

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 8 № 3

**Севастополь
2022**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2022. – Т. 8. - № 3. – 80 с.: ил.**

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из разделов: тепловые и ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы, экологическая безопасность, химические технологии атомных станций, информационные технологии в энергетике, моделирование физических процессов, физика в ядерной энергетике, автоматизация процессов контроля и управления, судовые энергетические установки, холодильные установки, гидравлические энергоустановки, компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Редакционная коллегия:

Качур С.А. (главный редактор), д.т.н., доцент;
Омельчук Ю.А. (заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Черкашина Н.И. (ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.*, д.т.н., профессор;
Пучков В.Н., д.т.н., профессор; *Акимов А.М.*, д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Олейников А.М.*, д.т.н., профессор;
Тимошенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.*, д.т.н., профессор;
Прибатурин Н.А., д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.*, к.т.н., профессор;
Магдых Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.*, к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.*, к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М.*, к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.*, д.х.н., доцент

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Качур С.А.</i> Пространственно-временные монополи естественных реакторов и эволюция звезд	5
<i>Качур С.А., Давиденко Е.Н.</i> Идентификация событий для ядерных энергетических установок на основе сетевых моделей и статистических методов	13
Автоматизация процессов контроля и управления	18
<i>Исаев А.В., Назаркин А.А., Максимов С.В., Матузаев К.Б., Мозолевская Т.В.</i> Определение участков механических повреждений металлографических шлифов с применением нейросетей	18
<i>Качур С.А.</i> Электромагнитный маневр при движении космического аппарата вблизи монополей естественных реакторов	24
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	29
<i>Жиганов И.Г., Кувишинов В.В., Чепенюк А.А., Бордан Д.Ф., Тиман Д.И.</i> Оптимизация критериев работы солнечно-биоэнергетических установок	29
<i>Жиганов И.Г., Кувишинов В.В., Власов Н.А., Жильцов А.С., Касницкий А.Д.</i> Анализ критериев оптимизации тепловой устойчивости при раз-работке биогазовых реакторов	33
<i>Кувишинов В.В., Чепенюк А.А., Тиман Д.И., Березняк В.А., Артеменко И.Д.</i> Комбинированные установки для прямого преобразования потока солнечной радиации	37
<i>Кувишинов В.В., Чепенюк А.А., Ивантеев И.С., Абейдулин С.А., Коломийченко В.П.</i> Некоторые результаты исследования энергетической ветро-солнечной установки на полигоне возобновляемых видов энергии в севастопольском государственном университете	42
Электротехнические комплексы и системы	47
<i>Канов Л.Н.</i> Расчет динамики системы распределенного асинхронного электропривода	47
<i>Смирнов В.В., Смирнов И.К., Ивченко О.Р.</i> Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа как средство повышения эффективности электропередачи сверхвысокого напряжения	55
<i>Широков И.Б., Кабайда С.Д., Широкова Е.И.</i> Разработка устройства контроля остаточной емкости аккумуляторной батареи	62
Компьютерная инженерия и техническая диагностика	68
<i>Верецагин Т.А., Ходаковский А.А., Скрытник А.Е., Широков И.Б.</i> Программно-аппаратный комплекс для выращивания растений в домашних условиях методом гидропоники	68
<i>Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Глушкова Е.В., Павлова И.А., Худякова В.А.</i> Принципы расчета элементов конструкций, работающих за пределами упругости	73
Для авторов	78

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Kachur S.A.</i> Space-time monopolies of natural reactors and the evolution of stars	5
<i>Kachur S.A., Davidenko E.N.</i> Identification of events for nuclear power plants based on network models and statistical methods	13
Process automation and control	18
<i>Isaev A.V., Nazarkin A.A., Maximov S.V., Matuzaev K.B., Mozolevskaya T.V.</i> Determination of areas of mechanical damage in metallographic sections using neural networks	18
<i>Kachur S.A.</i> Electromagnetic maneuver during spacecraft movement near monopolies of natural reactors	24
Alternative and renewable energy sources	29
<i>Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Chepenyuk A.A., Bordan D.F., Timan D.I.</i> Optimization of the operation criteria of solar-bioenergy installations	29
<i>Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Vlasov N.A., Zhiltsov A.S., Kasnitsky A.D.</i> Analysis of Criteria for Optimizing Thermal Stability in the Development of Biogas Reactors	33
<i>Kuvshinov V.V., Chepenyuk A.A., Timan D.I., Berezhnyak V.A., Artemenko I.D.</i> Combined installations for direct conversion of the solar radiation flux	37
<i>Kuvshinov V.V., Chepenyuk A.A., Ivantsev I.S., Abeidulin S.A., Kolomiychenko V.P.</i> Some results of the study of the energy wind-solar installation at the polygon of renewable energy at Sevastopol state university	42
Electrotechnical complexes and systems	47
<i>Kanov L.N.</i> Calculation of dynamics of the system Distributed asynchronous electromechanic drive	47
<i>Smirnov V.V., Smirnov I.K., Ivchenko O.R.</i> Controlled transformer-type shunt reactor as a means of increasing the efficiency of ultra-high voltage power transmission	55
<i>Shirokov I.B., Kabaida S.D., Shirokova E.I.</i> Development of a device for monitoring the residual capacity of an accumulator battery	62
Computer engineering and technical diagnostics	68
<i>Vereshagin T.A., Khodakovskiy A.A., Skripnik A.E., Shirokov I.B.</i> Software and hardware complex for growing plants at home by the method of hydroponics	68
<i>Korneeva, N.K., Pichugova, L.N., Glushkova E.V., Pavlova I.A., Khudyakova V.A.</i> Principles of Calculation of Structural Elements Working beyond elasticity	73
For cars	78

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Пространственно-временные монополи естественных реакторов и эволюция звезд

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 29.08.2022 г.; после доработки 30.08.2022 г.

Аннотация

Определена аналогия между процессами, протекающими в активной зоне ядерного реактора в состоянии, близком к мгновенной критичности, и процессами коллапса космических объектов.

Ключевые слова: голая сингулярность, черная дыра, ядерный реактор, пространственно-временной монополю, эволюция звезд, естественный реактор.

Space-time monopolies of natural reactors and the evolution of stars

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 29.08.2022 y.; received in final form 30.08.2022 y.

Abstract

There is a certain analogy between the processes occurring in the core of a nuclear reactor in a state close to instantaneous criticality and the processes of collapse of space objects.

Keywords: naked singularity, black hole, nuclear reactor, space-time monopole, evolution of stars, natural reactor.

Введение

Интерес к идее перемещения в пространстве и времени огромен [1-18]. Однако проблемы, связанные с исследованием пространственно-временных эффектов, реализацией переходов в параллельные пространства, несмотря на имеющиеся теоретические разработки, в настоящее время не решены. Не существует теоретической концепции, способной в полной мере объяснить подобные явления, тем более не разработаны методы планирования таких экспериментов, которые позволили бы избежать нежелательных результатов. Безопасность экспериментов может гарантировать только естественное искривление

пространства, которое имеет место в космосе и сравнимо с гравитацией космических объектов.

В статье предлагается определение пространственно-временных монополей естественных реакторов на основе исследования кривизны пространства ядерного реактора, находящегося в состоянии близком к мгновенной критичности. Выдвинута гипотеза, что при определенных внешних воздействиях, переводящих подкритический реактор в состояние вблизи мгновенной критичности, в случае прекращения неуправляемой ядерной реакции возникает пространственно-временной монополю реактора [9-18].

Пространственно-временной монополю — это устойчивое макроскопическое образование,

объединяющее различной кривизны с различным течением времени пространства, обусловленные электромагнитными и гравитационными эффектами. Такое образование имеет возможность квантового изменения границ и кривизны пространств за счет вызванного внешними факторами кантования энергии ядра монополя.

Необходимо подчеркнуть, что создание пространственно-временного монополя является результатом преобразования энергии ядерной реакции, а не ее «гашения». В настоящее время существуют различные методы останова ядерных реакций, но они не могут привести к искривлению пространства, поскольку не создают большой массы, нового центра тяжести. Появление монополя – это не мгновенный или почти мгновенный переход реактора и его пространства из одного состояния в другое, а процесс смены состояний, нахождение в которых определенно конечными интервалами времени.

Для описания пространственно-временных эффектов ядерного реактора вблизи мгновенной критичности предложено использовать понятия астрофизики. Необходимо определить аналогии между сингулярностью космических объектов, перетеканием вещества в звездных системах и состоянием ядерного реактора вблизи мгновенной критичности.

Цель исследования – определение представлений космологии, выявление аналогий и зависимостей позволяющих описывать пространственно-временные монополи естественных реакторов.

Например, данные исследования позволили дать следующее определение пространственно-временного монополя реактора. Пространственно-временной монополю скрытой сингулярности имеет дискообразную форму с системой реакторов (реактором) в центре. Существует некоторая аналогия структуры между пространственно-временным монополем реактора и сверхтяжелым монополем (GUT-монополем). Монополь реактора как монополь скрытой сингулярности включает четыре зоны: центральная область – зона коллапса; зона сжатия с замедлением времени в соответствии с ОТО; зона задержки времени, которая позволяет вернуться во времени назад; зона расширения с ускорением течения времени в соответствии с ОТО. Пространственно-временной монополю голой сингулярности является зеркальным отражением квантовой модели пространства скрытой сингулярности (черной дыры). В нем центральная область соответствует зоне коллапса; первому уровню – пространственное расширение; второму, как и для случая черной дыры, – задержка во времени, но

с противоположным знаком по сравнению с временной задержкой скрытой сингулярности, третьему – пространственное сжатие. Как для скрытой, так и для голой сингулярности на внешней границе зоны сжатия находится излучатель электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне.

Проведем обзор космологических представлений и понятий, позволяющих описывать пространственно-временные монополи в существующих терминах.

Космологические понятия сингулярности

За последующие десятилетия космология значительно изменилась, превратившись из умозрительного занятия в зрелую и точную науку. Огромную роль в этих революционных преобразованиях сыграли высокоточные измерения параметров фонового излучения, полученные в результате множества великолепных экспериментов.

Современная наука знакомит нас с множеством удивительных явлений, среди которых судьба гибнущей массивной звезды. Логично предположить, что большая звезда неизбежно коллапсирует в черную дыру. Однако, согласно некоторым теоретическим моделям, вместо этого она может превратиться в так называемую голую сингулярность. Выяснение того, что же происходит в действительности, – одна из наиболее важных нерешенных задач астрофизики. Открытие обнаженных сингулярностей могло бы изменить стратегию поиска Единой теории всех физических взаимодействий, и не только, благодаря возможности проведения прямых наблюдательных тестов такой теории.

Приведем основные положения современного представления об эволюции звезд. На конечных стадиях эволюции массивных звезд образуются черные дыры. В недрах обычных звезд идут термоядерные реакции синтеза химических элементов, в результате чего выделяется огромная энергия и поддерживается высокая температура звездных недр (десятки и сотни миллионов градусов). Силы гравитации стремятся сжать звезду, а силы давления горячего газа и излучения противостоят этому сжатию. Поэтому звезда находится в гидростатическом равновесии.

Кроме того, в звезде может существовать тепловое равновесие, когда темп энерговыделения, обусловленного термоядерными реакциями в ее центре, в точности равен мощности, излучаемой звездой с поверхности.

При сжатии и расширении звезды тепловое

равновесие нарушается. Если звезда стационарна, то ее равновесие устанавливается так, что потенциальная энергия звезды (энергия гравитационного сжатия) по абсолютной величине всегда вдвое больше тепловой энергии.

Если масса звезды невелика, так что масса ее ядра, затронутого термоядерными превращениями, менее 1,4 массы Солнца ($M_{\odot}$) термоядерный синтез химических элементов может прекратиться из-за так называемого вырождения электронного газа в ядре звезды. Центральное компактное и сравнительно горячее ядро проэволюционировавшей звезды небольшой массы представляет собой белый карлик – объект с радиусом, равным радиусу Земли. Термоядерное горение в вырожденном белом карлике может быть неустойчивым и приводить к ядерному взрыву достаточно массивного белого карлика с массой, близкой к так называемому чандрасекаровскому пределу ($1,4M_{\odot}$).

Если масса вырожденного ядра звезды, состоящего в основном из элементов группы железа, превышает чандрасекаровский предел $1,4M_{\odot}$, но меньше так называемого предела Оппенгеймера–Волкова $3M_{\odot}$ то в конце ядерной эволюции звезды происходит гравитационный коллапс ядра, в результате которого внешняя водородная оболочка звезды сбрасывается, что наблюдается как вспышка сверхновой звезды II типа, в спектре которой наблюдаются мощные линии водорода. Коллапс железного ядра приводит к формированию нейтронной звезды. В нейтронной звезде силам гравитационного притяжения противодействует градиент давления вырожденного нейтронного вещества.

Когда масса коллапсирующего ядра звезды больше $3M_{\odot}$ (современное значение предела Оппенгеймера–Волкова для массы нейтронной звезды, предсказываемое ОТО), то, согласно существующим представлениям, образующаяся нейтронная звезда, остывая, коллапсирует в черную дыру. Это объясняется тем, что в ОТО силы гравитации, стремящиеся сжать звезду, определяются плотностью энергии, а при громадных плотностях вещества, достигаемых при сжатии столь массивного ядра звезды, главный вклад в плотность энергии вносит уже не энергия покоя частиц, а энергия их движения и взаимодействия.

В статье профессора физики Института Тата фундаментальных исследований в Мумбаи Панкаджа Джоши ((Pankaj S. Joshi)) детально рассматриваются вопросы, связанные с исследованием голых и скрытых сингулярностей, а также

эволюцией звезд. Материал этой статьи, приведенный ниже, используется автором для построения аналогии между космологическими понятиями и типами монополей ядерных или естественных реакторов.

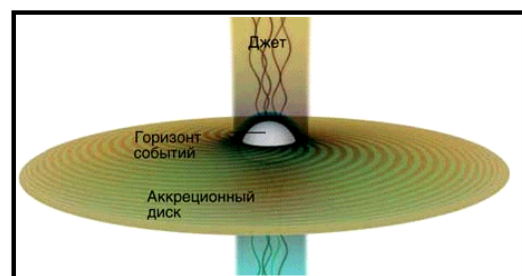
Согласно современному пониманию гравитации, основанной на ОТО Эйнштейна, сингулярности неизбежно образуются в процессе коллапса гигантской звезды. ОТО не принимает во внимание квантовые эффекты, которые становятся важными для микроскопических объектов. Можно предположить, что возникающие квантовые эффекты предотвращают обращение гравитации действительно в бесконечность.

