}} \cdot C_p} \right) \right]. \quad (7)$$

В уравнении (7)  $F'$  представляет собой коэффициент эффективности концентратора, и его величина получается из уравнения (8):

$$F' = \frac{\frac{1}{U_{\text{пот.}}}}{\left( \frac{1}{U_{\text{пот.}}} + \frac{D_{\text{рес.нар}}}{h_{\text{пок.вн.жд.}} \cdot D_{\text{рес.вн}}} + \frac{D_{\text{рес.нар}}}{2 \cdot K_{\text{рес.}}} \cdot \log \left( \frac{D_{\text{рес.вн}}}{D_{\text{рес.нар}}} \right) \right)}; \quad (8)$$

где  $D_{\text{рес.вн}}$  и  $D_{\text{рес.нар}}$  - внутренний и наружный диаметры трубы ресивера соответственно. Кроме того,  $h_{\text{пок.вн.жд.}}$  является коэффициентом конвекционной теплопередачи жидкости и рассчитывается по уравнению (9):

$$h_{\text{пок.вн.жд.}} = \frac{Nu_{\text{вн.жд.}} \cdot K_{\text{вн.жд.}}}{D_{\text{рес.вн}}}. \quad (9)$$

Число Нуссельта ( $Nu_{\text{вн.жд.}}$ ) для  $Re < 2300$  может быть получено из уравнения (10) [43]:

$$Nu_{\text{вн.жд.}} = 0.023 \times Re_{\text{вн.жд.}}^{0.8} Pr_{\text{вн.жд.}}^{0.4}; \quad (10)$$

где  $Pr_{\text{вн.жд.}}$  и  $Re_{\text{вн.жд.}}$  - число Прандтля и число Рейнольдса жидкости внутри трубы, соответственно.

Предположим, что на расстоянии между ресивером (внутренняя труба) и наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера имеется вакуум, коэффициент потерь концентратора ( $U_{\text{пот.}}$ ) получается из уравнения (11) [40]:

$$U_{\text{пот.}} = \left[ \frac{1}{h_{\text{рес.рес.вн}}} + \frac{1}{\frac{A_{\text{рес.}}}{A_{\text{пок.}}} \cdot (h_{\text{пок.вн.жд.}} + h_{\text{рес.вн.жд.}})} \right]^{-1}; \quad (11)$$

где  $A_{\text{пок.}}$  - площадь наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера,  $h_{\text{пок.вн.жд.}}$  - коэффициент конвекционной теплопередачи между наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера и окружающей средой,  $h_{\text{рес.вн.жд.}}$  - коэффициент лучистой теплопередачи между наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера и окружающей средой,  $h_{\text{рес.вн.жд.}}$  - коэффициент лучистой теплопередачи между ресивером (внутренняя труба) и наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера.

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Коэффициент лучистой теплоотдачи между ресивером (внутренняя труба) и наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера рассчитывается по уравнению (12) [40]:

$$h_{\text{pec,pec} \rightarrow \text{пок}} = \frac{\sigma (T_{\text{pec}}^2 + T_{\text{пок}}^2) + (T_{\text{pec}} + T_{\text{пок}})}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{pec}}} + \left( \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{пок}}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{A_{\text{pec}}}{A_{\text{пок}}} \right) \right)}; \quad (12)$$

где  $T_{\text{pec}}$  - температура поверхности ресивера (внутренняя труба), а  $T_{\text{пок}}$  - температура поверхности наружного светопрозрачного ограждения (трубы) ресивера, которые определяются по следующему уравнению:

$$T_{\text{pec}} = T_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{пол}}}{A_{\text{pec}} \cdot U_{\text{пот}} \cdot F_{\text{отв}}} \cdot (1 - F_{\text{отв}}); \quad (13)$$

$$T_{\text{пок}} = \frac{A_{\text{пок}} \cdot h_{\text{pec,pec} \rightarrow \text{пок}} \cdot T_{\text{pec}} + A_{\text{пок}} \cdot (h_{\text{pec,пок} \rightarrow \text{окр}} + h_{\text{пок,пок} \rightarrow \text{окр}}) \cdot T_{\text{окр}}}{A_{\text{пок}} \cdot h_{\text{pec,pec} \rightarrow \text{пок}} + A_{\text{пок}} \cdot (h_{\text{pec,пок} \rightarrow \text{окр}} + h_{\text{пок,пок} \rightarrow \text{окр}})}; \quad (14)$$

В дальнейшем коэффициент конвективной теплоотдачи между наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера и окружающей средой ( $h_{\text{пок,пок} \rightarrow \text{окр}}$ ) определяется по уравнению (15) [43]:

$$h_{\text{пок,пок} \rightarrow \text{окр}} = \frac{Nu_{\text{окр,воз}} \cdot K_{\text{окр,воз}}}{D_{\text{пок,нар}}}; \quad (15)$$

где  $Nu_{\text{окр,воз}}$  - число Нуссельта, определяется по уравнению (16) [43]:

$$Nu_{\text{окр,воз}} = 0.193 \cdot Re_{\text{окр,воз}}^{0.618} \cdot Pr_{\text{окр,воз}}^{0.618}; \quad (16)$$

Коэффициент лучистой теплоотдачи между наружным светопрозрачным ограждением (трубы) ресивера и окружающей средой ( $h_{\text{pec,пок} \rightarrow \text{окр}}$ ) рассчитывается по уравнению (17) [44]:

$$h_{\text{pec,пок} \rightarrow \text{окр}} = \varepsilon_{\text{пок}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{пок}}^2 + T_{\text{небо}}^2) \cdot (T_{\text{пок}} + T_{\text{небо}}),; \quad (17)$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана, а  $T_{\text{небо}}$  - температура небосвода, полученная из уравнения (18) [39]:  $T_{\text{небо}} = 0.05532 \cdot T_{\text{окр}}^{1.5};$   $(18)$

После расчета полезного тепла по уравнению (6) с использованием уравнения (19) можно рассчитать величину тепловых потерь по (19):

$$\dot{Q}_{\text{пот}} = \dot{Q}_{\text{сол}} - \dot{Q}_{\text{пол}}. \quad (19)$$

Тепловая эффективность системы стандартно определяется по следующему уравнению [45]:  $\eta_{\text{тепловой}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{сол}}} \cdot 100.$   $(20)$

**Валидация математической модели.** Перед тем как представить результаты численного моделирования необходимо проверить достоверность алгоритма расчетов представленных ПЦК DGU 17910 (разработанного авторами программного продукта по определению тепловых показателей). С этой целью результаты численного моделирования были сопоставлены с эмпирическими результатами исследования, проведенного в [36]. Стоит отметить, что условия численного моделирования полностью соответствовали эмпирическим результатам указанным в

[36], исходные данные которого получены в табл. 1. Результаты проверки выходной температуры рабочего тела и тепловой эффективности представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты валидации теплотехнических показателей ПЦК с помощью тестов СНЛ

Случай	$G_b$	$T_{окл}$	$T_{эк}$	$V$	$T_{вых.} (^{\circ}К)$			$\eta_{тепл.} (%)$		
	$Bm/m^2$	$K$	$K$	$m^3/сек$	Эксп [10]	Модель	Ошибка (%)	Эксп [10]	Модель	Ошибка (%)
1	933.7	294.35	375.35	47.7	397.15	397.74	0.15	72.51	72.306	0.28
2	968.2	295.55	424.15	47.8	446.45	447.4	0.21	70.90	71.327	0.60
3	982.3	297.45	470.65	49.1	492.65	493.82	0.24	70.17	70.15	0.03
4	909.5	299.45	523.85	54.7	542.55	543.5	0.17	70.25	68.33	2.73
5	937.9	299.35	570.95	55.5	589.55	591.47	0.32	67.98	66.433	2.28
6	880.6	301.95	572.15	55.6	590.35	591.35	0.17	68.92	66.253	3.87
7	903.2	300.65	629.05	56.3	671.23	649.43	3.36	62.34	63.371	1.65
8	920.9	304.25	652.65	56.8	647.15	673.84	3.96	63.82	62.352	2.30
Сред. знач.							1.1			1.7

Средние значения погрешности теплового КПД и выходной температуры теплоносителя из ресивера составили 1,1% и 1,7%, соответственно. Результаты сравнительных исследований по основным параметрам ПЦК показывают достоверность численной модели с высоким порядком точности.

**Результаты и обсуждение.** Для анализа основных показателей ПЦК была разработана численная модель и программный продукт №DGU 17910, после чего исследовано влияние климатических изменений на её энергетические параметры.

Входными данными для вышеупомянутой программы являются климатические данные Ташкента, включающие в себя температуру окружающей среды, интенсивность солнечного излучения, скорость ветра и т.д. в соответствии с [38] (рис.3). Таким образом, выходными данными являются выходная температура рабочей жидкости и энергетический КПД, относящиеся к каждому месяцу года.