В соответствии с известными законами физики сингулярность действительно формируется, однако вопрос о наличии горизонта событий черной дыры до сих пор остается открытым. Исследователи до сих пор не определили, что же в точности происходит в сингулярности.

Физики-теоретики выявили разнообразное количество сценариев коллапса звезд, при которых горизонт событий вообще не образуется, и сингулярность, таким образом, становится выставленной на всеобщее обозрение. Ученые называют такую сингулярность голой (или «обнаженной»). Вещество и излучение могут, как попадать внутрь, так и уходить из нее.



а)



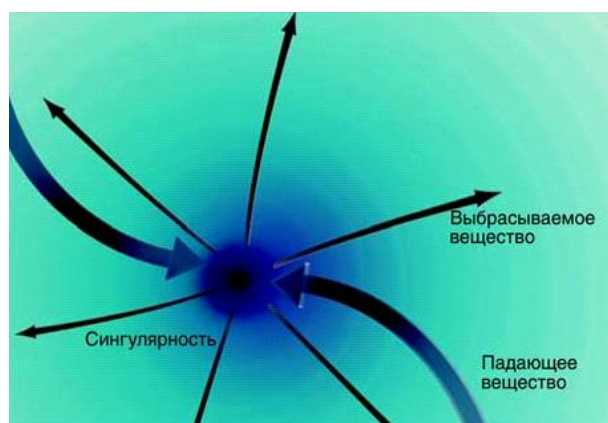
б)

Рис. 1. Черная дыра: сечение (а), взгляд со стороны внешнего наблюдателя (б).

Черные дыры и голые сингулярности – два возможных финальных состояния процесса коллапса гбнущей массивной звезды. Сердцевину каждого из них составляет сингулярность – клубок материи такой высокой плотности, что становятся необходимыми новые законы физики для его описания. Все, что попадает в сингулярность, разрушается.

В черной дыре сингулярность «одетая» – она окружена виртуальной граничной поверхностью, называемой горизонтом событий, которая скрывает ее от внешнего наблюдателя. Все, что проникает под эту поверхность, никогда не может вернуться назад (рис. 1).

Обнаженная сингулярность не окружена такой граничной поверхностью. Она видима внешнему наблюдателю, и объекты, движущиеся по направлению к ней, могут, в принципе, развернуться вплоть до достижения самой сингулярности (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Обнаженная сингулярность: сечение (а), взгляд со стороны внешнего наблюдателя (б).

Сингулярности могут быть разных типов. Выделяют так называемые «мягкие» сингулярности, для которых, несмотря на то, что плотность в некоторой области является бесконечной, гравитация остается конечной, и, таким об-

разом, сингулярность не сжимает вещество и попадающие в нее объекты до размеров булавочного укола. В такой сингулярности сохраняются законы ОТО, и вещество продолжает двигаться дальше до своей встречи с истинной, центральной сингулярностью.

Гипотеза Р. Пенроуза о запрете голой сингулярности (космическая цензура) не представляет собой всеобщий принцип. Физики не могут утверждать, что «коллапс любой массивной звезды приводит к созданию только черной дыры» или «любой физически реалистичный коллапс завершается ее появлением». Одни сценарии приводят к рождению черной дыры, а другие – к появлению обнаженной сингулярности. В некоторых моделях сингулярность видима только некоторое время, а затем сформировавшийся горизонт событий скрывает ее; в других же такая сингулярность остается видимой всегда. Обычно голая сингулярность развивается в геометрическом центре коллапса, но это не всегда соответствует действительности, однако даже если это происходит, то сингулярность может распространяться в другие области.

Как подтверждение, так и опровержение гипотезы космической цензуры, несомненно, оказало бы значительное влияние на науку, поскольку проблема голых сингулярностей сосредоточивает вокруг себя не один аспект современной физики. Компьютерное моделирование выявляет условия, при которых звезда коллапсирует в черную дыру или в обнаженную сингулярность.

В статье понятия голой и скрытой сингулярности используются для описания двух видов пространственно-временных монополей ядерного и естественных реакторов. Причем для естественных реакторов рассматривается тип «голая сингулярность».

Естественные реакторы

Роджер Пенроуз, говоря о геометрической природе пространственно-временных сингулярностей, предполагал, что сингулярность может быть охарактеризована расходимостью кривизны.

Р. Пенроуз писал, что «сингулярности появляются в момент Большого взрыва, в черных дырах, и в момент Большого хлопка (который может восприниматься как объединение черных дыр). Они могут появляться и как голые сингулярности. В связи с этим предложен так называемый принцип космической цензуры, а именно,

гипотеза, что голые сингулярности не возникают.» [1.69].

В монографии выдвигается гипотеза, сингулярность может при определенных условиях быть порождена ядерным реактором. Существование Вселенной, порожденной в результате Большого взрыва, также связано с возникновением пространственно-временного монополя, но уже космического реактора.

В основе современных представлений об эволюции Вселенной лежит Стандартная космологическая модель Большого Взрыва. Согласно этой модели момент Большого Взрыва характеризовался планковскими величинами для температуры, массы и длины. Плотность вещества в окрестности Большого Взрыва была колоссальной: $\rho_{пл} = 10^{94} \text{ г/см}^3$. В начальный момент произошла изотропизация Вселенной, и все типы взаимодействий имели единую константу Λ . Предполагается, что в этот момент вещество существовало в форме кварк-глюонной плазмы, в которой наряду с кварками и глюонами могли присутствовать лептоны, $W^\pm$ - и Z -бозоны.

Возможно, что в этот же момент могли образовываться X - и Y -бозоны больших масс ($\sim 10^{16} \text{ ГэВ}$), которые могли бы впоследствии инициировать распад протона. Эти процессы заняли очень малое время (до 10^{-10} секунды) и протекали при очень высокой температуре. Под действием взрывных сил Вселенная начала расширяться, и ее температура стала падать. Однако в этот период из-за незначительных флуктуации между числом кварков и антикварков ($\sim 10^{-10}$) могла возникнуть барионная асимметрия Вселенной.

По мере расширения Вселенной и падения ее температуры стали происходить фазовые переходы. Первый фазовый переход привел к разделению взаимодействий на сильное и электрослабое, каждое из которых стало характеризоваться своей константой взаимодействия α_s и α_w . Это произошло при температуре $T = 10^{15} \text{ ГэВ}$. Далее Вселенная продолжала расширяться со временем t : $R = t^{1/2}$. Затем наступил второй фазовый переход, который привел к разделению электрослабых взаимодействий на слабые и электромагнитные. Это произошло при температуре $T = 10^2 \text{ ГэВ}$. Выделилась константа электромагнитного взаимодействия $\alpha_{em} = e^2/\hbar c = 1/137$. Дальнейшее расширение Вселенной со временем стало протекать по закону $R \sim t^{2/3}$.

Вследствие термодинамического равновесия между элементами вещества образовались протоны, нейтроны и создавалась предпосылка синтеза легких элементов: ^3He , ^4He , D , Li . При дальнейшей эволюции Вселенной начинается

процесс нуклеосинтеза. В результате различных ядерных реакций создались условия для возникновения жизни в Солнечной системе. Рождение Солнца и возникновение жизни произошло спустя 10^{17} секунд ($\sim 10^{10}$ лет) после Большого Взрыва.

Г.А. Гамов выдвинул идею, что ранняя Вселенная была естественным ядерным реактором, в котором при известной (довольно умеренной) плотности и гигантской температуре произошел синтез всех химических элементов природы. Теория космического ядерного реактора совершенствовалась благодаря Э. Ферми, С. Хаяши, Ф. Хойл, У. Фаулер, М. Бербидж, Дж. Бербидж. В дальнейшем процесс космологического нуклеосинтеза заново, в более строгой постановке описали на основе данных ядерной физики Зельдович и Якубов.

В итоге большой многолетней коллективной работы специалистов разных стран стало очевидным, что космическая распространенность двух главных элементов – водорода и гелия – действительно может быть объяснена ядерными реакциями в горячем веществе ранней Вселенной.

Процесс образования гелия (рис. 1.17) из протонов и нейтронов протекает следующим образом. При температуре в миллиард градусов Кельвина протон и нейтрон могут, столкнувшись при своих быстрых тепловых движениях, слиться и образовать ядро дейтерия. Это уже составное ядро, но все же еще ядро водорода, ядро тяжелого водорода.

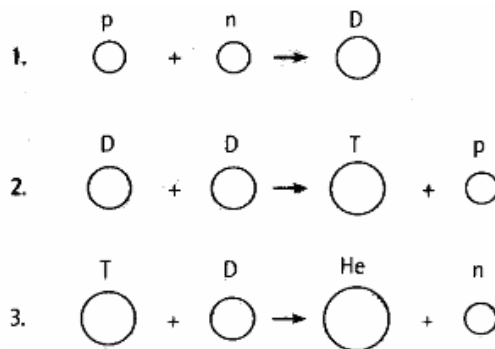


Рис. 3. Синтез гелия в горячей Вселенной. Ядра гелия (He) возникают в результате цепочки из трех ядерных реакций, в которых участвуют протоны (p), нейтроны (n) и ядра тяжелого водорода – дейтерий (D) и тритий (T).

Следующее звено в цепочке ядерных превращений таково. Два только что образовавшихся ядра дейтерия сталкиваются друг с другом и образуют ядро трития, выбрасывая при

этом один свободный протон. Тритий – это тоже водород, но самый тяжелый, в его ядре три частицы: один протон и два нейтрона. После этого ядро трития может столкнуться с другим ядром дейтерия. Слияние их ведет к образованию нового химического элемента – гелия, второго после водорода в таблице Менделеева. В ядре гелия, возникающем таким путем, содержится два протона и два нейтрона; это гелий-4, самый распространенный в природе изотоп гелия.

В той же реакции освобождается один нейтрон из тех трех, что были в исходных ядрах трития и дейтерия. На этом цепочка ядерных превращений не обрывается. В ходе столкновений и слияний частиц и легких ядер образуется гелий-3, легкий изотоп гелия. Но этих ядер образуется много меньше, чем ядер гелия-4. Образуются и ядра лития, третьего элемента таблицы Менделеева, но их возникает и еще меньше, чем ядер гелия-3.

Процесс ядерных превращений останавливается из-за падения температуры среды в ходе космологического расширения. При более низких температурах столкновения частиц уже не приводят к их слияниям, и дальше самых легких ядер процесс синтеза элементов в горячей ранней Вселенной не заходит. Основным продуктом этого процесса – гелий-4, на который с тех пор приходится около четверти массы звезд и межзвездного газа. Более тяжелые элементы (кислорода, углерода, кремния и т.д.) синтезируются не космологическим путем, например, при вспышках сверхновых звезд. На эти элементы приходится всего около двух процентов массы звезд и межзвездного газа.

Космический феномен – остаточное излучение ранней горячей Вселенной – получил, по предложению Шкловского, название реликтового излучения. В англоязычной литературе чаще говорят «космическое микроволновое фоновое излучение».

Изучение реликтового излучения показало, что оно заполняет пространство равномерно, и эта равномерность почти идеальна. Из-за своей почти идеально однородной плотности, реликтовое излучение приходит к нам равномерно из всех направлений, т. е. оно изотропно. Степень изотропии исключительно высока: относительные отклонения от нее не превышают сотых долей процента.

Открытие реликтового излучения было подтверждением не только идеи горячего начала мира. Это было также и подтверждение общей концепции эволюции мира, созданной А.А.Фридманом. Динамика и геометрия мира,

описываемые теорией Фридмана, вместе с термодинамикой и ядерной физикой космической среды, разработанными Гамовым, составляют главное содержание современной науки о Вселенной.

Таким образом, главными аргументами описанной картины эволюции Вселенной являются:

- существование фонового реликтового излучения, характеризующегося средней температурой фотонов $2,7^{\circ}\text{K}$;
- соотношения для распространенности легких элементов, измеренные экспериментально;
- доказательство факта расширения Вселенной и установление закона Хаббла.

К естественным реакторам помимо космического реактора также относятся ядра галактик, звезд и планет.

Солнце и звезды – естественные термоядерные реакторы с гравитационным удержанием плазмы. В 1935 году Ханс Бете выдвинул гипотезу, что источником солнечной энергии может быть термоядерная реакция превращения водорода в гелий.

Химический состав Солнца примерно такой же, как и у большинства других звезд. Примерно 75 % – водород, 25 % – гелий и менее 1 % – все другие химические элементы (в основном, углерод, кислород, азот и т.д.). Основным источником энергии – протон-протонный цикл – очень медленная реакция (характерное время $7,9 \cdot 10^9$ лет), так как обусловлена слабым взаимодействием. Ее суть состоит в том, что из четырех протонов получается ядро гелия. При этом выделяются пара позитронов и пара нейтрино, а также 26,7 МэВ энергии. Количество нейтрино, излучаемое Солнцем за секунду, определяется только светимостью Солнца. Поскольку при выделении 26,7 МэВ рождается 2 нейтрино, то скорость излучения нейтрино: $1,8 \cdot 10^{38}$ нейтрино/с.

Земля, как и любая другая активная планета, непрерывно выделяет огромное количество энергии, подогревая себя изнутри и периодически выбрасывая это тепло на поверхность в виде прорывающейся лавы. У ученых были различные версии по поводу природы этого тепла, но последние исследования не оставили сомнений – большая часть тепла возникает благодаря ядерным процессам внутри планеты.

В центре Земли находится не ядро из расплавленного железа и никеля, а поддерживающая постоянную ядерную реакцию смесь урана и плутония. Это ядро достигает почти 8 километров, и оно представляет собой «естественный ги-

гантский ядерный реактор». Такие выводы сделали ученые лаборатории при департаменте энергетики США.

В результате «работы» ядерного ядра вокруг Земли возникает мощное магнитное поле, которое защищает планету от опасных космических лучей, способных в течение нескольких секунд уничтожить всю биологическую жизнь. Естественный реактор также питает энергией движение материковых платформ и проявляется в извержении вулканов.

Всего наша планета выделяет порядка 44,2 тераватт энергии ежегодно. Предполагается, что у выделяемой планетой энергии два основных источника. Часть энергии приходится на так называемое доисторическое тепло (в процессе формирования новой планеты возникает огромное количество тепла, которое не распыляется в космическом пространстве, а сохраняется в центре планеты, расплавляя ее изнутри и образуя нынешнюю геоструктуру – обтекающую раскаленное ядро мантию из расплавленной магмы, на поверхности которой плавают тектонические плиты). Когда-то, несомненно, основная доля выделяемого тепла приходилась на это самое доисторическое тепло, но со временем лидирующие позиции заняли ядерные реакции. Согласно исследованиям, в результате распада урана-238 и тория-232 ежегодно выделяется 20 тераватт энергии, еще 4 тераватта планета получает в результате распада калия-40.

Представляется, что процессы функционирования существующих естественных реакторов определяются наличием у космических объектов пространственно-временных монополей.

В случае, когда ядерный реактор создает пространственно-временной монополь, реальный интерес для практического применения имеет тип «скрытая сингулярность», т.е. когда ядерный реактор является ядром черной дыры. Движение в пространстве монополя реактора объекта с нереляционными скоростями имеет аналогию с движением частиц в поле тяготения черной дыры по геодезическим линиям. Данный вопрос был рассмотрен такими учеными, как Зельдович, Новиков, Мизнер, Торн, Уилер.

Идеи и гипотезы использования пространственно-временных монополей естественных реакторов при космических полетах представлены в [19].

Заключение

Предложено представление о пространстве как совокупности параллельных естественных

пространственно-временных монополей, образованных источниками сверхвысоких энергий, таких как ядерный реактор вблизи мгновенной критичности, ядро Земли, Солнце, черные дыры и т.д., что позволяет объяснить «гравитационные аномалии».

Определена аналогия между процессами, протекающими в активной зоне ядерного реактора в состоянии, близком к мгновенной критичности, и процессами коллапса космических объектов. Найдены начальные условия, при которых по аналогии с астрофизическими понятиями реактор превращается либо в «скрытую сингулярность», либо в «голую сингулярность». Показаны особенности и различия пространственно-временных монополей ядерного реактора для голой и скрытой сингулярностей.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б. Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 736 с.
2. Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. Черные дыры, гравитационные волны и космология. – М.: Мир, 1977. – 376 с.
3. Пенроуз Р. Циклы времени. Новый взгляд на эволюцию Вселенной – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 333 с.
4. Зельдович Я.Б., Блинников С.И., Шакура Н.И. Физические основы строения и эволюции звезд. – М.: МГУ, 1981. – 150 с.
5. Зельдович Я.Б. Новиков И.Д. Теория тяготения и эволюция звезд. – М.: Наука, 1971. – 484 с.
6. Черепашук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. – Фрязино: «Век 2», 2007. – 320 с.
7. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум /Под ред. Н.С. Кардашева и В.И. Мороза – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.
8. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1984. – 384с.
9. Качур С.А. Модель движения космического аппарата при межгалактических полетах и теория космического реактора // Радиоэлектроника и информатика, 2012.– Вып. 2.– С.43-49.
10. Качур С.А. Энергетическая система Вселенной – Севастополь: «РИБЭСТ», 2012. – 76с.
11. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
12. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей //Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
13. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности.// Энергетические установки и технологии: науч.

- журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т.1. – №1. – С. 18-26.
14. Качур С.А. Энтропийный анализ безопасности управления ядерным реактором посредством электромагнитного излучения // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 4. – С.18-22.
 15. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реактором вблизи мгновенной критичности // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 5. – С.27-32.
 16. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства // Радиоэлектроника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С.22-26.
 17. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов // Сб.науч.тр.СНУЯЭиП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С.13-26.
 18. Качур С.А. Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №2. – С. 5-10.
 19. Качур С.А. Теория пространственно-временных монополей реакторов – Севастополь: РИБЕСТ, 2019. – 364с.
- ### References
1. Zel'derovich Ya.B., Novikov I.D. *Stroenie i evolyuciya Vselennoj* [Structure and evolution of Universe]. Moscow, Nauka, 1975. 736p.
 2. Rees M., Ruffini R., Wheeler J. *Chyornye dyry, gravitacionnye volny i kosmologiya* [Black holes, gravitational waves and cosmology]. Moscow, Mir, 1977. 376p.
 3. Penrouse R. *Cikly vremeni. Novyj vzglyad na evolyuciyu Vselennoj* [Cycles of time. New look on evolution of Universe]. Moscow, BINOM, 2014. 333p.
 4. Zel'derovich Ya.B., Blinnikov S.I., Shakura N.I. *Fizicheskie osnovy stroeniya i evolyuciya zvyozd* [Theory of gravitation and evolution of stars]. Moscow, MGU, 1981. 150p.
 5. Zel'derovich Ya.B., Novikov I.D. *Teoriya tyagoteniya i evolyuciya zvyozd* [Theory of gravitation and evolution of stars]. Moscow, Nauka, 1971. 484p.
 6. Cherepashuk A.M., Chernin A.D. *Universe, life, black holes*. [Universe, life, black holes]. Fryazsvo, «Vek 2», 2007. 320 p.
 7. Shklovskij I.S. *Vselennaya, zhizn', razum* [Universe, life, reason]. Moscow, Nauka, 1987. 320p.
 8. Shklovskij I.S. *Zvyozdy: ih rozhdenie, zhizn' i smert'* [Stars: their birth, life and death]. Moscow, Nauka, 1984. 384p.
 9. Kachur S.A. Movement model of space vehicle at intergalactic flights and space theory reactor. *Radioelectronika i informatika*, 2012, No. 2, pp. 43-49.
 10. Kachur S.A. *Energeticheskaya sistema Vselennoj* [Power system of Universe]. Sebastopol: «RIBEST». 2012. 76p.
 11. Kachur S.A. *Upravlenie yadernymi reaktorami na osnove krivizny prostranstva* [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sebastopol: «RIBEST». 2016. 220p.
 12. Kachur S.A. Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
 13. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
 14. Kachur S.A. Entropic analysis of safety of management by a nuclear reactor by means of electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teploekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 18-22.
 15. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. *Promyshlennaya teploekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
 16. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. *Radioelectronika i informatika*, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
 17. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sebastopol, SNUYaE i P, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.
 18. Kachur S.A. Movement of nonrelativistic object in the distorted space of nuclear reactor. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 2, pp. 5-10.
 19. Kachur S.A. *Teoriya prostranstvenno-vremennyh monopolej reaktorov* [Theory of space-time monopolies of reactors]. Sevastopol, RIBEST, 2019, 364p.

УДК 621.039.56

Идентификация событий для ядерных энергетических установок на основе сетевых моделей и статистических методов

С.А. Качур, Е.Н. Давиденко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 30.08.2022 г.; после доработки 01.09.2022 г.

Аннотация

Рассмотрено повышение безопасности ЯЭУ за счет идентификации аварийных ситуаций на основе методов и моделей сетей Петри, нейронных сетей и прикладной статистики, что позволяет реализовать принцип разнообразия.

Ключевые слова: идентификация, реакторная установка, дерево событий, сети Петри, нейронные сети, дискриминантный анализ.

Identification of events for nuclear power plants based on network models and statistical methods

S.A. Kachur, E.N. Davidenko

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 30.08.2022 y.; received in final form 01.09.2022 y.

Abstract

The article considers improving the safety of nuclear power plants by identifying emergency situations based on methods and models of Petri nets, neural networks and applied statistics, which makes it possible to implement the principle of diversity.

Keywords: identification, reactor plant, event tree, Petri nets, neural networks, discriminant analysis.

Введение

Мировой опыт эксплуатации ЯЭУ показывает, что проблема безопасности – проблема потенциально возможных, маловероятных аварий по причине отказа технических систем и ошибок персонала. Предотвращение аварий является одним из главных принципов безопасности и обеспечивается, в первую очередь, высокой надежностью оборудования и систем нормальной эксплуатации и квалификацией персонала.

Существующие нормативные требования предполагают детерминированное рассмотрение вопросов безопасности в рамках концепции проектных аварий и принципа единичного отказа.

Детерминистский подход не дает единой комплексной оценки безопасности сложной системы, неполно учитывает всю совокупность аварий. Поэтому в настоящее время все более широкое развитие приобретает вероятностный метод анализа безопасности ЯЭУ [1-8].

Основой вероятностного подхода является системный анализ мыслимых сценариев аварий, представленных в виде «деревьев событий» [4, 5]. Вероятностная оценка безопасности применяется как при проектировании АЭС и ее систем, так и при эксплуатации. Ограничения в использовании вероятностных методов связаны с недостаточностью данных для проведения соответствующего анализа, а также знаний о потенци-

альной опасности отказов, имеющих общие причины, и о поведении эксплуатационного персонала для каждой аварийной ситуации (исходного события). Кроме этого, существует необходимость выявления отказов оборудования, приводящих к множественным или зависимым отказам или к снижению эффективности систем.

Исходя из опыта аварий последнего времени, можно сделать заключение, что только параллельный (без учета локальных взаимных связей) анализ ряда исходных событий и путей их развития не удовлетворяет требованиям обеспечения безопасности ЯЭУ. Как следствие этого – необходимость рассмотрения не множества независимых сценариев аварийных ситуаций, каждый из которых описывается «деревом событий», а единой сети этих сценариев, учитывающей реальную ситуацию и позволяющей прогнозировать ее развитие на базе текущих вероятностей отказа оборудования ЯЭУ. Для реализации такого подхода предлагается использовать математический аппарат сетей Петри [2], метод прикладной статистики, а именно дискриминатный анализ, и нейронные сети, которые позволят определить степень риска возникновения аварии с учетом случайных причинно-следственных связей различных сценариев. Наличие случайных связей обусловлено не только влиянием внешних случайных факторов, но и отсутствием априорной информации о поведении системы на всем множестве возможных состояний.

В соответствии с «Правилами ядерной безопасности реакторных установок ядерных станций» принципы независимости, разнообразия и резервирования являются фундаментальными принципами повышения надежности, согласно которым системы безопасности должны проектироваться так, чтобы влияние исходных событий, отказов, дефектов оборудования, ошибок персонала и отказов по общей причине, на работоспособность систем было минимальным.

Принцип разнообразия – принцип повышения надежности систем путем применения в разных системах (либо в пределах одной системы в разных каналах) различных средств и/или аналогичных средств, основанных на различных принципах действия для осуществления заданной функции.

При использовании этого принципа стремятся обеспечить повышение уровня безопасности, исключив методические или типовые недостатки, свойственные оборудованию и таким образом, расширив возможности предотвращения

нарушений.

Цель и задачи исследования

Цель работы – повышение безопасности ЯЭУ за счет идентификации аварийных ситуаций на основе методов и моделей сетей Петри, нейронных сетей и прикладной статистики.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать модель поведения системы, прогнозирующую аварийную ситуацию. Модель должна включать все исходные состояния, предусмотренные проектом, и отражать пути развития ситуаций, представленные в сценариях различных аварий. В этом контексте процесс смены состояний ЯЭУ является процессом переменной случайной структуры.

Модель аварийных ситуаций ЯЭУ на основе стохастических сетей Петри

Описание структуры процесса выполняется стохастической СП, которая отражает сценарии аварийных ситуаций S_k ($k = \overline{1, m}$). На рис. 1 приведен в виде «дерева событий» сценарий аварийной ситуации, рассмотренный в [5].

Маркированная стохастическая СП в совокупности с моделями элементов, сопоставленных переходам, и моделями сигналов, определяющих движение маркера, является моделью стохастического процесса переменной случайной структуры. При расчете вероятностей, сопоставленных переходам, будем использовать байесовский подход к статистическому оцениванию [8], предполагая, что для ситуации имеется две вероятностные модели: работоспособное состояние системы, неработоспособное состояние системы.

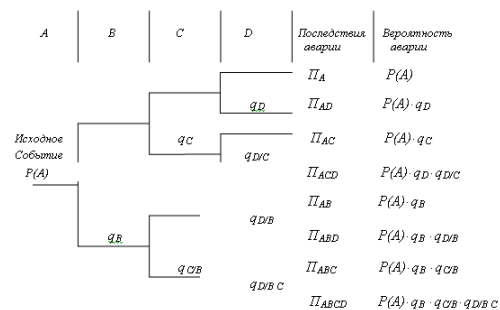


Рис. 1. Вид «дерева событий»: верхние ветви после разветвления соответствуют работоспособному состоянию системы, а нижние ветви – неработоспособному состоянию; q – вероятность отказа системы (B, C, D); $P(A)$ – вероятность исходного события

Приведем этапы построения модели ЯЭУ на основе стохастической сети Петри, рассматривая все сценарии развития аварийных ситуаций (исходных событий).

1. Определяем вероятность неработоспособного состояния блока D_j ($j = \overline{1, n}$) при наибольшем несоответствии распределения параметров теоретическому закону распределения

$$\alpha_j^- = 1 - \min_i p_{ji}. \quad (2)$$

2. Определяем вероятность неработоспособного состояния блока D_j ($j = \overline{1, n}$) при наименьшем несоответствии распределения параметров теоретическому закону распределения

$$\alpha_j^+ = 1 - \max_i p_{ji}. \quad (3)$$

3. Выполним построение дерева вероятностей для модели «неработоспособного состояния». Число уровней дерева вероятностей соответствует количеству блоков $n1$, число узлов дерева вероятностей — 2^{n1} . Устанавливаем вероятность исходного состояния θ_0 равную минимальной рассчитанной по проекту вероятности.

4. В соответствии со сценарием S_k определяем подмножество блоков $DD \subseteq D$ и последовательность их влияния на развитие аварийной ситуации. Для каждого узла уровня x ($x = \overline{1, n1}$) дерева вероятностей (рис.2), используя рекуррентную формулу (вероятность θ_x рассчитывается через вероятность θ_{x-1} , сопоставленную предшествующему узлу дерева), находим вероятность неработоспособного состояния при наличии наибольшего несоответствия распределения параметров блока $DD_x \equiv D_j$ ($DD_x = "-"$) и при наличии наименьшего несоответствия распределения параметров блока $DD_x \equiv D_j$ ($DD_x = "+"$)

$$\theta_x = \begin{cases} \frac{\alpha_x^- \theta_{x-1}}{(1 - \alpha_x^+) + (\alpha_x^- + \alpha_x^+ - 1) \theta_{x-1}}, & \text{если } DD_x = "-" \\ \frac{(1 - \alpha_x^-) \theta_{x-1}}{\alpha_x^+ + (\alpha_x^- + \alpha_x^+ - 1) \theta_{x-1}}, & \text{если } DD_x = "+" \end{cases} \quad (4)$$

5. Для каждого сценария аварийной ситуации S_k ($k = \overline{1, m}$) выполняем п.3-4.