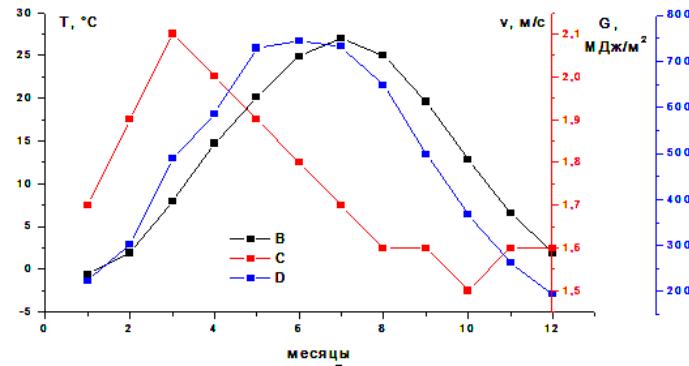


Рис. 3. Общая характеристика климатических условий Ташкента

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

На рис.4 показан энергетический баланс системы в течение года для Ташкента. Согласно рис.4 максимальное значение поступающей солнечной энергии в Ташкенте является июль месяц, а поступающая и полезная энергия в июне месяце и составляют 1286,19 МДж/м<sup>2</sup> и 818,52 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно. При этом минимальное значение поступающей солнечной энергии получается в январе месяце, а полезной энергии в декабре месяце и равняются 679,21 МДж/м<sup>2</sup> и 452,6 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно.

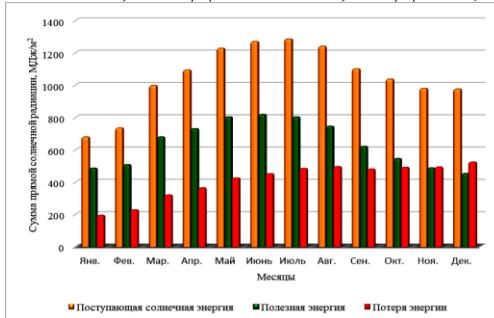


Рис.4. Диаграмма энергетического баланса ПЦК для Ташкента в течение года

Применение энергетического баланса и исследование связанных с ним параметров климатических изменений в разные месяцы - трудоемкий и сложный процесс. В этом отношении представляется полезным использовать концепцию тепловой эффективности, которая является наиболее фундаментальным параметром для описания поведения ПЦК. На рис.5 показана тепловая эффективность ПЦК в Ташкент в разные месяцы года.

Согласно рис.5, максимальное значение тепловой эффективности ПЦК для климатических условий Ташкента наблюдалось в июле месяце, так как значение прямой солнечной радиации в данном месяце был максимальным. В свою очередь, минимальное значение тепловой эффективности наблюдается в январе месяце. На основании рис.5 можно заметить, что, максимальное значение поступающей солнечной энергии для города Ташкента в год составляет 12626,29 МДж/м<sup>2</sup>, а получаемая полезная энергия и потери энергии равняются 7679,805 МДж/м<sup>2</sup> и 4946,485 МДж/м<sup>2</sup>, соответственно.

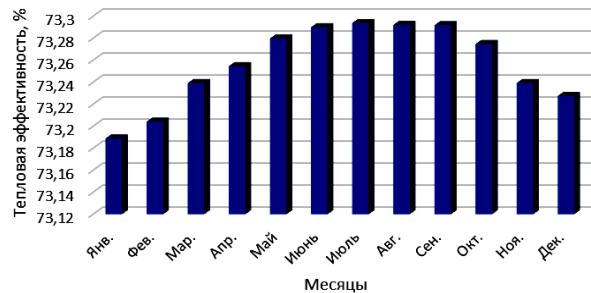


Рис.5. Среднемесячная тепловая эффективность ПЦК для Ташкента в течение года

**Заключение.** В работе изучены основные теплотехнические показатели ПЦК на основе существующих методик с учетом климатических и актинометрических данных местности. В этом отношении разработана численная модель, которая соответствует эмпирическим исследованиям, представленным в [36]. Результаты проверки предложенной математической модели с помощью эмпирической модели были проверены фактами, и характеристики, которые соответствуют ПЦК, были смоделированы для климатических условий Ташкента.

Энергетический анализ показывает, что Ташкент, с жарким летним средиземноморским климатом (Csa) по классификации климатов Кёппена-Гейгера, является оптимальным климатом для системы параболоцилиндрического концентратора с тепловой эффективностью до 73,29%.

Полученные результаты и предложенные методы расчета в данном исследовании, могут служить руководством для выполнения проектно-изыскательских работ по созданию тепловых энергосистем на основе ПЦК для получения среднепотенциального тепла.

### Литература

1. Geiger, R. (1961) überarbeitete Neuausgabe Von Geiger, R. Köppen Geiger/Klima der Erde. (Wandkarte 1:16 Mill.).
2. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>.
3. Tuoliewubieke Diliñuer, Jun-Qiang Yao, Jing Chen, Wei-Yi Mao, Lian-Mei Yang, Humaerhan Yeernaer, Yu-Hang Chen. “Regional drying and wetting trends over Central Asia based on Köppen climate classification in 1961–2015”, Advances in Climate Change Research, Vol. 12, Issue 3, pp. 363-372, 2021.
4. International Renewable Energy Agency. IRENA (2019), global energy transformation: a roadmap to 2050. 2019. <https://www.h2knowledgencentre.com/content/researchpaper1605> .
5. Pandey B, Karki A. Hydroelectric energy. Renewable energy and the Environment; 2016. <https://doi.org/10.1201/9781315374840>.
6. Ali Jaber Abdulhamed, Nor Mariah Adam, Mohd Zainal Abidin Ab-Kadir, and Abdul Aziz Hairuddin. “Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, pp. 822-831, 2018.
7. S.E. Frid, V.M. Simonov, N.V. Lisitskaya, N.R. Avezova and A.E. Khaitmukhamedov. “Efficiency of Solar Trackers and Bifacial Photovoltaic Panels for Southern Regions of the Russian Federation and the Republic of Uzbekistan”, Applied Solar Energy, Vol. 56, Issue 6, pp. 425–430, 2020.
8. S.K. Sansaniwal, V. Sharma, and J. Mathur. “Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: a comprehensive review”, Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 82, pp. 1576-1601, 2018.

9. W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong, and L. Linhua. "Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: a comprehensive review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 79, pp. 1314-1328, 2017.
10. Fathabadi H. Novel low-cost parabolic trough solar collector with TPCT heat pipe and solar tracker: performance and comparing with commercial flat-plate and evacuated tube solar collectors. *Sol. Energy* 2020;195:210–22. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.057>.
11. Cocco D, Cau G. Energy and economic analysis of concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors. *Proc Inst Mech Eng Part A J Power Energy* 2015;229:677–88. <https://doi.org/10.1177/0957650915587433>.
12. Kincaid N, Mungas G, Kramer N, Wagner M, Zhu G. An optical performance comparison of three concentrating solar power collector designs in linear Fresnel, parabolic trough, and central receiver. *Appl. Energy* 2018;231:1109–21. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.153>.
13. Duffie J, Beckman W. *Solar engineering of thermal processes*. second ed. New York: USA: John Wiley and Sons; 1991.
14. Kalogirou S. *Solar Energy Eng* 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5>.
15. Fuqiang W, Ziming C, Jianyu T, Yuan Y, Yong S, Linhua L. Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: a comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017;79:1314–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.174>.
16. Yang M, Moghimi MA, Zhu Y, Qiao R, Wang Y, Taylor RA. Optical and thermal performance analysis of a micro parabolic trough collector for building integration. *Appl. Energy* 2020;260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114234>.
17. Coccia, G. Di Nicola, and M. Sotte. "Design, manufacture, and test of a prototype for a parabolic trough collector for industrial process heat", *Renew. Energy*, Vol. 74, pp. 727-736, 2015.
18. Larcher M, Rommel M, Bohren A, Frank E, Minder S. Characterization of a parabolic trough collector for process heat applications. *Energy Procedia*; 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.313>.
19. Montesa IEP, Beniteza AM, Chaveza OM, Herrera AEL. Design and construction of a parabolic trough solar collector for process heat production. *Energy Procedia* 2014;57:2149–58. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.181>.
20. Fernández-García A, Rojas E, Pérez M, Silva R, Hernández-Escobedo Q, Manzano-Agugliaro F. A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat. *J. Clean Prod* 2015;89:272–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.018>.
21. Clark JA. An analysis of the technical and economic performance of a parabolic trough concentrator for solar industrial process heat application. *Int J Heat Mass Tran* 1982;25:1427–38. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(82\)90136-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(82)90136-3).

22. Kizilkan O, Kabul A, Dincer I. Development and performance assessment of a parabolic trough solar collector-based integrated system for an ice-cream factory. *Energy* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.098>.

23. Thomas A. Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators. *Energy Convers Manag* 1996;37:215–45. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)00162-7](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00162-7).

24. Oelgemoller M, Healy N, De Oliveira L, Jung C, Mattay J. Green photochemistry: solar-chemical synthesis of Juglone with medium concentrated sunlight. *Green Chem* 2006. <https://doi.org/10.1039/b605906f>.