6. Пересчитываем вероятности неработоспособного состояния блоков D_j ($j = \overline{1, n}$) по формуле

$$p_j = \max_{S_k} \max_{D_j} \theta_x \quad (5)$$

7. Сопоставляем в стохастической сети

Петри (рис.3) переходам $T_j^{(D)}$ ($j = \overline{1, n}$), соответствующим блокам ЯЭУ, вероятности p_j , рассчитанные по формуле (5). Переходам, соответствующим исходным состояниям $T_k^{(S)}$ ($k = \overline{1, m}$) и системе контроля параметров T_0 , сопоставляем вероятности равные 1. Дуга с выходной позиции $P_j^{(D)}$ перехода $T_j^{(D)}$ на вход перехода $T_i^{(D)}$ присутствует в том случае, если хотя бы в одном сценарии аварии существует непосредственная связь между блоками D_j и D_i .

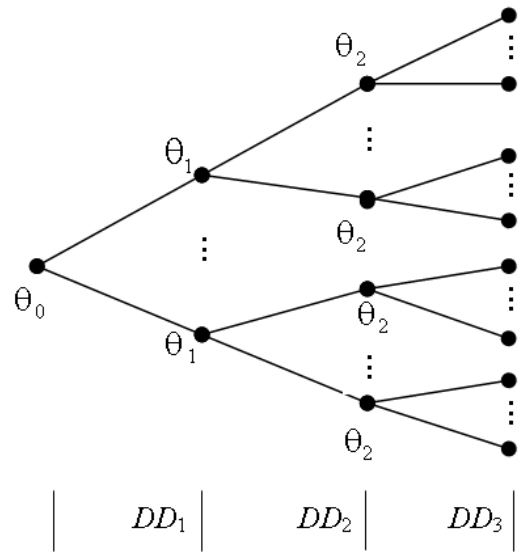


Рис. 2. Дерево вероятностей для сценария аварии S_k в случае неработоспособного состояния: верхние ветви после разветвления соответствуют "-", а нижние ветви — "+"

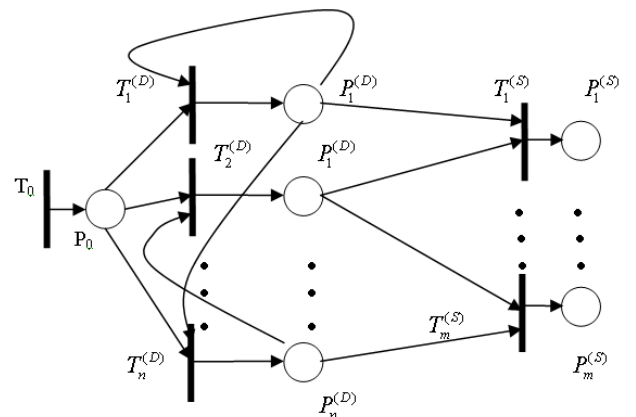


Рис. 3. Модель аварийных ситуаций ЯЭУ на основе стохастических СП.

Рассмотрим кратко классификацию на основе обучающей выборки с использованием дискриминантного анализа и нейронных сетей.

Формулировка задачи идентификации состояния объекта на основе дискриминантного анализа

Задача дискриминантного анализа может быть сформулирована следующим образом [8].

Предположим, рассматривается m обучающих выборок, описывающие m классов событий. Каждая из выборок включает наблюдения p параметров системы $\{x^{(1)}, \dots, x^{(p)}\}$. Таким образом, i -е событие описывается вектором параметров

$$X_i = (x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(p)}).$$

Данные о n состояниях, соответствующих каждому событию, т.е. значения параметров $\{x^{(1)}, \dots, x^{(p)}\}$ приведены в форме таблицы.

Таблица. Показатели состояния системы

i	Событие первое			Событие j -е			Событие m -е		
	$x_{1i}^{(1)}$	$\dots$	$x_{1i}^{(p)}$	$x_{ji}^{(1)}$	$\dots$	$x_{ji}^{(p)}$	$x_{mi}^{(1)}$	$\dots$	$x_{mi}^{(p)}$
1	$x_{11}^{(1)}$		$x_{11}^{(p)}$				$x_{m1}^{(1)}$		$x_{m1}^{(p)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$		$\dots$		$\vdots$	$\dots$	$\vdots$
n	$x_{1n}^{(1)}$		$x_{1n}^{(p)}$				$x_{mn}^{(1)}$		$x_{mn}^{(p)}$

Необходимо знать, к какому классу относится текущее событие в настоящий момент, если известны текущие значения параметров $\{x_0^{(1)}, \dots, x_0^{(p)}\}$ этого блока.

Идентификация события с использованием нейронных сетей

При решении задачи классификации наиболее часто используются нейронные сети встречного распространения. Нейронные сети встречного распространения (двунаправленные нейронные сети, в системе MATLAB именуемые Learning Vector Quantization или LVQ-network) состоящие из входного слоя нейронов и так называемых слоев нейронов Кохонена и Гроссберга, по своим характеристикам существенно превосходят возможности сетей с одним скрытым слоем нейронов.

Так, время их обучения за дачам распознавания и кластеризации более чем в сто раз меньше времени обучения аналогичным задачам сетей с обратным распространением. Это может

быть полезно в тех приложениях, где долгая обучающая процедура невозможна.

Сеть встречного распространения имеет два слоя с последовательными связями Первый слой – слой Кохонена, второй – слой Гроссберга. Каждый элемент входного сигнала подается на все нейроны слоя Кохонена. Каждый нейрон слоя Кохонена соединен со всеми нейронами слоя Гроссберга. Отличие сети встречного распространения от других многослойных сетей с последовательными связями состоит в операциях, выполняемых нейронами Кохонена и Гроссберга.

В режиме функционирования сети предъявляется входной сигнал X и формируется выходной сигнал Y . В режиме обучения на вход сети подается входной сигнал и веса корректируются, чтобы сеть выдавала требуемый выходной сигнал.

Предположим, поставлена следующая задача классификации: задан набор из 10 векторов, представленных в виде столбцов матрицы

$$P = \begin{bmatrix} -2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 3 & 2 \\ 1 & -1 & 2 & 1 & -1 & -2 & 1 & -1 & 3 & 2 \\ 1 & -1 & 2 & 1 & -1 & -2 & 1 & -2 & 3 & 2 \end{bmatrix}$$

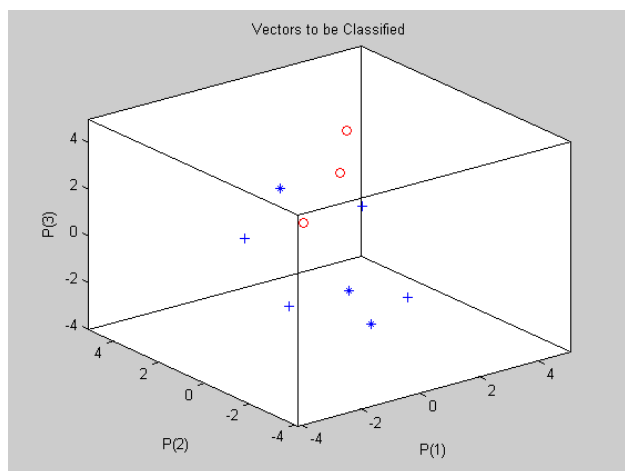
а также задан вектор-строка, указывающий принадлежность каждого вектора к одному из трех классов:

$$C = [1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 3 \ 3]$$

Требуется построить автоматический классификатор подобных векторов, используя приведенные данные как обучающую выборку. Определить номер события Y для значений параметров $X = [2; 2; 2]$.

Решение подобной задачи в программной среде MATLAB проведем с применением сети встречного распространения так, как это показано ниже.

```
P=[ -2 -2 0 0 0 0 2 2 3 2; 1 -1 2 1 -1 -2 1 -1 3 2;
1 -1 2 1 -1 -2 1 -2 3 2]
C=[ 1 1 2 3 2 2 1 1 3 3]
T=ind2vec(C)
plotpv(P,T)
net=newlvq(minmax(P), 4,[.4 .3 .3],0.1)
net.trainParam.epochs=150
net.trainParam.show=Inf
net=train(net,P,T)
X=[2; 2; 2]
Y=sim(net,P)
```



Y =
0
0
1

Таким образом, наблюдаемое событие относится к третьему классу.

Заключение

Предложены различные методы для идентификации состояния ЯЭУ, представленного деревом событий. Предложенные модели дают эквивалентное по сложности описание ситуации. Применение этих методов позволит реализовать принцип разнообразия для повышения надежности, за счет снижения влияния исходных событий, отказов, дефектов оборудования, ошибок персонала и отказов по общей причине на работоспособность систем.

Предложенный подход к идентификации аварийных режимов блоков ЯЭУ направлен на модификацию программной части СВРК. Он позволяет сократить время идентификации состояния при возникновении нарушений технологического процесса.

Список литературы

1. Шаповалова С.И., Шараевский Г.И. Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС // Проблемы программирования – 2008, – № 2–3. – С. 675–678.
2. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем/ Д. Питерсон –М.:Мир,1984. – 264с.
3. Григорьев В.А., Колубин А.А, Логинов В.А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
4. Анохин А.Н., Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Системы поддержки оператора АЭС. – Обнинск: Институт атомной энергетики, 1988. – 92с.
5. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б.

Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.

6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
7. Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С. Анализ состояния ГЦН ВВЭР1000 в процессе эксплуатации.//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – №4. – С. 12–20.
8. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрии. – М.: ЮНИТИ, 1998.– 1022с.

References

1. Shapovalova S.I., Sharoevskij G.I. Environment of design of neuron nets for the decision of tasks of diagnostics of equipment of APP. *Problemy hrogrammirovaniya*, 2008, № 2-3, pp. 675-678.
2. Piterson D. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem* [Theory of the Petry nets and systems simulation] Moscow , Mir, 1984, 264 p.
3. Grigor'ev V.A., Kolyubin A.A., Loginov V.A. *Elektronnye metody yaderno-fizicheskogo eksperimenta* [Electronic methods of nuclear-physical experiment]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 336 p.
4. Anohin A.N., Ostrejkovskij V.A., Sal'nikov N.L. *Sistema podderzhki operatora AES* [Systems of support of operator of APP]. Obninsk, Institut atomnoj anenergetiki, 1988, 92 p.
5. Bahmet'ev A.M., Samojlov O.B., Usynin G.B. *Bezopasnost' yadernyh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 279 p.
6. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs* [Neuron nets: complete course]. Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006, 1104 p.
7. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. Analysis of the state PCP PWR1000 in the process of exploitation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2016, №4, pp. 12-20.
8. Ajvazayn S.A., Mhitaryan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometrii* [Applied statistics and bases of mathematical economics]. Moscow, YuNITI, 1998, 1022 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.032.26:620.22

**Определение участков механических повреждений
металлографических шлифов с применением нейросетей**

А.В. Исаев¹, А.А. Назаркин¹, С.В. Максимов¹, К.Б. Матузаев²,
Т.В. Мозолевская¹

¹ФГБВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова»
Дыбенко Павла, 1А, г. Севастополь, 299028, Россия, alexey9588@yandex.ru

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053,
k.b.matuzae@sevsu.ru

Статья поступила 17.06.2022 г.; после доработки 21.06.2022 г.

Аннотация

Предложен способ определения участков механических повреждений (царапин, ржавчины) металлографических шлифов с применением свёрточных нейросетей.

Ключевые слова: механические повреждения, металлографические шлифы, распознавание, свёрточные нейросети.

**Determination of areas of mechanical damage
in metallographic sections using neural networks**

A.V. Isaev¹, A.A. Nazarkin¹, S.V. Maximov¹, K.B. Matuzae², T.V. Mozolevskaya¹

¹Black Sea Higher Naval College named after P.S. Nakhimova, 1A Dybenko Pavla st., Sevastopol, 299028, Russia,
alexey9588@yandex.ru

²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, k.b.matuzae@sevsu.ru

Received 17.06.2022 y. received in final form 21.06.2022 y.

Abstract

A method for determining areas of mechanical damage (scratches, rust) of metallographic sections using convolutional neural networks is proposed.

Keywords: mechanical damage, metallographic sections, recognition, convolutional neural networks.

Введение

Ещё более полувека назад академик Амосов Н.М. об использовании искусственного интеллекта высказывался с предостережением: «Мне представляется, что есть возможность «разложить по полочкам» самые сложные проявления интеллекта и даже с перспективой на его развитие выше уровня человеческого разума. ...На этом пути стоят большие трудности. ...»

Предупреждаю, что предмет исключительно сложен для понимания, поскольку лежит

на стыке физиологии, психологии, техники и даже философии» [1].

На сегодняшний день в заголовках из новостных лент можно встретить отношение к использованию данного ресурса несколько иронично: «Искусственный интеллект выступил на конференции и предупредил, что он опасен» [2].

Необходимо обратить внимание ещё на одну не маловажную составляющую при эксплуатации различных видов техники, такую как учёт человеческого фактора.

И на помощь нам в этом вопросе должен прийти искусственный интеллект с его продвинутыми возможностями по использованию больших массивов данных, быстрдействию и без усталости.

Согласно отчётам советских лётчиков времён ВОВ, которым нередко приходилось садиться, не выпуская шасси, что называется «на брюхо», погнутые при этом лопасти винта порой удавалось тут же на месте посадки выпрямить, и вновь подняться в воздух [3]. Это было возможно благодаря тому, что лопасти самолётов уже тогда производились из сплавов алюминия с высокими прочностными и упругими свойствами – дюралюминов (рисунок 1). Своей повышенной прочностью эти сплавы обязаны фазам-упрочнителям интерметаллидам CuAl_2 и Al_2CuMg .



Рис.1. «Ил-2» – советский штурмовик времён Второй мировой войны, созданный в ОКБ-240 под руководством авиаконструктора Сергея Ильюшина. Самый массовый боевой самолёт в истории авиации (выпущено более 36000)

Из всего многообразия происшествий со знаком «минус», причиной которых стали усталостные трещины, а затем и последовавшая коррозия, наиболее наглядной, пожалуй, является авария «Боинга – 737» авиакомпания «Алоха Эйрлайнс» (рисунок 2), случившаяся 29 апреля 1988 года [4]. Он совершал короткий перелёт с острова Хило на остров Гонолулу. Причём таких циклов взлёт-посадка за 19 лет эксплуатации он совершил 89681 раз и это был абсолютный рекорд для коммерческих авиалайнеров такого типа.

Надо отметить, что эта напряжённая нагрузка на самолёт усугублялась тем, что летал он в районе с тропическим климатом, и поэтому помимо постоянных температурных перепадов, знакопеременных нагрузок был подвержен воздействию влажного воздуха, насыщенного морской солью. В тот апрельский день идилия комфортного для пассажиров перелёта в одно мгновение

была нарушена. В салоне 1 класса в потолке над перегородкой вдруг появилась трещина. Затем ворвавшийся в салон ледяной вихрь вырвал секцию обшивки самолёта длиной 5 м и унёс её. Заодно он «выдул» стюардессу, разбившую напитки в переднем салоне. Из-за нарушения сплошности конструкции фюзеляжа он под весом пилотской кабины изогнулся подобно луку, так что пассажиры впереди видели только голубое небо.