25. Ullah F, Kang M. Impact of air flow rate on drying of apples and performance assessment of parabolic trough solar collector. *Appl Therm Eng* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.101>.

26. Jafari Mosleh H, Mamouri SJ, Shafii MB, Hakim Sima A. A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic through collector. *Energy Convers Manag* 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.028>.

27. Balghouthi M, Ali ABH, Trabelsi SE, Guizani A. Optical and thermal evaluations of a medium temperature parabolic trough solar collector used in a cooling installation. *Energy Convers Manag* 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.095>.

28. Noman M, Wasim A, Ali M, Jahanzaib M, Hussain S, Ali HMK, et al. An investigation of a solar cooker with parabolic trough concentrator. *Case Stud Therm Eng* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100436>.

29. Mussard M, Gueno A, Nydal OJ. Experimental study of solar cooking using heat storage in comparison with direct heating. *Sol Energy* 2013. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.015>.

30. Wang F, Feng H, Zhao J, Li W, Zhang F, Liu R. Performance assessment of solar assisted absorption heat pump system with parabolic trough collectors. *Energy Procedia*; 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.157>.

31. Elakhdar M, Landoulsi H, Tashtoush B, Nehdi E, Kairouani L. A combined thermal system of ejector refrigeration and Organic Rankine cycles for power generation using a solar parabolic trough. *Energy Convers Manag* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111947>.

32. Singh RK, Lund DB, Buelow FH. Application of solar energy in food processing IV. Effect of collector type and hot water storage volume on economic feasibility. *Trans ASAE (Am Soc Agric Eng)* 1983;26:1580–3. <https://doi.org/10.13031/2013.34173>.

33. A.E. Khaitmukhamedov. “Development Dynamics of Concentrating Solar Power Technologies”, *Applied Solar Energy*, Vol. 58, Issue 2, pp. 318 – 321, 2022.

34. А.Э. Хайтмухамедов, У.К. Мирназамутдинов. Анализ рынка, проектные разработки и глобальные мощности концентрированной солнечной энергии, //Гелиотехника, 2017. -№4. -С. 57-59.

35. A.A. Kuchkarov, A.E. Khaitmukhamedov, A.O. Shukurov, M.Kh. Dekhkonova, and M.R. Mukhiddinov. Calculation of Thermal and Exergy Efficiency of Solar Power Units with Linear Radiation Concentrators, *Applied Solar Energy*, Vol. 56, pp.42-46, 2020.

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

---

36. V.E. Dudley, et al., Test results: SEGS LS-2 solar collector, Nasa Sti/recon Technical Report N 96 (1994).
37. Seyed Farhan Moosavian, Daryoosh Borzuei, and Abolfazl Ahmadi Energy. "Exergy, environmental and economic analysis of the parabolic solar collector with life cycle assessment for different climate conditions", Renewable Energy, Vol. 165, pp. 301-320, 2021.
38. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 19 – Узбекская ССР. Книга 1. – Ленинград Гидрометеоиздат 1989. - 280 с.
39. E. Bellos and C. Tzivanidis. A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors, Energy Convers. Manag., Vol. 149 pp. 275-292, 2017.
40. S.A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 30, Issue 3, pp. 231-295, 2004.
41. O. Behar, A. Khellaf, and K. Mohammedi. "A novel parabolic trough solar collector modeleValidation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES)", Energy Convers. Manag., Vol. 106, pp. 268-281, 2015.
42. K. Reddy, K.R. Kumar, and C. Ajay. Experimental investigation of porous disc enhanced receiver for solar parabolic trough collector, Renew. Energy, Vol. 77, pp. 308-319, 2015.
43. F.P. Incropera, A.S. Lavine, T.L. Bergman, and D.P. DeWitt. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Wiley, 2007.
44. M. Marefati, M. Mehrpooya, and M.B. Shafii. Optical and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids, J. Clean. Prod., Vol. 175, pp. 294-313, 2018.
45. L. Valenzuela, R. Lopez-Martín and E. Zarza. Optical and thermal performance of large-size parabolic-trough solar collectors from outdoor experiments: a test method and a case study, Energy, Vol. 70, pp. 456-464, 2014.

*Представлено Физико-техническим  
институтом АН РУз*

UDC: 621.472.383.56

**COMPARISON OF THE LEVEL OF DUST ON THE SURFACE OF  
MONOCRYSTALLINE PHOTOELECTRIC BATTERIES WITH FLAT AND  
TEXTURED SURFACES**

**U.B. Abdiyev, B.A. Yuldashev, S.Q. Shoguchkarov, Sh.N. Abilfayziyev,  
S.F. Toshpulatov**

Сүнги йилларда Республикада йил сайин ҳарорат күтарилиши, Орол деңгизи түбининг қуриган қисмидан туз ва чанг пайдо бўлиши сезиларли даражада оиди. Шамол таъсирида шўрланган тупроқдан күтарилган чанг ФЭБ ларнинг юзасида жойлашиб, вақт ўтиши билан ингичка қатлам ҳосил қиласди. Бу эса ФЭБ ларнинг электр параметрларига салбий таъсир қиласди. Бу салбий таъсир даражаси ҳимоя шишиаси ясси ва текстурали бўлган ФЭБ ларга турли даражада таъсир кўрсатади. Ушбу тадқиқотда ҳимоя шишиасининг юзаси ясси ва текстурали фотоэлектрик батарея (ФЭБ) лар юзасининг чангланиши даражаси тақосланган. Тажрибада фойдаланилган ФЭБ ларнинг ҳимоя шишиасининг қалинлиги 3 мм. Тадқиқот чангланиши даражаси ва ҳарорати юқори бўлган, Республика жанубий минтақасида жойлашаган Термиз шаҳрида ўтказилди. Тажрибада иккита монокристалл ФЭБ лар горизонтал ўрнатилиб, уларнинг электр параметри Қуёш зенит нуқтасида бўлганда кунига бир марта ўлчанган. Ўлчаши ишлари, Қуёш зенит нуқтасида бўлганда оптимал бурчак остида (қуёш нурлари ФЭБ сиртига 90° бурчак остида йўналадиган қилиб) бир ойга яқин вақт давомида ўлчанди. Бундай ҳолда, тиниқ осмон остида ФЭБ юзасига тушадиган қуёш радиациясининг қиймати амалда бир бирига яқин бўлганлиги учун ўлчаши хатолиги минимал бўлади. Тадқиқот натижаларига кўра, ҳимоя юзаси текстура шишиали ФЭБ нинг чангланиши даражаси, ясси шишиали ФЭБ га қараганда 5% га ортиқ бўлган.

**Калит сўзлар:** чангланиши даражаси, монокристалл, ясси ва текстура шишиали ФЭБ, тўлдириши коэффициенти, вольт-ампер, вольт-ватт тавсифлари.

В последние годы в республике значительно увеличилась степень годового повышение температуры, а также выходы солей и пыли с сухого дна Аральского моря. Пыль, поднятая ветром, оседает на поверхности фотоэлектрической батареи (ФЭБ) и со временем образует тонкий слой. Это отрицательно сказывается на электрических параметрах ФЭБ. Это негативное воздействие в разной степени сказывается на ФЭБ с плоским и фактурным защитным стеклом. В этом исследовании сравнивалось запыление поверхности плоского и текстурированного защитного стекла фотоэлементов. Толщина защитных стекол ФЭБ, используемых в эксперименте, составляет 3 мм. Исследование проводилось в городе Термез, расположенному в южном регионе страны, с повышенным уровнем запыленности и температуры. В эксперименте два монокристаллических ФЭБ устанавливались горизонтально, и их электрические параметры измерялись раз в

сутки, когда Солнце находилось в зените. Измерения проводились в течение месяца, когда Солнце находилось оптимальным углом ( $90^\circ$  к поверхности ФЭБ). В этом случае погрешность измерения будет минимальной, так как значения солнечной радиации, падающей на поверхность ФЭБ при ясном небе, практически близки. По результатам исследования степень запыления ФЭБ с защитной текстурированной поверхностью стекла была на 5 % выше, чем у ФЭБ с плоским стеклом.

**Ключевые слова:** степень запыленности, монокристалл, плоское и текстурированное стекло ФЭП, коэффициент заполнения, вольт-амперная, вольт-ваттная характеристики.

*In recent years, the annual temperature rise in the Republic, and the appearance of salt and dust from the dry part of the bottom of the Aral Sea have significantly increased. The dust raised from the saline soil under the influence of the wind settles on the surface of PEBs and forms a thin layer over time. This has a negative effect on the electrical parameters of PEBs. This level of negative impact affects PEBs with flat and textured protective glass to varying degrees. In this study, the surface dusting of flat protective glass and textured photoelectric cells (PEBs) was compared. The thickness of the protective glass of PEBs used in the experiment is 3 mm. The study was conducted in the city of Termiz, which is located in the southern region of the Republic, with high levels of dust and temperature. In the experiment, two monocrystalline PEBs were installed horizontally, and their electrical parameters were measured once a day when the Sun was at its zenith. The measurements were taken over a period of about a month, when the Sun was at its zenith, at the optimal angle (so that the Sun's rays are directed at an angle of  $90^\circ$  to the surface of the PEB). In this case, the measurement error will be minimal, since the value of the solar radiation falling on the PEB surface under a clear sky is practically close to each other. According to the results of the study, the degree of dusting of PEB with protective surface textured glass was 5% more than that of PEB with flat glass.*

**Key words:** dusting rate, monocrystal, flat and textured glass PEB, fill factor, volt-ampere, volt-watt characteristics.

**Introduction.** Today, there are several types of PEBs, and the effectiveness of their use in the territories of the Republic depends on the conditions of their use [1]. PEB output power: depends on factors such as time of day, PEB location (climate zone), atmospheric conditions, angle of incidence of light and PEB receiving surface. In order to protect the PEB from various effects of the atmosphere, 3-5 mm thick glass with a smooth or textured surface is attached to its front side [2]. In the conditions of our country, there are two important climatic factors that negatively affect the efficiency of PEB, which are high temperature of the environment and high level of atmospheric dusting. The influence of these negative factors on PEB is clearly visible in the southern regions of the Republic, including the Surkhandarya region [3]. Because, the Surkhandarya region has climate conditions different from other places: very dry air, high temperature ( $+40^\circ\text{C}$  and above), occasional Afghan wind, and dust. A certain part of the territory is surrounded by deserts

and mountains. In such arid climatic conditions, the wind causes an increase in the amount of dust in the atmosphere [4].

In all work on the use of PEBs in dry hot climates, environmental parameters such as the amount of air dust are given little attention[5]. For the southern and desert regions of our republic, the decrease in output power is caused by the effect of high temperature and pollution of the PEB surface [6-7].

Dust particles in the atmosphere have a wide range, as they include particles consisting of several molecules (clusters) with a diameter of 1 nm to several tens of microns. The sinking speed of various particles depends on their size [8]:

- large particles - more than 100 microns, sinking with a speed of about 0.5 m/s;
- medium particles - from 1 to 100 microns, sink slowly with a speed of about 0.2 m/s;
- small particles - less than 1 micron, sink very slowly, in a calm atmosphere this process can last from several days to several years. In a windy atmosphere, they never sink and can be washed away by rain.

In [9-10], the dependence of the speed of the air cleaning the surface of the PEB on the distance to the surface of the PEB was studied. It has been shown that a low air velocity is required to remove large particles with a small electric charge. It became clear that the main contamination factor for the PEB surface is particles with a small diameter.

In the following years, the annual temperature rise in the Republic, and the appearance of salt and dust from the dry part of the Aral Sea increased significantly. The dust raised from the saline soil under the influence of wind settles on the surface of PEBs and forms a thin layer over time. This does not leave without a negative impact on the electrical parameters of PEBs [11].

Nowadays, protective glass is widely used compared to PEBs with textured glass and PEBs with flat glass. Because of this, protective glass flat surfaced monocrystalline PEBs have less absorption in the semiconductor due to the high return of light from the surface [20]. As a result of the sunlight falling on the surface of the textured glass panel several times returning and refracting on the textured surfaces, most of them reach the surface of the element (Figures 1-a, b).

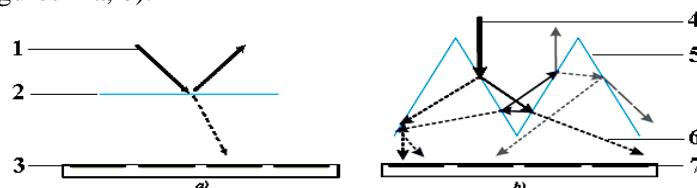


Fig.1. a) Sunlight passing through flat glass surface to PEB, b) Sunlight passing through textured surface glass to PEB. 1,4 – sunlight; 2 – flat surface glass; 3,7 – semiconductor element; 5 – glass with a textured surface; 6 – returned light

A flat glass solar panel does not have this feature, and the rays of the sun falling on the surface of the panel are reflected back and refracted into the PEB element. Glass-textured PEBs have their pros and cons. In particular, due to their uneven surface, dust

from the atmosphere settles on their surface more than PEB with a flat glass surface, which has a negative effect on the efficiency of PEB [12].

In this work, we studied and compared the effect of environmental dusting on two identical 50W monocrystalline PEBs with a flat and textured protective glass thickness of 3 mm in the southern region of the Republic.

**Materials and methods.** It is known from our previous studies that when the PEB is in a horizontal position (at an angle of 0 gradus), the amount of dust falling on its surface is the maximum [13]. Therefore, in order to maximally observe the effect of dusting on PEBs with a flat and textured surface, we placed them side by side on the roof on March 10 and carried out measurements for a month. A view of PEBs at the beginning of the experiment and at the end of the experiment is presented in Fig.2.

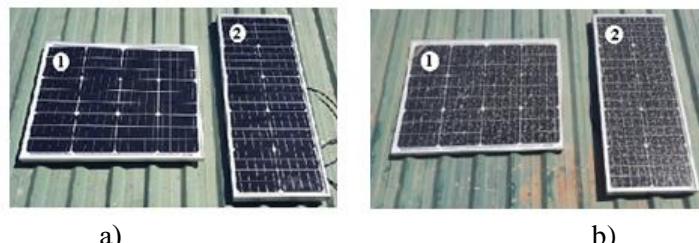


Fig.2. View of PEBs at the beginning of the experiment (a) and at the end of the experiment (b). 1 – textured glass PEB; 2 – flat glass PEB

Table 1

The electrical parameters of the PEBs used for the experiment

№	Name	Number	Type	Mechanical parameters	Electrical parameters
1	PEB	1	Monokristal PMS50-Si: 50W	The texture glass (3mm)	3,01A, 22,5V
2	PEB	1	Monokristal PMS50-Si: 50W	Flat glass (3mm)	2,92A, 21,8V.



Fig.3. Procedure for measuring the volt-ampere and volt-watt characteristics of simple and dusted PEBs. a – PEBs in clean condition; b – measuring condition of the instruments used in the experiment; c – PEBs in the surface dusted state

The volt-ampere and volt-watt characteristics of textured and flat glass PEBs at the end of the experiment (in the dusty state) were obtained and compared with the value obtained in the clean state (Fig. 3).

Electrical parameters of PEBs were measured in Termiz conditions. In this case, PEBs were measured in a traditional way for a short time, as in photoelectric stations, that is, in the regions located in the northern hemisphere, PEBs are directed to the south. When the sun is at Zenit point, the solar radiation falls normally to the panel [14].

**Results and discussion.** Solar radiation and short circuit current of PEBs were measured every day when the Sun was at the zenith point at the optimal angle (so that the sun's rays were directed at an angle of 90° to the surface of the PEB). In this case, the measurement error is minimal, as the value of solar radiation falling on the PEB surface under a clear sky is practically close to each other (Fig. 4).

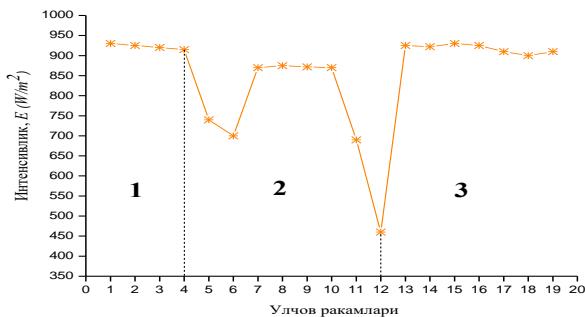


Fig.4. Solar radiation intensity during PEBs experiment

In Fig.4. the radiation is divided into 3 parts, if the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> parts correspond to measurements under a clear sky, the two deviations in part 2<sup>nd</sup> correspond to a cloudy and rainy day. After the rain, the dust on the surface of PEBs has been partially washed away, and drop-shaped clots form on the surface of PEBs. It can be seen from the 3<sup>rd</sup> part of Figure 4 that the radiation in the measurements after several days of rain was the same. At closely spaced radiations (13-20-digit measurements), we see that the short circuit current decreases faster in textured-surfaced PEBs than in flat-surfaced PEBs. The reason for this can be explained by the fact that the dusting in PEB with a textured surface is large (Figure 5).

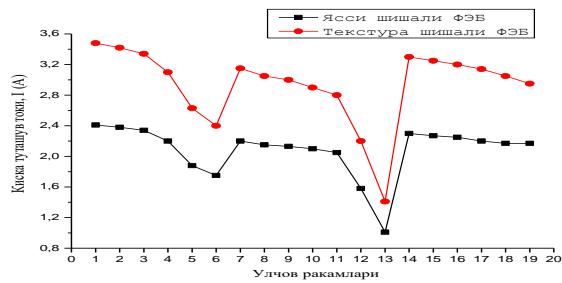


Fig.5. Short circuit current of flat and textured surface PEBs

As can be seen from Figure 5, the short circuit current due to dusting decreased by  $\sim 0.24\text{A}$  in PEB with an average flat surface, while this indicator was  $\sim 0.53\text{A}$  in textured PEB. The degree of dusting of PEBs is determined using formula 1, using the initial value of the short circuit current and the value after dusting for a certain period of time[15]:

$$\Theta = \frac{I_0 - I_n}{I_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

where  $\Theta$  is the degree of dusting,  $I_0$  is the value of the short circuit current when the PEB surface is initially clean, and  $I_n$  is the value of the short circuit current after the PEB surface is dusted for a certain period of time.