Несмотря на разгерметизацию, потерю аэродинамических качеств, стремление самолёта спикировать, а также заглохший на глиссаде левый двигатель экипажу каким-то чудом удалось посадить машину-кабриолет на ближайшем острове – Мауи.



Рис.2. «Боинг – 737» авиакомпании «Алоха Эйрлайнс»

Как установила следственная комиссия, основные причины происшествия были следующие: в штатном расписании авиакомпании отсутствовала должность инженера по контролю за состоянием силового набора и обшивки самолётов; вместо положенных 27 механиков и техников самолёты готовили к вылету только 17; регистрационные журналы были полны отметками об отказах различных систем как в воздухе, так и на земле; за 6 месяцев до происшествия инженеры «Боинга» предупреждали администрацию авиакомпании о необходимости срочного ремонта обшивки и силового набора лайнеров «Боинг-737»; и, наконец, самое удивительное. За день до полёта один из пассажиров во время посадки в самолёт заметил, что обшивка верхней части фюзеляжа над передней дверью деформировалась в форме гармошки! Сказать об этом работникам авиакомпании, ему, видимо, помешала излишняя скромность. А зря.

Таким образом, заключение комиссии о причинах аварии выводит на первое место не технологические или конструктивные особенно-

сти и даже не тяжёлые условия эксплуатации самолёта, а ставший уже «притчей во языцех» ничем не перешибаемый человеческий фактор.

Одному из соавторов данной статьи вспомнился вроде бы рядовой, но в тоже время весьма примечательный случай из начала 80-х годов на плавучем доке, где проходил доковый ремонт МПК проекта 1145.1 на подводных крыльях, корпус которого был полностью выполнен из алюминиевого сплава.

В процессе эксплуатации корабля образовалась небольшая течь под кормовым срезом в районе выхода балера руля из корпуса. Строитель, руководивший работами, поставил задачу: заменить участок обшивки корпуса с разборкой рулевого устройства и заменой уплотнений, крепившихся фланцами при помощи заклёпок большого диаметра.

В процессе выполнения работ, вышедших из сроков докования, выяснилось, что необходимости в демонтаже и замене обшивки не было. Достаточно было высверлить заклёпки и поменять протёкшие сальники, что значительно сократило бы сроки и стоимость ремонта.

Наиболее эффективный путь преодоления пресловутого человеческого фактора является использование технологий искусственного интеллекта при проведении задач по дефектовке и техническому контролю. Причём выбор метода неразрушающего контроля для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики зависит как от параметров контролируемого объекта, так и от условий его обследования. В зависимости от их потенциальной опасности дефекты делятся на малозначительные (допустимые) и критические (недопустимые).

Последние подлежат обязательному обнаружению и незамедлительному устранению или исправлению. Наиболее грубыми дефектами являются макроскопические, часто видимые невооружённым глазом. Они представляют собой нарушения сплошности металла и особенно резко снижают прочность детали или конструкции [5].

Исходя из приведенных фактов и соображений возникла идея использовать элементы искусственного интеллекта, на примере применения свёрточных нейросетей с глубоким обучением [6, 7], в микроскопическом анализе с целью устранения его недостатков, а в дальнейшем возможного уменьшения затрат, связанных с использованием в технике как гражданского, так и военного назначения материалов и узлов низкого качества.

Цель статьи

Предложить способ определения участков механических повреждений металлографических шлифов с применением свёрточных нейросетей.

В данной работе изучена возможность обнаружения микроскопических механических повреждений, которые накопились на металлографических шлифах различных материалов и сплавов в процессе их более чем 3-х летней эксплуатации с использованием методов микроструктурного анализа и искусственного интеллекта.

В исследованиях была задействована испытательная установка, состоящая из микроскопа металлографического 4XB с цифровой фотокамерой TourCam, встраиваемой в гнездо вместо одного из окуляров. Камера подключалась к компьютеру, на котором с помощью специальной программы можно получать, обрабатывать и хранить цифровые изображения микроструктур. Микрошлифы для изучения располагались на рабочем столе микроскопа. С помощью макро- и микровинтов происходила настройка резкости, а затем регулировочными винтами – горизонтальное перемещение рабочего стола, после – фотографирование различных участков наблюдаемой поверхности (рисунок 3).

Из имеющихся шлифов были выбраны следующие: белый доэвтектический чугун; ЛС59-1 – латунь с содержанием 59% меди, 1% свинца и 40% цинка; сталь 08X18H10T – высоколегированная сталь с содержанием 0,085% углерода, 18% хрома, 10% никеля, 1% титана; сталь 10 – углеродистая сталь с содержанием углерода 0,1%; Д16 – дюралюмин № 16.

Рассмотрим использование свёрточной нейросети на примере 25-слойной нейросети, прототипом которой является сеть Googlenet. Работа компьютерной программы исчерпывающим образом в своё время была представлена в работе [8].

Для обучения нейросети имеем, например, 8 классов (2 x 4) шлифов различных материалов. Весь обучающий материал хранится в папке MXPV. Директория хранения изображений шлифов показана на рисунке 4. Вложенные папки директории с изображениями шлифов представлены на рисунке 5.

Метки классов изображений шлифов продемонстрированы на рисунке 6. Таблица с динамикой параметров обучения, распознавания и валидации нейросети иллюстрируется рисунком 7. Матрицы вероятности распознавания изображений шлифов в динамике определены рисунком 8.

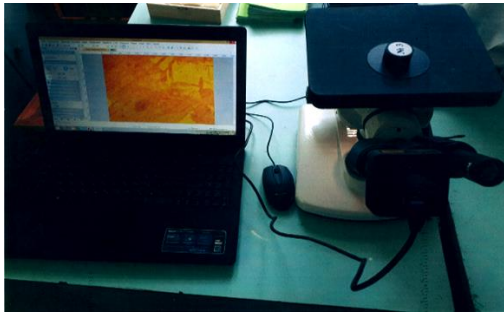


Рис.3. Экспериментальная установка

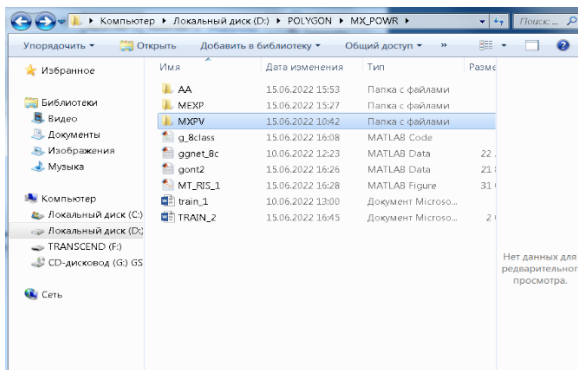


Рис.4. Директория хранения изображений шлифов

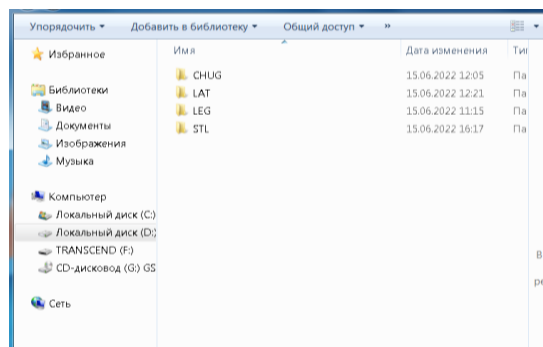


Рис.5. Вложенные папки директории с изображениями шлифов

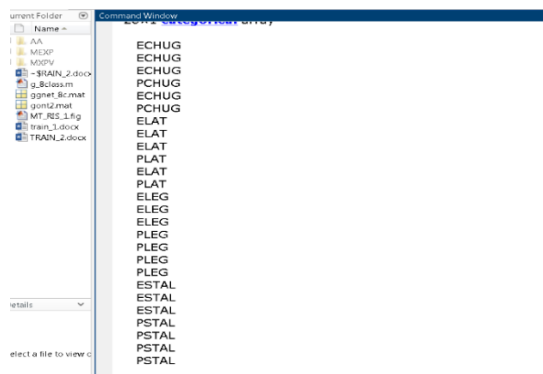


Рис.6. Метки классов изображений шлифов

Training on single CPU.
Initializing input data normalization.

Epoch	Iteration	Time Elapsed	Mini-batch Accuracy	Validation Accuracy	Mini-batch Loss	Validation Loss	Base Learning Rate
1	1	00:00:15	20.00%	26.92%	4.1420	2.6562	0.0003
1	4	00:00:41	6.67%	30.77%	3.0767	1.9169	0.0003
2	8	00:01:18	33.33%	46.15%	1.8364	1.3886	0.0003
3	12	00:01:47	66.67%	69.23%	0.9954	0.8685	0.0003
4	16	00:02:14	66.67%	80.77%	0.7561	0.6514	0.0003
5	20	00:02:40	86.67%	73.08%	0.4419	0.5507	0.0003
6	24	00:03:07	80.00%	69.23%	0.3521	0.6084	0.0003
7	28	00:03:43	93.33%	80.77%	0.2266	0.5165	0.0003
8	32	00:04:20	80.00%	80.77%	0.2315	0.4406	0.0003
9	36	00:04:47	93.33%	73.08%	0.1910	0.4310	0.0003
10	40	00:05:14	93.33%	80.77%	0.1487	0.4411	0.0003
11	44	00:05:40	100.00%	76.92%	0.0340	0.5375	0.0003
12	48	00:06:07	93.33%	80.77%	0.2741	0.4813	0.0003
13	50	00:06:22	100.00%		0.0348		0.0003
13	52	00:06:41	100.00%	84.62%	0.0451	0.3437	0.0003
14	56	00:07:18	100.00%	84.62%	0.0394	0.3302	0.0003
15	60	00:07:48	100.00%	84.62%	0.0176	0.3147	0.0003
16	64	00:08:14	100.00%	92.31%	0.0104	0.3294	0.0003
17	68	00:08:40	100.00%	92.31%	0.0255	0.3586	0.0003

Рис.7. Таблица с динамикой параметров обучения, распознавания и валидации нейросетью

26x8 single matrix

0.8327	0.0000	0.0007	0.0000	0.1648	0.0009	0.0006	0.0003
0.9875	0.0005	0.0000	0.0000	0.0114	0.0004	0.0000	0.0000
0.9887	0.0001	0.0002	0.0001	0.0054	0.0054	0.0001	0.0000
0.0132	0.0001	0.0069	0.0000	0.9793	0.0001	0.0004	0.0001
0.9550	0.0001	0.0004	0.0001	0.0434	0.0011	0.0001	0.0000
0.1081	0.0004	0.0004	0.0004	0.8888	0.0009	0.0002	0.0008
0.0017	0.5736	0.0000	0.0008	0.0003	0.4237	0.0000	0.0000
0.0064	0.6106	0.0000	0.0005	0.0014	0.3809	0.0000	0.0000
0.0023	0.9489	0.0000	0.0039	0.0015	0.0433	0.0000	0.0000
0.0114	0.2380	0.0000	0.0001	0.0005	0.7600	0.0000	0.0000
0.0059	0.9450	0.0000	0.0018	0.0008	0.0464	0.0000	0.0000
0.1837	0.1777	0.0004	0.0010	0.0118	0.6251	0.0001	0.0002
0.0004	0.0002	0.9580	0.0003	0.0192	0.0000	0.0217	0.0001
0.0099	0.0072	0.8798	0.0044	0.0808	0.0173	0.0006	0.0001
0.0000	0.0000	0.0154	0.0001	0.0001	0.0000	0.9844	0.0001
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9996	0.0004
0.0002	0.0003	0.0523	0.0002	0.0403	0.0007	0.9027	0.0034
0.0000	0.0000	0.3756	0.0000	0.0010	0.0000	0.6232	0.0001
0.0001	0.0113	0.0000	0.9840	0.0002	0.0002	0.0001	0.0042
0.0000	0.0023	0.0001	0.9365	0.0001	0.0001	0.0006	0.0602
0.0004	0.0496	0.0001	0.9457	0.0004	0.0005	0.0001	0.0033
0.0000	0.0001	0.0000	0.0092	0.0002	0.0000	0.0017	0.9888
0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0022	0.0000	0.0010	0.9964
0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0022	0.0001	0.0008	0.9964
0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0053	0.0000	0.0010	0.9935

Рис.8. Матрицы вероятности распознавания изображений шлифов в динамике

Графики распознавания механических повреждений шлифов свёрточной нейросетью с глубоким машинным обучением проиллюстрированы на рисунке 9: в верхней части продемонстрирована динамика процесса обучения в виде следующих линий: синяя – график обучения нейросети (жирная – сглаженный, тонкая – не-сглаженный), чёрная – график валидации нейросети; в нижней части: красная – график функции потерь при обучении нейросети (жирная – сглаженный, тонкая – не-сглаженный), чёрная – график функции потерь при валидации нейросети.

Подсвеченные вертикальные области обозначают эпохи. Справа от поля графиков в численно-текстовой форме отображены основные параметры процесса обучения и валидации. На оси ординат – точность идентификации, %. Выходные данные в виде вероятностей распознавания изображений шлифов – на рисунке 10.

Для распознавания механических повреждений шлифов с 10 классами (2 x 5) добавлен диоралюмин (рисунки 11 и 12).