In this experiment conducted in the early spring of 2023, the difference in the degree of dusting on the surface of flat and textured glass PEBs increased day by day (Figure 6).

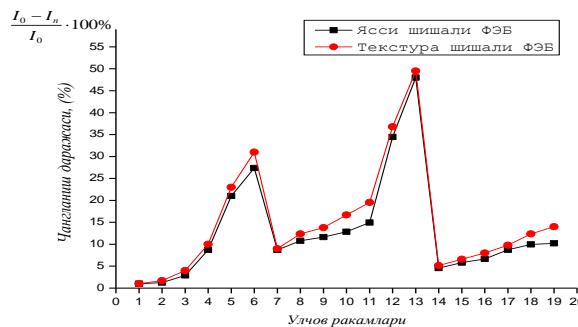


Fig.6. Dust level of PEBs with flat and textured surfaces

At the end of the experiment, the electrical parameters of PEBs in the dusting state were measured. After that, the surface of PEBs was cleaned of dust in a short time and the measurements were repeated. At the time of measurement, radiation was  $E=920\text{W/m}^2$ , air temperature was  $32^\circ\text{C}$ . Figure 7 shows the volt-ampere characteristics of flat and textured glass PEBs with clean and dusted surfaces.

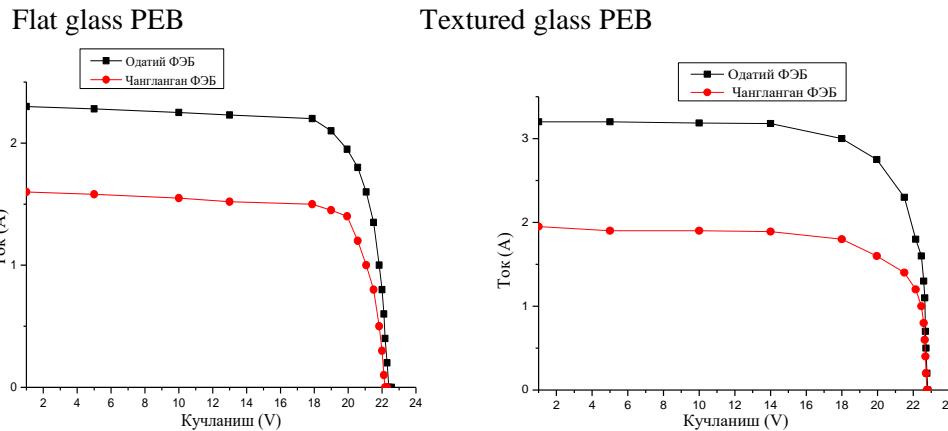


Fig.7. Volt-ampere characteristics of flat and textured surface PEBs

It should be noted that an "Afghan wind" took place in the area one day before the experiment to determine the volt-ampere and volt-watt parameters of PEBs.

In the figure above, we can see that the short circuit current value of the flat glass PEB in the dusted state has changed less than that of the textured glass PEB. This can be explained by the difference in the level of dusting on the PEB surface. Figure 8 shows the volt-watt characteristics of flat and textured glass PEBs.

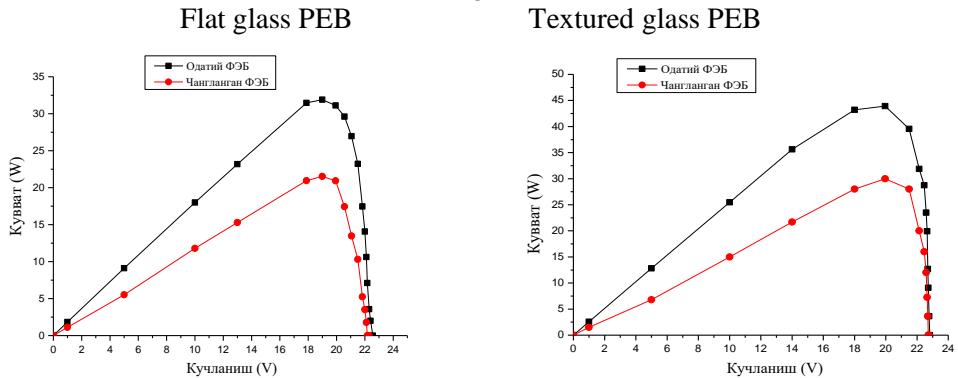


Fig.8. Volt-watt characteristics of flat and textured surface PEBs

The generated power  $P$  can be found by formula 2:

$$P = I_h U_h = FF I_{k.m.} U_{c.lo.}; \quad (2)$$

here,  $U_{o.c.}$  - open circuit voltage;  $I_{s.c.}$  - short circuit current;  $FF$  is the fill factor of the volt-ampere characteristic. VAX's fill factor is a factor that indicates how much of the power produced by the solar cell can be used by the load. The fill factor was calculated using formula 3:

$$FF = \frac{I_h U_h}{I_{k.m.} U_{c.lo.}} \quad (3)$$

The fill factor coefficient values of flat and textured glass PEBs measured in the clean state are 0.61 and 0.8, respectively. These coefficients were 0.43 and 0.47 when measured with dust on their surfaces.

**Conclusion.** In the world, over the years, the use of hydrocarbon resources is decreasing, and their place is being replaced by ecologically clean, alternative and renewable energy sources [16]. Among the renewable energies, the production of electricity using solar energy is developing rapidly. As a result, the demand for PEB is increasing every year. Climatic factors such as high temperature and dusting have a negative effect on the effective operation of PEBs. It is one of the urgent tasks of today to monitor and conduct further research on reducing the influence of these climatic factors on PEB [17-19].

In this experiment, the amount of dust on the surface of textured glass PEB was 5% higher than that of flat glass PEB. At the end of the experiment, the reduction of the filling coefficient was 33% in flat glass PEBs and 41% in textured PEBs. From these results, we can see that the amount of dust on the surface of the batteries is higher in PEB with textured surface than PEB with flat glass surface.

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

---

As the days get warmer, the amount of dust in the atmosphere increases due to the start of agricultural work. In addition, the "Afghan wind", which blows from time to time and brings dust with it, starts in late spring and repeats often. Therefore, dust concentration increases sharply in the second half of April and does not decrease until the end of November. At this time of the year, the difference in pollution on the surface of flat and textured glass PEBs increases dramatically. When using PEBs with a textured surface in areas with high dust levels, frequent dusting is recommended.

### References

1. Abdiyev U.B., Abilfayziyev Sh.N., Yuldashev B.A. Изучение и сравнение методов измерения электрических параметров с различными видами и стёклами. // Научный вестник Наманганского государственного университета, 2022, № 4. - С. 41-50.
2. Турсунов М.Н., Холов У.Р., Ахтамов Т., Эшматов М., Аликулов Р. Влияние окружающей среды и структуры поверхности защитных стекол на параметры фотоэлектрических батарей. /Тенденции развития физики конденсированных сред, Труды Международной научной конференции, Фергана, 25 май, 2021 год. - С. 15-157.
3. Муминов Р.А., Турсунов М.Н., Сабиров Х., Абдиев У.Б., Юлдошов Б.А., Абильфайзиев Ш.Н. Исследование влияния температуры на параметры фототепловых батарей в южных регионах республики. //Альтернативная энергетика и экология. 2021, № 2049, - С. 40-47.
4. Абдиев У.Б., Юлдошов Б.А., Абильфайзиев Ш.Н., Фотобатарея юза катламидағи чангланиш даражасининг ўрнатилиш бурчагига боғлиқлиги. // “Muqobil va qayta tiklanuvchi energetikaning rivojlanish tendensiyalari: muammolar va yechimlar”, Xalqaro-ilmiy texnik anjuman. Toshkent, 17-18- may, 2021 yil. B. 382-388 б.
5. Турсунов М.Н., Дыскин В.Г., Юлдашев И.А. Критерий загрязнения поверхности стекла фотоэлектрической батареи, // Гелиотехника. 2015, №2, с. 82-84
6. Дыскин В.Г., Турсунов М.Н., Абдуллаев Э.Т. Мобильный измерительный зонд для мониторинга степени загрязнения стекла. //Проблемы энерго- и ресурсосбережения, 2016, №1-2.
7. Юлдошев И.А., Сайткамолов М.С., Шогучкаров С.К., Муслимова М.М., Усканова З., Кузибоев А. Технико-экономическая оценка солнечной когенерационной установки на основе фотоэлектрической тепловой батареи // Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. 2021. Maxsus son, 330-336 б.
8. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. -М: Мир, 1986. -556 с.
9. Гременюк В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2009, № 1(69), - С. 59-123.
10. Mani M., Pillai R. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010., v. 14, Pp. 3124–3131.

11. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov Kh., Abilfayziyev Sh.N., Yuldashev B.A., Toshpulatov S.F. Testing of crystalline silicon-based photoelectric and photothermal batteries in real climate conditions and comparison of parameter changes // Journal of Physics: Conference Series, Volume 2388, IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering 2022 (APITECH-IV 2022) doi: 10.1088/1742-6596/2388/1/012128.
12. Tursunov M.N., Dyskin V.G., Yuldashev I.A., Sabirov Kh., Park Jeong Hwoan // A Criterion of Contamination of the Glass Surface of Photovoltaic Batteries. Applied Solar Energy, 2015 Vol. 51. № 2, pp 163-164.
13. Abdiyev U.B., Abilfayziyev Sh.N., Yuldashev B.A. //Fotoelektrik batareyaning changlanish darajasini aniqlovchi qurilma. SAP 02155 qayd raqamli PATENT. 30-noyabr. 2021. Byulliten №11.
14. Tursunov M.N., Sabirov X., Abilfayziyev Sh.N., Yuldashev B.A. // Test of the different materials having photovoltaic substances and based them photovoltaic thermal batteries. Eurasian Physical Technical Journal. 2022, Vol.19, №4(42). doi: 10.31489/2022№4/44-50.
15. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov X., Abdiyev U., Abdullayev E.T. Abilfayziyev Sh.N. // Study of methods for protecting the surface of photovoltaic batteries from pollution. Asian journal of research Japan, Osaka. 2020. pp. 331-335.
16. Payzullakhanov M.S., Shermatov Zh.Z., Shog'o'chqorov S.K., Raxmatov O.T., Ernazarov F.N., Karshiyeva N.X., Zohidov S., Sagdullaev A.F. Barium-strontium cobaltite  $sr_{0.5}ba_{0.5}co_{1-x}fe_xo_{3-z}$ , a material for hydrogen energy. //Проблемы энерго- и ресурсосбережения, 2023, №1-2.
17. Муминов Р.А., Турсунов М.Н., Сабиров Х., Шокучкоров С.К., Пиримматов М.П. Исследование параметров фото тепловых батарей повышенной эффективности в натурных условиях, //Проблемы энерго- и ресурсосбережения», 2019. №2. -С. 94-97.
18. Muminov R.A., Tursunov M.N., Sabirov X., Abdiyev U.B., Yuldashev B.A., Abilfayziev Sh.N. // Study of the Parameters of a Photo of a Thermal Battery with a cell Polycarbonate Collector. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, 2019, vol. 6, no. 12, pp. 12018-12023.
19. Abdiyev U.B., Yuldashev B.A., Abilfayziev Sh.N. Охлаждение фотоэлектрической батареи с помощью элемента Пельтье. //Научный вестник Наманганского государственного университета, 2021, № 11. - С. 8-12.
20. Гременюк В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2009, № 1(69), - С 59-123.

*Presented by Termiz State University and  
Tashkent State Technical University*

УДК 535.361

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФОТОННО-  
ВОЗБУЖДАЕМОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В 5-PHENYL-2-[4-(5-PHENYL-1,3-  
OXAZOL-2-YL) PHENYL]-1,3-OXAZOLE ПРИ ИМПУЛЬСНО-  
ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

И.А. Рахматуллаев, Н.В. Чернега, Х.З. Ботиров

Мис бұгларидаги лазернің яшил нури ( $\lambda=510,6$  нм) таъсирида 5-phenyl-2-[4-(5-phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3-oxazole (POPOP) поликристалл ароматик бирикмада иккі фотонлы уйғотилған люминесценциясынінг энергетик характеристикалары ўрганылған. Фотолюминесценция спектрларини қайд қилиш учун яратылған оригинал усул мұхим органик моддаларнің сүст иккіламчи нурланиш сигналларини қайд этишида көнг имконияттарни очади.

**Калит сұзлар:** POPOP, қуқун, лазер, ароматик структура, спектр, иккіламчи нурланиш, фотолюминесценция.

Исследованы энергетические характеристики двухфотонно-возбуждаемой люминесценции в поликристаллическом ароматическом соединении 5-phenyl-2-[4-(5-phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3-oxazole (POPOP) при возбуждении зеленой линией генерации лазера на парах меди ( $\lambda=510,6$  нм). Разработанная оригинальная методика регистрации спектров фотолюминесценции открывает широкие возможности для регистрации слабых сигналов вторичного излучения важных органических веществ.

**Ключевые слова:** POPOP, порошок, лазер, ароматическая структура, спектр, вторичное излучение, фотолюминесценция.

*The energy characteristics of two-photon-excited luminescence in the polycrystalline aromatic compound 5-phenyl-2-[4-(5-phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3-oxazole (POPOP) are studied. It has been found that quite intense photoluminescence is observed at room temperature in POPOP microstructures upon excitation by the green generation line of a copper vapor laser ( $\lambda = 510.6$  nm). The developed original technique for recording photoluminescence spectra opens up wide possibilities for recording weak signals of secondary radiation of important organic substances.*

**Key words:** POPOP, powder, laser, aromatic structure, spectrum, secondary emission, photoluminescence.

**Введение.** С появлением лазеров появились новые возможности и направления в классической молекулярной спектроскопии. На сегодняшний день наиболее исследованными являются двухфотонные процессы, характеризующиеся квадратичной зависимостью от возбуждающего излучения. В настоящее время спектроскопия двухфотонного поглощения света (ДФП) является мощным спектральным аппаратом

позволяющим существенно расширить информацию об энергетической структуре вещества, получаемую из однофотонных спектральных измерений. Кроме того, в ди-польном приближении двухфотонные переходы разрешены между состояниями одинаковой четности, в отличии от однофотонных переходов. Позволяя получать информацию, зачастую недоступную спектроскопии однофотонного поглощения, преимущества ДФП особенно существенны при исследовании высоких возбужденных электронных и электронно-колебательных состояний, при изучении объемных эффектов, селективном возбуждении частиц внутри поглощающих сред и т.д. [1]. С помощью двухфотонно-возбуждаемой люминесценции (ДВЛ) определяют значение коэффициента ДФП. ДВЛ используются не только для исследования структуры вещества, но и для решения целого ряда практических задач, таких как оптическое ограничение, а также в целом ряде приложений [2-27]. Из всех характеристик ДВЛ наиболее информативными являются поляризационные [1].

В последние годы приобретает все большую актуальность исследование сложных молекулярных систем и процессов взаимодействия излучения с ними. Это связано широким кругом областей, где они находят практическое применение. Ароматические соединения используются в биомедицинских целях — при изучении биологических молекул по методу люминесцирующих меток, а также в качестве фотосенсибилизаторов, в лазерной технике - в качестве активных сред и управляющих элементов.

Органическое ароматическое соединение 5-phenyl-2-[4-(5-phenyl-1,3-oxazol-2-yl) phenyl]-1,3-oxazole ( $C_{24}H_{16}N_2O_2$ , POPOR) является известным сцинтилятором и характеризуется высокой эффективностью фотолюминесценции. При комнатной температуре кристаллическая структура POPOR является моноклинной. Пространственная группа симметрии  $P2_1/c(C_{2h}^5)$  [26, 27]. Параметры элементарной ячейки имеют следующие значения:  $a=9.2$ ,  $b=5.3$  и  $c=19.3$  Å, её объем составляет  $V=942$  Å<sup>3</sup>. В элементарной ячейке находится 2 молекулы.

Энергетические и спектральные характеристики ДВЛ в поликристаллическом кристаллическом порошке POPOR при возбуждении наносекундными лазерными импульсами изучалась в работах [18-23].

В данной работе ставилась задача исследования энергетических характеристик ДВЛ POPOR при накачке лазерными импульсами наносекундной длительности при различных условиях возбуждения.

**Материалы и методы исследования.** Схема экспериментальной установки (см. рис. 1) соответствует методу исследования вторичного излучения (ВИ) «на отражение» [18-23]: 1) ЛПМ, 2) осветительная система с исследуемым образцом, 3) монохроматор типа МДР-2 и система регистрации. Дифракционная решетка спектрометра поворачивалась с помощью шагового двигателя, управляемого с помощью импульсного генератора Г5-54. Для ослабления линий газового разряда ЛПМ (1) перед образцом (5) устанавливался абсорбционный светофильтр ЖС-17 (3). Возбуждающее лазерное излучение направлялась на поверхность образца в виде пятна размером 100 мкм. Вещество в форме порошка помещалось в кювету с плоскопараллель-

ными кварцевыми окнами марки «КУ». ЛПМ генерирует излучение в видимой области спектра с длинами волн 510,6 и 578,2 нм. Средняя мощность излучения для приборов такого типа достигает 10 Вт. Излучение генерируется в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования ( $10^4$  Гц) коротких (20 нс) импульсов генерации с пиковой мощностью  $10^5$  Вт. Рассеянное излучение собиралось системой кварцевых линз (6) на входную щель монохроматора МДР-2 (9), перед которой устанавливался фильтр УФС-1 (7) при регистрации спектров в области 260–400 нм и BG-12 при регистрации в области 360–500 нм. Излучение после монохроматора регистрировалось с помощью ФЭУ-130 (10) в системе счета фотонов [18–23].