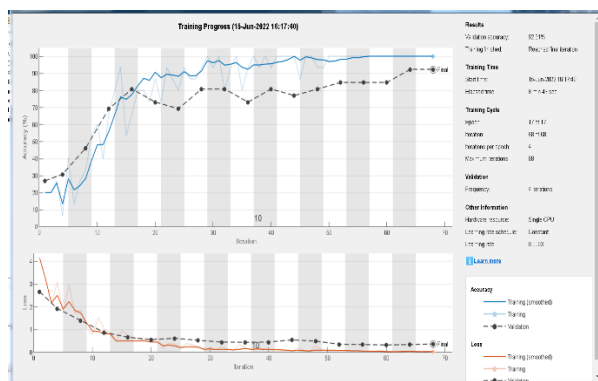


Рис.9. Графическое распознавания механических повреждений шлифов
(на оси ординат – точность распознавания, %)

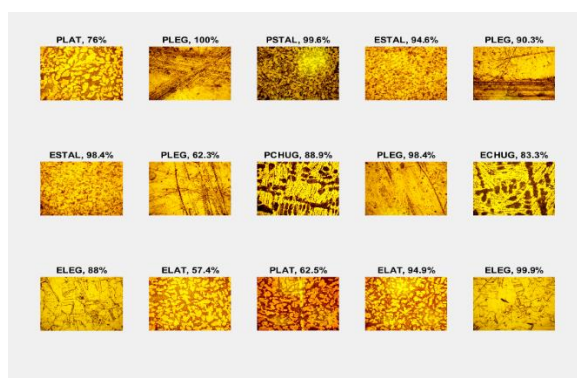


Рис.10. Вероятности распознавания механических повреждений шлифов
(выходные данные)

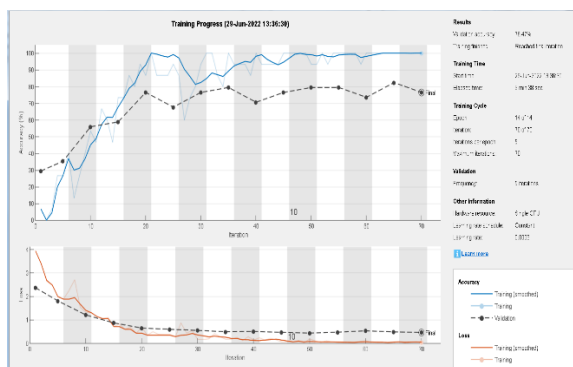


Рис.11. Графическое распознавания механических повреждений шлифов

Распознавание механических повреждений шлифов с 2 классами (2 x 2), где только дюралюмин – на рисунках 13 и 14.

Изменения, происходящие внутри деформируемого материала, находят однозначное отражение в изменениях рельефа его поверхности.

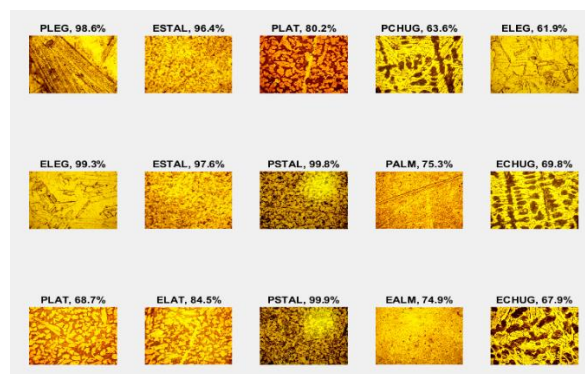


Рис.12. Вероятности распознавания механических повреждений шлифов

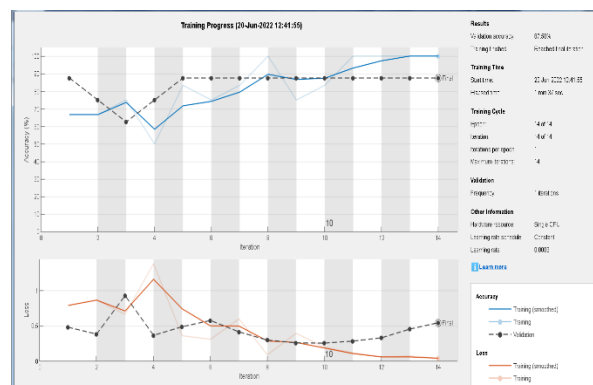


Рис.13. Графическое распознавания механических повреждений шлифов

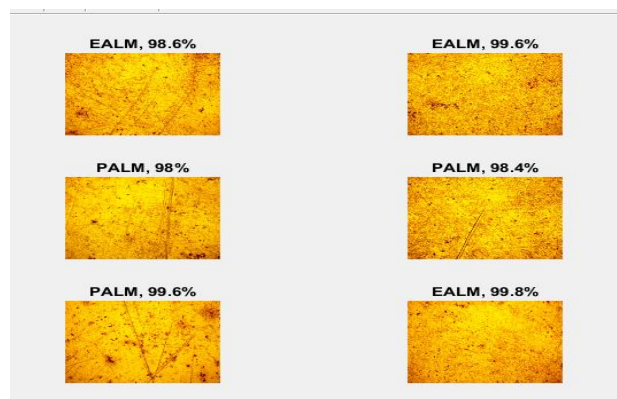


Рис.14. Вероятности распознавания механических повреждений шлифов

Оценка напряженно-деформированного состояния исследуемого материала может быть произведена по анализу этого рельефа. Поэтому изучение зарождения, развития и взаимодействия элементов микроструктуры на поверхности позволяет проследить динамику развития

процессов, протекающих в исследуемом материале в целом [9, 10].

Выводы

В результате разработки способа применения свёрточных нейронных сетей для распознавания изображений с использованием [11, 12] получены: архитектура многослойной нейросети с возможностью распознавания механических повреждений (царапины, ржавчина) различных классов шлифов; структура хранения данных с обучающим пакетом и пакетом валидации; графическая фиксация процесса обучения и распознавания независимых данных, а также приемлемые вероятности идентификации нейросетью микроструктур (около 90 %) в виде табличных данных. Работа сети основывалась на использовании геометрических, колористических и топологических признаков.

Дальнейшие исследования будут связаны с увеличением вероятности распознавания изображений с наращиванием элементов искусственного интеллекта, например, [13] или прецизионное обследование различных поверхностей нанороботами, а также со снижением затрат на предварительную подготовку данных и процесс обучения.

Список литературы

1. Амосов Н.М. Алгоритмы разума. – Киев: Наукова думка, 1979. – 224 с.
2. URL: <https://hightech.fm/2021/12/13/ai-dangerous.html> (дата обращения: 20.07.2022).
3. Розен Б.Я., Розен Я.Б. Металл особой ценности. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
4. Жигора Д. Загадки авиакатастроф. – Минск: Литература, 1997. – 342 с.
5. Боровиков А.С., Горбунов В.И., Гурвич А.К. Справочник: Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. – М.: Машиностроение, 1975. – 392 с.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
7. Николенко С., Кадуринов А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
8. Исаев А.В., Матузаева О.В., Назаркин А.А., Максимов С.В. Использование свёрточных нейросетей для идентификации структур металлов и сплавов при микроструктурном. Сб. науч. тр. Энергетические установки и технологии. – Том 7. – Вып. 3. – Севастополь: СевГУ, 2021. – С. 30 – 36.
9. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
10. Васьков Х. Практическая металлография. – М.:

Металлургия, 1988 – 320 с.

11. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2001. – 630 с.
12. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
13. Сомов С.Н., Баранов Г.В., Поляшов М.А., Пыркин А. А. Роботизированный дефектоскоп для диагностики состояния сварных соединений // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 9. – С. 798 – 802.

References

1. Amosov N.M. Mind Algorithms. – Kyiv: Naukova Dumka, 1979. – 224 p.
2. URL: <https://hightech.fm/2021/12/13/ai-dangerous.html> (accessed 20.07.2022).
3. Rosen B.Ya., Rosen Ya.B. Metal of special value. – M.: Metallurgy, 1980. – 208 p.
4. Zhigora D. Riddles of air crashes. – Minsk: Literature, 1997. – 342 p.
5. Haykin S. Neural networks: a complete course. – M.: Williams, 2006. – 1104 p.
6. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Deep learning. – SPb.: Peter, 2018. – 480 p.
7. Isaev A.V., Matuzayeva O.V., Nazarkin A.A., Maksimov S.V. The use of convolutional neural networks to identify the structures of metals and alloys in microstructural. Sb. scientific tr. Power installations and technologies. – Volume 7. – Issue. 3. – Sevastopol: SevGU, 2021. – P. 30 – 36.
8. Borovikov A.S., Gorbunov V.I., Gurvich A.K. Reference book: Devices for non-destructive testing of materials and products. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 392 p.
9. 11. Geller Yu.A., Rakhshadt A.G. Materials Science. – M.: Metallurgy, 1975. – 448 p.
10. 12. Vashul H. Practical metallography. – M.: Metallurgy, 1988 – 320 p.
11. Medvedev V.S., Potemkin V.G. Neural networks. MATLAB 6 / under the general. ed. V.G. Potemkin. – M.: DIALOG – MIPhI, 2001. – 630 p.
12. Dyakonov V.P. MATLAB. Complete tutorial. – M.: DMK Press, 2012. – 768 p.
13. Somov S.N., Baranov G.V., Polyashov M.A., Pyrkin A.A. Robotic defectoscope for diagnostics of welded joints state. Izvestiya Universities. Instrument structure. – 2019. – T. 62. – № 9. – P. 798 – 802.

УДК 621.039.56

Электромагнитный маневр при движении космического аппарата вблизи монополей естественных реакторов

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 24.06.2022 г.; после доработки 27.06.2022 г.

Аннотация

Разработан принцип построения траектории полета КА на основе электромагнитного маневра, дающий новые возможности освоение дальнего космоса. Определена необходимость развития теории пространственно-временных монополей естественных реакторов и создания бортовых реакторных установок с функцией излучателя.

Ключевые слова: ядерный реактор, пространственно-временной монополь, электромагнитный маневр, траектория полета, космический аппарат.

Electromagnetic maneuver during spacecraft movement near monopolies of natural reactors

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 24.06.2022 y.; received in final form 27.06.2022 y.

Abstract

The principle of constructing a spacecraft flight path based on an electromagnetic maneuver has been developed, which gives new opportunities for deep space exploration. The necessity of developing the theory of space-time monopolies of natural reactors and the creation of on-board reactor installations with the function of an emitter is determined..

Keywords: nuclear reactor, space-time monopole, electromagnetic maneuver, flight path, spacecraft.

Введение

Пространство и время являются формами существования материи, следовательно, они обладают энергией и преобразуют ее. Управление энергией пространства-времени – это задачи будущего. Однако уже сейчас имеется достаточно фактов, позволяющих начать разработку теории управления этой энергией. В работе рассматривается одно из направлений управления и применения энергии пространства-времени, а именно, возможность создания пространственно-временных монополей ядерных реакторов и использование существующих монополей естественных реакторов в практических целях.

Использование искривления пространства

космических объектов является одним из основных факторов, определяющих возможность осуществления полетов в дальнем космосе, аналогично применению гравитации при движении космических аппаратов внутри солнечной системы. Исследование пространственно-временных эффектов ядерного реактора вблизи мгновенной критичности позволяет разработать имитационные модели движения космических аппаратов в искривленном пространстве [1-5].

В настоящее время все полеты КА (космических аппаратов) в Солнечной системе осуществляются с применением пертурбационного маневра. Пертурбационный маневр – это специальный маневр, используемый для разгона или

изменения траектории полета космического аппарата. Для проведения пертурбационного маневра используется сочетание одновременного воздействия гравитационных полей небесных тел на космический аппарат и импульс ракетного двигателя самого космического аппарата. Такой маневр впервые предложил осуществлять при космических полетах Ю. В. Кондратюк в работах «Тем, кто будет читать, чтобы строить» (1919г.), «Завоевание межпланетных пространств» (1929г.).

Предлагается детализация использования электромагнитного маневра, понятие которого было введено в [6, 7].

Электромагнитный маневр – это маневр, использующий эффект искривления пространства в результате взаимодействия электромагнитных полей космических объектов с электромагнитным полем КА. Одновременное использование кривизны пространства и гравитационных полей превзойдет в разы эффекты применения этих маневров независимо.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка принципа построения траектории полетов КА при освоении дальнего космоса, используя возможности электромагнитного маневра.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) описать взаимодействия монополей естественных реакторов, таких как центры галактик, звездных систем, планетных систем и т.п. с монополем КА, создаваемым бортовой ядерной установкой;
- 2) разработать принцип построения траектории полета на основе электромагнитного маневра;
- 3) определить возможности применения принципа электромагнитного маневра.

Понятие пространственно-временного монополя

Кривизна пространства ядерного реактора в состоянии реактора близком к мгновенной критичности, а для естественных реакторов – к взрыву, порождается в результате воздействия на реактор внешнего высокочастотного электромагнитного излучения при наличии объекта, способного отражать жесткое излучение реактора. В такой ситуации возникает пространственно-временной монополю, удерживающий на некоторое время неизменной деформацию

пространства.

Пространственно-временной монополю – это устойчивое макроскопическое образование, объединяющее различной кривизны с различным течением времени пространства, определенные электромагнитными и гравитационными эффектами. Такое образование имеет возможность квантового изменения границ и кривизны пространств за счет вызванного внешними факторами кантования энергии ядра монополя.

Монополю является специфической структурой искривленного пространства. Он включает область пространственного расширения, область задержки, область сжатия, а также небольшую область в непосредственной близости к ядерному реактору, названную областью коллапса. Последовательность этих зон зависит от того, выступает ли реактор, как ядро монополя, в виде «скрытой» или «голой» сингулярности.

Земля и Солнце могут быть рассмотрены как «голая» сингулярность, а ядерный реактор в схеме использования естественных ядерного (Земли) и термоядерного (Солнца) реакторов как скрытая сингулярность.

Под сингулярностью будем понимать центральное компактное и сравнительно горячее ядро физического объекта. Все, что попадает в сингулярность, разрушается. В черной дыре сингулярность «одетая» – она окружена виртуальной граничной поверхностью, называемой горизонтом событий, которая скрывает ее от внешнего наблюдателя. Все, что проникает под эту поверхность, никогда не может вернуться назад. Обнаженная сингулярность не окружена такой граничной поверхностью. Она видима внешнему наблюдателю, и объекты, движущиеся по направлению к ней, могут, в принципе, развернуться вплоть до достижения самой сингулярности.

Пространственно-временной монополю «скрытой» сингулярности имеет дискообразную форму с системой реакторов (реактором) в центре. Существует некоторая аналогия между пространственно-временным монополем реактора и сверхтяжелым монополем (GUT-монополем). Монополю реактора как монополю «скрытой» сингулярности включает четыре зоны: центральная область – зона коллапса; зона сжатия с замедлением времени в соответствии с ОТО; зона задержки времени, которая позволяет вернуться во времени назад; зона расширения с ускорением течения времени в соответствии с ОТО. Пространственно-временной монополю «голой» сингулярности является зеркальным отражением кванто-

вой модели пространства «скрытой» сингулярности (черной дыры). В нем центральная область соответствует зоне коллапса; первому уровню – пространственное расширение; второму, как и для случая черной дыры, – задержка во времени, но с противоположным знаком по сравнению с временной задержкой скрытой сингулярности, третьему – пространственное сжатие. Как для скрытой, так и для голой сингулярности на внешней границе зоны сжатия находится излучатель электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне.