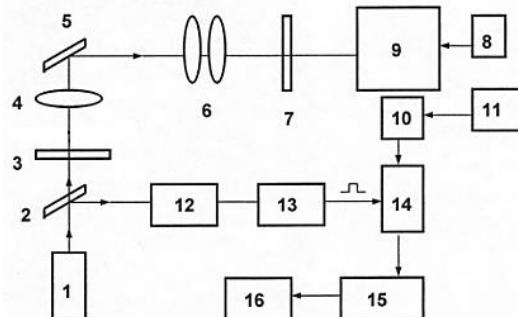


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования вторичного излучения в конденсированных средах при импульсно-периодическом лазерном возбуждении (схема «на отражение»): 1- лазер на парах меди, 2- пластина, 3- абсорбционный фильтр ЖС-17, 4-линза, 5-образец, 6- конденсор, 7- абсорбционный фильтр УФС-1 или ВС-12, 8- блок управления МДР-2, 9- МДР-2, 10- ФЭУ-130, 11- блок питания ФЭУ-130, 12- фотоприёмное устройство ЛФДП-3, 13- линия задержки, 14- амплитудно-временной селектор, 15- интенсиметр или компьютер, 16- самописец Н-307 или принтер

Блок регистрации сигналов установки состоит из фотоприемника, схемы стробируемого счетчика фотонов и записывающего устройства (самописец или принтер). Сигнал с ФЭУ-130 поступал на счетчик фотонов. Устройство стробировалось импульсами лазерного излучения, отраженного от светоделительной пластинки (2) на фотодиод синхронизации (12). Сигнал после ФЭУ-130 и предварительного паразитного усилителя поступал на амплитудно-временной селектор (14). Селектор регистрировал отдельные одноэлектронные импульсы, вызванные сигналом ВИ только в момент прихода на него строб-импульса длительностью 35 нс. Строб-импульс вырабатывался формирователем, который запускался импульсом с устройства синхронизации, прошедшим через линию задержки. Линия задержки (13) позволяла осуществить временное совпадение строб-импульса с импульсом, вызванным сигналом ВИ. Задержка начала строб-импульса относительно опорного импульса синхронизации могла регулироваться от 5 до 500 нс. Зарегистрированный сигнал с селектора поступал на формирователь, вырабатывающий нормализованные прямоугольные импульсы длительностью 500 нс и амплитудой 1 В. Эти нормализованные импульсы поступали на регистратор.

пали на линейный интенсиметр (15), имеющий 7 пределов измерений, при переключении которых его чувствительность могла изменяться на три порядка. Интенсиметр преобразовывал среднюю частоту появления нормализованных импульсов в напряжение. Выход интенсиметра был подключен к двухкоординатному самописцу Н-307. Амплитуда отклонения пера самописца была пропорциональна скорости поступающих на детектор импульсов.

Счетчик фотонов работал как в режиме непрерывного счета, так и в режиме стробирования. В непрерывном режиме счета фотонов ФЭУ-130 при оптимальном уровне дискриминации давал 250-300 шумовых импульсов в секунду. В режиме стробирования при скважности 3000, число шумовых импульсов составило  $\sim 0,1$  имп./сек. При использовании компьютера время накопления сигнала при фиксированном положении дифракционной решетки изменялось в диапазоне 0,1-100 с, в зависимости от интенсивности регистрируемого сигнала. Информация от регистрирующего устройства проводилась к компьютеру и накапливалась в цифровом виде и выводилась на экран компьютера в виде графика. Этот график выводился на принтер.

Образцы исследовались в виде порошков с размерами частиц около 0,1 мм. Порошок помещался между кварцевыми окнами. Толщина слоя составляла 0,5 мм. После прохождения через кювету расходимость пучка сильно возрастила, поэтому для сравнения энергий ДВЛ в веществе мы измеряли энергии пучков в одном и том же пространственном угле (0,04 рад) [19-21].

Для анализа интенсивности спектров применялись калиброванные нейтральные светофильтры типа НС. Таким образом, имелась возможность исследовать характеристики спектров ВИ и времени задержки регистрации сигнала по отношению к импульсу возбуждающего излучения.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2. представлены спектры ДВЛ порошков ПОРОП при различных интенсивностях возбуждающего излучения. При малой интенсивности возбуждающего излучения с увеличением интенсивности накачки максимум ( $\lambda_{max}=465,5$  нм) и полуширина ( $\Delta\lambda=25,5$  нм) спектра (кривые 1-2) практически не изменяются, а происходит лишь увеличение интенсивности ДВЛ.

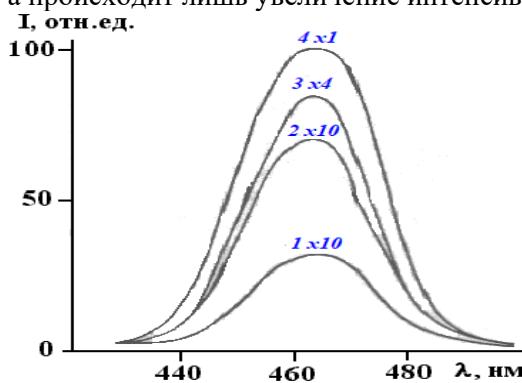


Рис.2. Спектры ДВЛ порошков ПОРОП при различных интенсивностях возбуждающего излучения. Кривая (1) соответствует интенсивности  $I_{6036}=3$ ; (2)-  $I_{6036}=5$ ; (3)-  $I_{6036}=10$ ; (4)-  $I_{6036}=25$  (где значения  $I_{6036}$  - приведены в единицах  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>).

При повышении интенсивности накачки (кривая 3) максимум спектра слегка смещается в более коротковолновую область ( $\lambda_{\text{мак}} = 463$  нм), полуширина не меняется, а пиковая интенсивность люминесценции  $I_{\text{мак}} = 21$ . С дальнейшим увеличением интенсивности возбуждающего излучения (кривая 4) происходят изменения положения максимума, полуширины и интенсивности спектра:  $\lambda_{\text{мак}} = 460$  нм,  $\Delta\lambda = 28,8$  нм,  $I_{\text{мак}} = 100$  (см. рис.2 и табл.1).

Таблица 1

Характеристики спектров ДВЛ порошков РОРОР при различных интенсивностях возбуждающего излучения.  $I_{\text{возб}}$  - интенсивность накачки,  $\lambda_{\text{мак}}$  - положения максимума,  $\Delta\lambda$  - ширина полосы ДВЛ,  $I_{\text{мак}}$  - пиковая интенсивность ДВЛ

$I_{\text{возб}}, 10^7 \text{ Bm/cm}^2$	3	5	10	25
$\lambda_{\text{мак}}, \text{ нм}$	465,5	465,5	463,0	460,0
$\Delta\lambda, \text{ нм}$	25,5	25,5	25,5	28,8
$I_{\text{мак}}, \text{ отн.ед.}$	3	7	21	100

На рис.3 показана зависимость интенсивности ДВЛ от интенсивности возбуждающего излучения в порошках РОРОР. При малых интенсивностях накачки можно полагать, что ДВЛ (рис.2, кривая 1) носит спонтанный характер. Спектр люминесценции при этом соответствует переходу с первого возбужденного электронного состояния  $S_1$  на колебательные подуровни основного состояния. Коротковолновый край наблюдаемого спектра соответствует  $\pi^* - \pi$  электронному переходу бензольного кольца молекулы РОРОР. Длинноволновый край спектра можно объяснить проявлением электронных подуровней, связанных со структурой молекулы РОРОР, а также колебательной структурой основного состояния молекулы. Сдвиг положения максимума ( $\lambda = 460$  нм) в спектре при повышении интенсивности накачки можно объяснить переходом от режима спонтанной люминесценции к вынужденному, т.е. к суперлюминесценции. Подтверждением такого вывода является высокий коэффициент преобразования возбуждающего излучения в ДВЛ (1,3%) при максимальных значениях интенсивности накачки (см. табл.1, рис.3).

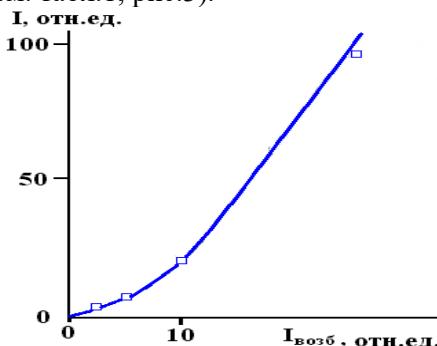


Рис.3. Зависимость интенсивности ДВЛ от интенсивности возбуждающего излучения. Экспериментальная кривая соответствует длине волны  $\lambda = 460$  нм

При используемых режимах накачки органических порошков РОРОР такой эффект оказывается возможным, если за счет двухфотонной накачки формируется инверсия заселенности между  $\pi^*$  - электронным термом молекулы и колебательным уровнем, соответствующим полносимметричному колебанию бензольного кольца. Как известно, в органических молекулах с ароматическими циклами первым возбужденным электронным состоянием является синглетное состояние, обусловленное возмущением  $\pi$ -электронов ароматического кольца. Такой терм оказывается дипольно-активным и проявляется как в спектрах поглощения, так и в процессах флуоресценции.