Построение траектории полета космического аппарата на основе электромагнитного маневра

Образование и существование монополя реактора возможно благодаря мощному электромагнитному излучению, возникшему в момент приближения реактора к взрыву [8]. В результате преобразования энергии взрыва происходит искривление пространства и создание стоячих электромагнитных волн, которые обуславливают доскообразную форму монополя. Гипотеза возникновения монополя реактора подробно рассмотрена в [9].

При рассмотрении принципа построения траектории межгалактических полетов будем исходить из предположения, что КА имеет электромагнитное поле, для создания которого используется бортовая ядерная установка, т.е. реактор работает в режиме излучателя. Карта космического пространства с указанием местоположений монополей галактик, звездных скоплений также имеется.

Представляется, что при приближении КА к границе монополя космического объекта в случае наличия у аппарата достаточно мощного электромагнитного поля происходит отталкивание КА под воздействием прямых электромагнитных волн, исходящих от центра монополя. Если от КА отделяется объект (например, зонд), и он не имеет электромагнитного поля или оно практически отсутствует ($E \approx 0$), то объект-зонд захватывается монополем под действием обратных электромагнитных волн, направленных от границы монополя к его центру. Необходимо подчеркнуть, здесь говорится не о гравитационном воздействии, а именно об электромагнитном. Аналогичные воздействия имеют место не только для монополей космических объектов, но и для ядерных реакторов, находящихся в земных условиях, при наличии перетекания энергии в

системе двух реакторов или от реактора на объект [9].

Для вывода зависимости изменения скорости КА от электромагнитного поля монополя космического объекта примем следующие допущения: 1) КА и монополь являются заряженными частицами, пульсирующими с постоянными скоростями $V_{КА}$ и V_M соответственно; 2) системы координат выбраны так, что ось y совпадает с вектором магнитной индукции, а ось z – с вектором напряженности электрического поля монополя космического объекта; 3) собственная скорость V_H КА не влияет на скорость пульсации.

Оптимальным случаем передачи энергии от монополя к КА, а именно увеличение скорости КА, является приближение КА под углом 45° к направлению движения прямой электромагнитной волне. Векторная диаграмма для случая отталкивания КА приведена на рис. 1(а) и захвата объекта-зонда на рис. 1(б), изменение траектории КА (линия 1) и объекта-зонда (линия 2) на рис. 1(в).

Величина скорости пульсации (движения) определяется из следующего соотношения, как для монополя, так и для КА

$$qE = qVB, \text{ т.е.}$$

$$V_M = \frac{E_M}{B_M}, \quad V_{КА} = \frac{E_{КА}}{B_{КА}}.$$

Необходимым условием перетекания энергии от монополя к КА является равенство скоростей

$$V_M = V_{КА}.$$

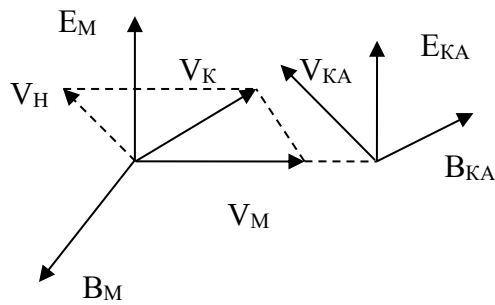
Это означает, что частоты функционирования ядра монополя космического объекта и реактора КА как излучателей должны совпадать.

Под влиянием монополя космического объекта для КА изменяется индукция магнитного поля $B_{КА}$ и напряженность электрического поля $E_{КА}$, что приводит к изменению скорости КА

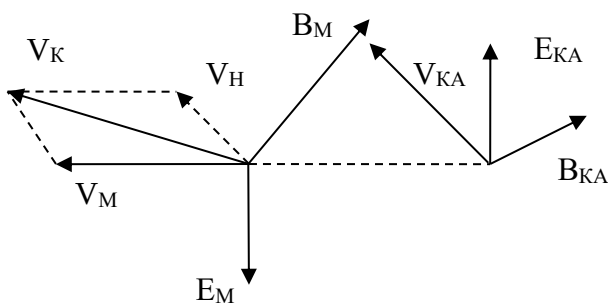
$$V_{\hat{E}\hat{A}\Sigma} = \frac{\vec{E}_M + \vec{E}_{КА}}{\vec{B}_M + \vec{B}_{КА}}.$$

Полагая, что величины поля монополя значительно превышают величины аналогичных параметры КА, т.е. $B_M \gg B_{КА}$, $E_M \gg E_{КА}$, получим следующее изменение скорости КА

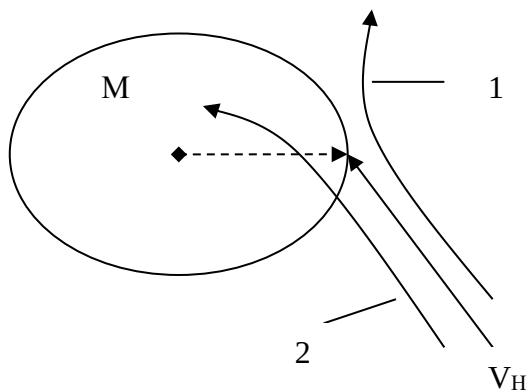
$$V_{\hat{E}\hat{A}\Sigma} = \frac{E_M}{B_M}.$$



а)



б)



в)

Рис. 1. Взаимодействие электромагнитного поля КА с монополем космического объекта.

Пример траектории движения КА для оптимального использования возможностей электромагнитного маневра представлен на рис.2.

При наличии n монополей в схеме рис.2 и собственной скорости V_H КА процесс расчета является итерационным

$$V_K^{(0)} = V_H,$$

$$\vec{V}_K^{(i)} = \vec{V}_K^{(i-1)} + \vec{V}_{KA\Sigma}^{(i)}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Предполагается, что частота излучения бортовой реакторной установки является управляемой и может быть изменена в полете.

Таким образом, в идеале скорость КА может приблизиться к световой скорости, и для КА будут выполняться положения теории относительности, т.е. реализуется возможность мгновенного перемещения во времени и пространстве.

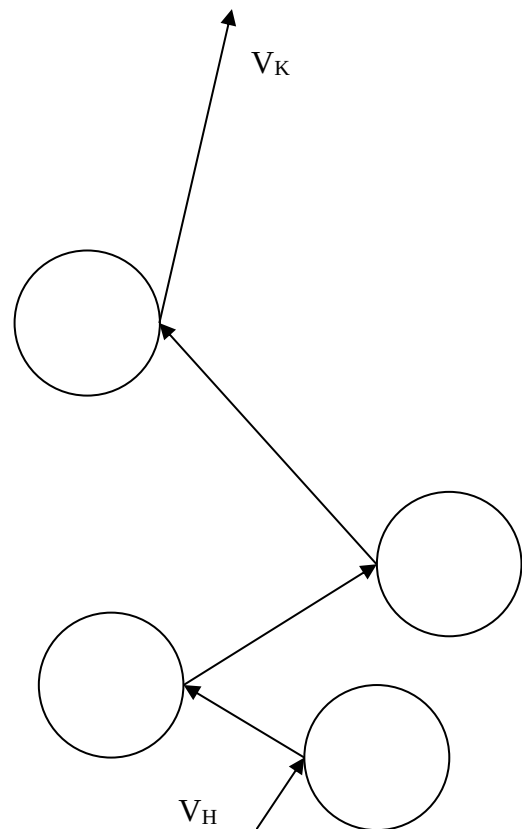


Рис.2. Пример движения КА при электромагнитном маневре.

Заключение

Описано использование искривления пространства космических объектов как одного из основных факторов, определяющих возможность осуществления полетов в дальнем космосе, аналогично применению гравитации при движении космических аппаратов внутри солнечной системы. Определен принцип построения траектории полета КА на основе электромагнитного маневра, дающий новые возможности освоение дальнего космоса.

Определена необходимость развития теории

пространственно-временных монополей естественных реакторов и создания бортовых реакторных установок с функцией излучателя.

Данные разработки применимы при построении космологических моделей и моделей движения космических аппаратов.

Список литературы

1. Раушенбах Б.В. Управление движением космических аппаратов. – М.: Знание, 1986. – 64с.
2. Качур С.А. Модель движения центра масс космического аппарата при выходе за пределы солнечной системы на основе принципов теории относительности и теории электромагнитного поля// АСУ и приборы автоматики. – 2007. – №141 – С.109-113.
3. Качур С.А. Модель движения центра масс космического аппарата и принципы теории относительности// Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – №4 – С.53-57.
4. Качур С.А. Модель движения космического аппарата при межгалактических полетах и теория космического реактора// Радиоэлектроника и информатика. – №2, 2012. – С.43-49.
5. Качур С.А. Гравитационное взаимодействие пространственно-временных монополей естественных реакторов // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т.3. – №3. – С.5-11.
6. Качур С.А. Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №2. – С. 5-10.
7. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства // Радиоэлектроника и информатика. – 2013. – №2(21). – С.22-26.
8. Качур С.А. Волновая модель распределения тепловыделения в естественных термоядерных реакторах // Энергетические установки и технологии. – 2016. – Т.2. – №3. – С.17-25
9. Качур С.А. Теория пространственно-временных монополей реакторов – Севастополь: РИБЕСТ, 2019. – 364с.

References

1. Raushenbah B.V. *Upravlenie dvizheniem kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft motion control]. Moscow, Znanie, 1986. 64p.
2. Kachur S.A. A model of the motion of the spacecraft's center of mass when leaving the solar system based on the principles of relativity theory and electromagnetic field theory. *ASU i pribory avtomatiki*, 2007, No. 141, pp.109-113.
3. Kachur S.A. The model of the motion of the center of mass of the spacecraft and the principles of the theory of relativity. *Radioelectronika i informatika*,

- 2007, No. 4, pp. 53-57.
4. Kachur S.A. Movement model of space vehicle at intergalactic flights and space theory reactor. *Radioelectronika i informatika*, 2012, No. 2, pp. 43-49.
5. Kachur S.A. Gravitational interaction of space-time monopoles of natural reactors. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2017, Vol. 3, No3, pp. 5-11.
6. Kachur S.A. Movement of nonrelativistic object in the distorted space of nuclear reactor. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 2, pp. 5-10.
7. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. *Radioelectronika i informatika*, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
8. Kachur S.A. Wave model of heat release distribution in natural thermonuclear reactors. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 3, pp. 17-25.
9. Kachur S.A. *Teoriya prostranstvenno-vremennykh monopolej reaktorov* [Theory of space-time monopoles of reactors]. Sevastopol, RIBEST, 2019, 364p.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Оптимизация критериев работы солнечно-биоэнергетических установокЖиганов И.Г.¹, Кувшинов В.В.², Чепенюк А.А.³, Бордан Д.Ф.⁴, Тиман Д.И.⁵*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская 33, 299053, Севастополь, Россия, ¹zhiganov80@gmail.com, ²VVKuvshinov@sevsu.ru,
³eingog@gmail.com, ⁴bordan79@mail.ru, ⁵megadaniil2018@mail.ru*

Статья поступила 16.06.2022 г.; после доработки 17.06.2022 г.

Аннотация

Для увеличения эффективности работы биоэнергетических установок анаэробной ферментации и в целях сокращения затрат на тепловую энергию предложено использовать солнечные гелиоколлекторы. Эти установки представляют собой комбинированную систему производства биогаза и тепловой энергии за счет прямого преобразования потока солнечной радиации.

Ключевые слова: гелиоколлектор, биогаз, биоэнергетическая система, технологический режим, теория графов.

Optimization of the operation criteria of solar-bioenergy installationsZhiganov I.G.¹, Kuvshinov V.V.², Chepenyuk A.A.³, Bordan D.F.⁴, Timan D.I.⁵*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University",
st. Universitetskaya 33, 299053, Sevastopol, Russia, ¹zhiganov80@gmail.com, ²VVKuvshinov@sevsu.ru,
³eingog@gmail.com, ⁴bordan79@mail.ru, ⁵megadaniil2018@mail.ru*

Received 16.06.2022 y.; received in final form 17.06.2022 y.

Abstract

To increase the efficiency of anaerobic fermentation bioenergy plants and to reduce the cost of thermal energy, it is proposed to use solar solar collectors. These plants are a combined system for the production of biogas and thermal energy by direct conversion of the solar radiation flux.

Keywords: solar collector, biogas, bioenergy system, technological regime, graph theory.

Введение

Для производства биогаза используются различные типы установок, такие как газогенераторный, внутри цикловой газификации биомассы, различные газификаторы, а также установки анаэробной ферментации. Последний тип установок использует невысокие температуры порядка 50-55°C, основным элементом установки для получения биогаза является биореактор (метантенк). Для поддержания постоянных

условий внутри метантенков необходимо использовать в качестве элементов нагрева тепловые электрические ТЭНы. В целях экономии дорогостоящей электрической энергии (используемой для получения тепловой энергии) при использовании невысоких температур в биореакторе можно устанавливать в качестве элемента нагрева солнечные тепловые коллекторы [1]. При работе таких гелиосистем, для получения высокой эффективности, теплоноситель можно нагревать до температур

около 60-70 °С, что хорошо подходит для получения биогаза путем анаэробной ферментации [2].

Для Крымского региона использование отходов биомассы является одной из приоритетных задач, т.к. их утилизация представляет для региона сложную задачу. Кроме биогазовых установок в крымском регионе большим потенциалом обладает солнечная энергетика [3]. Теоретическая мощность теплового излучения составляет > 1000 Вт/м². Перспективным направлением в проектировании нетрадиционных источников энергии является разработка комбинированных систем. Такие системы позволяют усилить положительные стороны друг друга и с нивелировать недостатки. В данной статье мы рассмотрим комбинированную систему выработки биогаза с солнечными коллекторами.

Постановка задачи исследования

Задача анализа комбинированных систем выработки биогаза с солнечными коллекторами состоит в изучении свойств и эффективности системы в зависимости от структуры технологических связей между отдельными ее объектами, а также от конструкционных и технологических параметров системы и параметров технологических режимов установок.

К конструкционным параметрам относятся: объем биогазовой установки, доза загрузки биомассы, количество загрузок, метод перемешивания и термостатирования и геометрические размеры участвующих в этом аппаратах.

Технологическими параметрами аппаратов являются коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи от биомассы к стенке реактора и от теплообменника к биомассе, скорость вращения мешалки, интенсивность перемешивания.

Параметры технологических режимов биогазовых установок – это рабочая температура брожения биомассы, давление в реакторе, длительность брожения, объемный суточный расход биомассы.