**Выводы.** Таким образом, проведенные в данной работе экспериментальные исследования позволили получить ряд новых научных результатов. Выявлены закономерности изменения в спектрах двухфотонно-возбуждаемой люминесценции в порошках РОРОР при их импульсно-периодическом лазерном возбуждении. Для ряда веществ установлено, что коэффициент преобразования энергии накачки в ДВЛ может достигать до 1,3%. Обнаружено, что при увеличении интенсивности возбуждающего излучения происходит деформация формы контура ДВЛ, сопровождаемая увеличением амплитуды коротковолнового и уменьшении длинноволнового максимумов. Это объясняется постепенным переходом спонтанной люминесценции в режим суперлюминесценции. Подтверждением этого служит возрастание интенсивности ДВЛ с ростом интенсивности возбуждающего излучения.

**Благодарности.** Авторы с благодарностью вспоминают покойного профессора В.С. Горелика за помощь проведения измерения оптических свойств образцов.

### Литература

1. Воропай Е.С., Гулис И.М., Могильный В.В., Самцов М.П., Толстик А.Л. Лазерно-спектроскопические исследования нелинейно-оптических свойств сложных молекулярных систем // Избранные научные труды БГУ, 2001. – Т.4, вып. 7 (Физика). – С.182-203.
2. Bredikhin V.I., Galanin M.D., Genkin V.N. Two-photon absorption and spectroscopy // Soviet Physics Uspekhi, 1973. – Vol. 16, Issue 3. – pp.299–321.
3. Durr N.J., Larson T., Smith D.K., Korgel B.A., Sokolov K., Ben-Yakar A. Two-photon luminescence imaging of cancer cells using molecularly targeted gold nanorods // Nano Letters, 2007. – Vol. 7, Issue 4. – pp.941–945.
4. Picot A., D'Aléo A., Baldeck P.L., Grichine A., Duperray A., Andraud C., Maury O. Long-lived two-photon excited luminescence of water-soluble europium complex: applications in biological imaging using two-photon scanning microscopy // Journal of the American Chemical Society, 2008. – Vol. 130, Issue 5. – pp.1532–1533.
5. Doronina L.V., Fedotov I.V., Voronin A.A., Ivashkina O.I., Zots M.A., Anokhin K.V., Rostova E., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. Tailoring the soliton output of a photonic crystal fiber for enhanced two-photon excited luminescence response from fluorescent protein biomarkers and neuron activity reporters // Optics Letters, 2009. – Vol. 34, Issue 21. – pp.3373–3375.

6. Liu Q., Guo B., Rao Z., Zhang B., Gong J.R. Strong two-photon-induced fluorescence from photostable, biocompatible nitrogen-doped graphene quantum dots for cellular and deep-tissue imaging // *Nano Letters*, 2013. – Vol. 13, Issue 6. – pp.2436–2441.
7. Pramanik A., Fan Z., Chavva S.R., Sinha S.S., Ray P.C. Highly efficient and excitation tunable two-photon luminescence platform for targeted multi-color MDRB imaging using graphene oxide // *Scientific Reports*, 2014. – Vol. 4. – pp.6090.
8. Wang H., Huff T.B., Zweifel D.A., He W., Low P.S., Wei A., Cheng J.-X. *In vitro* and *in vivo* two-photon luminescence imaging of single gold nanorods // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005. – Vol.102, Issue 44. – pp.15752-15756.
9. Molinaro C., Harfouch Y.El., Palleau E., Eloi F., Marguet S., Douillard L., Charra F., Fiorini-Debuisschert C. Two-photon luminescence of single colloidal gold nanorods: revealing the origin of plasmon relaxation in small nanocrystals // *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016. – Vol. 120, Issue 40. – pp.23136–23143.
10. Remesh V., Stührenberg M., Saemisch L., Accanto N., N.F. van Hulst N.F. Phase control of plasmon enhanced two-photon photoluminescence in resonant gold nanoantennas // *Applied Physics Letters*, 2018. – Vol. 113, Issue 21. – pp.211101-1-211101-5.
11. Olesiak-Banska J., Waszkielewicz M., Obstarczyk P., Samoc M. Two-photon absorption and photoluminescence of colloidal gold nanoparticles and nanoclusters // *Chemical Society Reviews*, 2019. – Vol. 48, Issue 15. – pp.4087-4117.
12. Zhang W., Calderola M., Lu X., Orrit M. Plasmonic enhancement of two-photon-excited luminescence of single quantum dots by individual gold nanorods // *ACS Photonics*, 2018. – Vol. 5, Issue 7. – pp.2960–2968.
13. He R., V.de Aldana J.R., Pedrola G.L., Chen F., Jaque D. Two-photon luminescence thermometry: towards 3D high-resolution thermal imaging of waveguides // *Optics Express*, 2016. – Vol. 24, Issue 14. – pp.16156-16166.
14. Linnenbank H., Saliba M., Gui L., Metzger B., Tikhodeev S.G., Kadro J., Nasti G., Abate A., Hagfeldt A., Graetzel M., Giessen H. Temperature dependent two-photon photoluminescence of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ : structural phase and exciton to free carrier transition // *Optical Materials Express*, 2018. – Vol. 8, Issue 3. – pp.511-521.
15. Kauert M., Stoller P.C., Frenz M., Rička J. Absolute measurement of molecular two-photon absorption cross-sections using a fluorescence saturation technique // *Optics Express*, 2006. – Vol. 14, Issue 18. – pp.8434–8447.
16. Svetlichnyi V.A., Meshalkin Yu.P. Laser photolysis as applied to the determination of the two-photon absorption cross section of trans-stilbene // *Optics and Spectroscopy*, 2007. – Vol. 102, Issue 6. – pp.872–877.
17. Rumi M., Perry J.W. Two-photon absorption: an overview of measurements and principles // *Advances in Optics and Photonics*, 2010. – Vol. 2, Issue 4. – pp.451–518.
18. Tareeva M., Shevchenko M., Umanskaya S., Savichev V., Baranov A., Tcherniega N., Kudryavtseva A. Two-photon excited luminescence in polyethylene and polytetrafluoroethylene // *Journal of Russian Laser Research*, 2020. – Vol. 41, Issue 5. – pp.502–508.

19.Агальцов А.М., Горелик В.С., Рахматуллаев И.А. Спектральные, энергетические и временные характеристики двухфотонно-возбуждаемой флуоресценции в кристаллическом 1,4-ди(2-(5-фенилоксазол)) бензole // Журнал прикладной спектроскопии, 1996. – Т.63, № 6. – С.998-1002.

20. Agal'tsov A.M., Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Spectral, energy, and temporal characteristics of two-photon-excited fluorescence in crystalline 1,4-DI-(2-(5-phenyloxazole)) benzene // Journal of Applied Spectroscopy, 1996. – Vol. 63, Issue 6. – pp.855-858.

21.Рахматуллаев И.А. Вторичное излучение в конденсированных средах при импульсно-периодическом лазерном возбуждении. Дисс. д-ра физ.-мат. наук, Ташкент, 2008. – 260 с.

22. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Photon-excited secondary radiation in ultradispersed medium // Bulletin of the Lebedev Physical Institute, 2005. – Issue 3. – pp.23-34.

23. Gorelik V.S., Kudryavtseva A.D., Sokolovskaya A.I., Chernega N.V. Energy parameters of two-photon luminescence in organic media // Optics and Spectroscopy, 1996. – Vol. 81, Issue 3. – pp.369-372.

24. Kupov M.R., Gorelik V.S., Sverbil P.P., Lepnev L.S. Two-photon luminescence in POPOP and stilbene // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – Vol. 1348. – pp.012055.

25. Sverbil P.P., Gorelik V.S., Kupov M.R., Lepnev L.S., Savransky V.V. Two-photon excited luminescence in POPOP under pulse-periodic laser excitation // Laser Physics, 2020. – Vol. 30, Issue 2. – pp.025404.

26. Ambats I., Marsh R.E. The crystal structures of 2,2'-p-phenylenebis(5-phenyloxazole) - 'POPOP' // Acta Crystallographica, 1965. – Vol. 19, Part 6. – pp.942–948.

27. Schindler D., Felsmann M., Weber E. Influence of 1,4-dioxane solvent inclusion on the crystal structure of 5,5'-diphenyl-2,2'-(p-phenylene)-di-1,3-oxazole (POPOP) // Acta Crystallographica C, 2010. – Vol. 66, Part 7. – pp.0361–0363.

*Представлено Ташкентским филиалом Национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,  
Физическим институтом имени П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, Центром передовых технологий  
при Агентстве инновационного развития Республики Узбекистан*

---

## ИСПОЛЬЗУЙТЕ БЕЗУГЛЕРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



*Индекс 1070*

## **БУДУЩЕЕ «ЗЕЛЁНОЙ» ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