Основная задача анализа биореакторов заключается в том, чтобы математически связать характеристику состояния системы (значения выхода метана) с параметрами и характеристиками состояния биореактора в зависимости от структуры технологических связей между ними

в биоэнергетической системе.

Математическая постановка задачи анализа биоэнергетических систем формируется в определении следующих критериев:

$$\bar{V}_{\text{вых}} = f(\bar{T} \cdot \bar{P} \cdot \bar{pH} \cdot \bar{K} \cdot \bar{D} \cdot \bar{G}),$$

$$\Psi = \psi(\bar{T} \cdot \bar{P} \cdot \bar{pH} \cdot \bar{K} \cdot \bar{D} \cdot \bar{G}),$$

где $\bar{T}$ - вектор температур выбранных режимов сбраживания; $\bar{P}$ - вектор давления в реакторе; $\bar{pH}$ - вектор кислотности биомассы; Ψ - критерий эффективности биоэнергетических систем; $\bar{V}_{\text{вых}}$ - вектор выхода метана; $\bar{K}$ - вектор заданных температур входных потоков; $\bar{D}$ - вектор заданных или рассчитываемых технологических параметров; $\bar{G}$ - заданная структура технологических связей (технологическая топология) биоэнергетических систем.

С математической точки зрения задача анализа биоэнергетических систем сводится к решению многомерных нелинейных систем уравнений с использованием различных численных методов, в частности методов нелинейного программирования [4].

На сегодняшний день очень важной задачей при проектировании биогазовых установок стоит создание более совершенного типа технологии.

В большинстве случаев биогазовые установки становились нерентабельными из-за больших эксплуатационных затрат, связанных с подогревом и измельчением биомассы.

Задачей оптимизации является поиск экстремума выбранного критерия эффективности или оптимизации. Критерий оптимизации может быть:

- технологическим,
- термодинамическим,
- экономическим.

Если произвести анализ важности критериев, то, несомненно, на первом месте окажется экономический, т. к. оптимизируя технологию или энергетический баланс системы, мы в конечном итоге стремимся уменьшить эксплуатационные затраты [5].

Существует два вида экономического критерия: приведенные затраты на строительство и функционирование биогазовой установки, а также приведенный доход и прибыль.

Приведенные затраты могут быть определены по следующей формуле:

$$\Pi = E \cdot C + \sum c_i \cdot Q_i \cdot \Theta_i,$$

где E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; C – капитальные затраты, рубл.; c_i – стоимость энергетических потоков, участвующих в процессе анаэробного сбраживания, рубл/Вт (рубл/Дж); Q_i – расход энергоносителя, Вт·ч (Дж/час); Θ_i – продолжительность годовой эксплуатации биоэнергетической системы, час/год.

Еще одним показателем экономической эффективности является приведенный доход:

$$D_{np} = \sum_i C_i \cdot B_i - \Xi - E_n \cdot K_t,$$

где C_i – отпускная цена на выходной продукт биоэнергетической системы (биогаз, высококачественные удобрения); B_i – годовой объем выпуска и реализации i -го вида конечной продукции; Ξ – суммарные эксплуатационные затраты, рубл/год; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; K_t – производственные фонды, рубл.

В качестве термодинамического критерия оптимизации могут применяться приведенные затраты через затраченную на процесс энергию:

$$\Pi_w = E_n \cdot \kappa_w \cdot W + \frac{W \cdot c_q \cdot \Theta}{\eta_t}$$

где W – количество энергии затраченное в процессе, кВт·ч; κ_w – удельные капитальные вложения, отнесенные к затраченной энергии, рубл./(кВт·ч); E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; c_q – стоимость единицы теплоты, рубл./(кВт·ч); Θ – количество часов работы биоэнергетической системы, час/год; η_t – термодинамический КПД процесса.

Термодинамический КПД биоэнергетических систем показывает долю биогаза, которая остается после покрытия с его помощью энергетических потребностей

$$\eta_t = 1 - \frac{(Q_{ж} + Q_n - \Delta Q^{экз}) \cdot 86400}{Q_n \cdot V_{бз} \cdot \eta_k}$$

где $Q_{ж}$ – энергия, расходуемая на подогрев биомассы, кВт; Q_n – потери теплоты в окружающую среду через ограждения, кВт; $\Delta Q^{экз}$ – энергия экзотермической реакции ферментации, кВт;

Q_n – низшая теплота сгорания биогаза, кДж/м³; $V_{бз}$ – объемный выход биогаза, м³/сут.; η_k – коэффициент, характеризующий потерю теплоты в котлах или при производстве электроэнергии, если не известен способ сжигания, то k принимается 0,9.

Для математического описания биоэнергетических систем может потребоваться знание огромного количества производственных или экспериментальных данных [5-7]. Такое условие может значительно затруднить поиск технологических критериев оптимизации. В таких случаях многие исследования ведутся с помощью теории графов.

Результаты исследования

Рассмотрим схему комбинированного энергокомплекса (рис.1) с применением биогазовых технологий и солнечного коллектора.

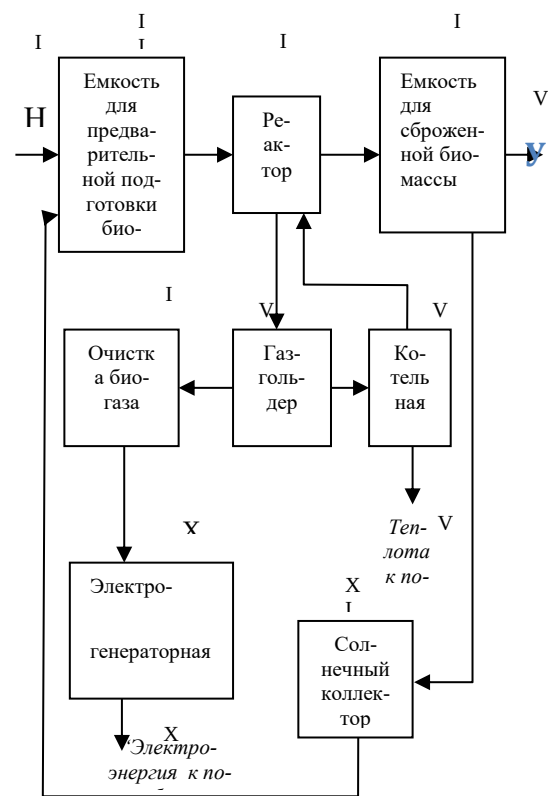


Рис. 1. Схема биоэнергетического комплекса с получением тепловой и электрической энергии для сельскохозяйственных предприятий.

Для проведения анализа оптимизации структуры технологических и энергетических потоков были построены, соответственно, топологический параметрический потоковый граф (рис. 2) и эксергетический потоковый граф (рис.

3) с матрицами инициаций [8].

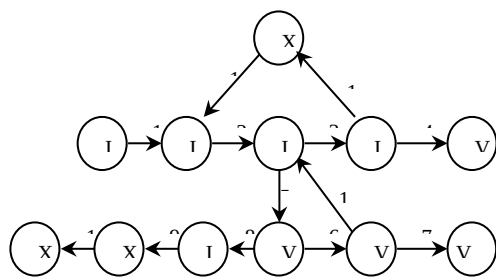


Рис. 2. Топологический параметрический потоковый граф и матрица инцидентий биоэнергетического комплекса, представленного на рис. 1

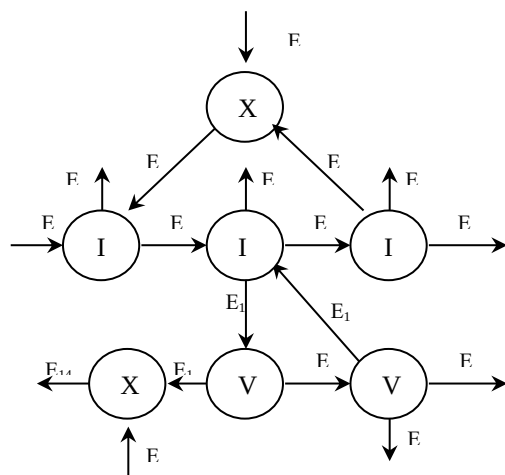


Рис. 3. Эксергетический потоковый граф и соответствующая матрица инцидентий биоэнергетического комплекса, представленного на рис. 1.

Выводы

Построенные таким образом потоковые графы и матрицы инициаций являются основой для нахождения оптимальных значений параметров, в зависимости от выбранного критерия оптимизации. Нахождение оптимальных значений происходит путем сканирования матрицы инициаций графа и определения булевой переменной на своем пути с помощью ЭВМ в каждой узловой точке.

Список литературы

1. Патент на полезную модель №179500. Солнечный трубчатый вакуумный коллектор / Муровский С.П., Куплений В.О., Муровская А.С.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»// - 2018, F24J 2/24
2. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / [Н. В. Багров, А. И. Бокров, Э. А. Бекиров и др.]. – Симферополь: Крымский научный

3. центр, 2009. – 293 с.
3. Муровский С.П. Разработка программы расчета системы горячего водоснабжения и поддержки отопления с применением плоских солнечных коллекторов // С. Муровский, К. Иванова, С. Иванов / Motrol, Motorization and power industry in agriculture.- Lublin, Volume 11B, 2009.
4. Панцхава А.С. Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз. Теория и практика. Монография. – М.: Издательство «Русайнс», 2015. – 972 с.
5. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. - М.: Колос. - 1982. -148с.
6. Семенов И.В. Проектирование биогазовых установок. – К.: Техника, 1992. – 346 с.
7. Кувшинов В.В. Использование солнечных установок для обеспечения энергетической безопасности региона // Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Ю.А. Омелчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. / Севастополь, 11-15 сентября, 2017. С. 715-718.С.
8. Кафаров В. В., Мешалкин В. П., Гурьева Л. В. Оптимизация теплообменных процессов и систем – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

References

1. Patent for utility model No. 179500. Solar tubular vacuum collector / Murovsky S.P., Purchased V.O., Murovskaya A.S.; applicant and patent holder FGAOU HE "KFU named after V.I. IN AND. Vernadsky")// - 2018, F24J 2/24
2. Solar energy for the sustainable development of the Crimea / [N. V. Bagrov, A. I. Bokov, E. A. Bekirov and others]. - Simferopol: Crimean Scientific Center, 2009. - 293 p.
3. Murovsky S.P. Development of a program for calculating a hot water supply system and heating support using flat solar collectors // S. Murovsky, K. Ivanova, S. Ivanov / Motrol, Motorization and power industry in agriculture.- Lublin, Volume 11B, 2009.
4. Pankshava A.S. Bioenergetics. World and Russia. Biogas. Theory and practice. Monograph. - M. : Publishing house "Rusigns", 2015. - 972 p.
5. Baader B., Done E., Brenderfer M. Biogas: Theory and practice. - M.: Kolos. - 1982. -148s.
6. Semenenko I.V. Design of biogas plants. - K. : Technique, 1992. - 346 p.
7. Kuvshinov V.V. The use of solar installations to ensure the energy security of the region // Collection of articles based on the materials of the scientific and practical conference with international participation. Edited by Yu.A. Omelchuk, N.V. Lyamina, G.V. Kucherik. / Sevastopol, September 11-15, 2017. pp. 715-718.p.
8. Kafarov V. V., Meshalkin V. P., Guryeva L. V. Optimization of heat exchange processes and systems - M.: Energoatomizdat, 1988. - 192 p.

УДК 620.92

Анализ критериев оптимизации тепловой устойчивости при разработке биогазовых реакторов

Жиганов И.Г.¹, Кувшинов В.В.², Власов Н.А.³, Жильцов А.С.⁴,
Касницкий А.Д.⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская 33, 299053, Севастополь, Россия, ¹zhiganov80@gmail.com, ²VVKuvshinov@sevsu.ru,
³Mr.asphodel@mail.ru, ⁴29novel@gmail.com, ⁵makkas_snab@mail.ru

Статья поступила 29.08.2022 г.; после доработки 31.08.2022 г.

Аннотация

Описываются методы создания оптимальной технологии анаэробного брожения. Производится анализ критериев, влияющих на эффективность выработки биогаза.

Ключевые слова: biogas system, biogas, thermal stability criterion, heat transfer coefficient, technological regime.

Analysis of Criteria for Optimizing Thermal Stability in the Development of Biogas Reactors

Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Vlasov N.A., Zhiltsov A.S., Kasnitsky A.D.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University",
st. Universitetskaya 33, 299053, Sevastopol, Russia, ¹VVKuvshinov@sevsu.ru, ²eingog@gmail.com,
³ivantyeyev@gmail.com, ⁴SAABeidulin@sevsu.ru

Received 29.08.2022 y.; received in final form 31.08.2022 y.

Abstract

Methods for creating an optimal technology for anaerobic fermentation are described. The analysis of the criteria influencing the efficiency of biogas production is carried out.

Keywords: Vertical axis wind power plant, photovoltaic panels, wind-solar system, solar plant, battery system, tracker system.

Введение

На сегодняшний день во всем мире существует тенденция к замене органического топлива на более экологически чистые виды топлива из возобновляемых источников энергии. В качестве возобновляемых источников энергии используют энергию солнца, моря, Земли.

В сельском хозяйстве на сегодня более актуален энергетический кризис, т. к. эти районы наиболее удалены от ТЭЦ, и постройка котельных и подвод газопроводов может с экономической точки зрения быть не выгодным.

Наиболее перспективным видом топлива, в

связи со сложившейся ситуацией является биогаз. Биогаз – возобновляемый органический вид топлива, полученный путем анаэробного (без доступа воздуха) микробиологического сбраживания органических отходов деятельности.

Постановка задачи исследования

Анаэробное брожение – процесс известный очень давно, и применялся в основном в Индии и Китае, где климатические условия позволяют проводить процесс без дополнительного подогрева. Но на данном этапе развития биогазовых

технологий ученые стремятся организовать процесс оптимальным по температуре и по другим физическим параметрам.

Создание оптимальной технологии анаэробного брожения сводится к трем основным задачам:

- Обеспечение оптимальных технологических параметров (температура, давление, частота перемешивания, период перемешивания, доля загрузки)
- Подготовка оптимального исходного сырья (гомогенизация, влажность)
- Создание оптимального энергетического баланса.

Решая поставленные задачи при разработке биогазовых реакторов, необходимо пользоваться критериями оценки разработанной технологии. Наряду с уже известными критериями выхода биогаза

$$V = f(t, \tau, p, pH)$$

Необходимо пользоваться критерием тепловой устойчивости, выведенному нами.

Результаты исследования

В любой энергетической системе должен соблюдаться баланс поступления энергии и ее рассеивания (тепловые потери).

Теплота, необходимая для поддержания постоянной температуры биомассы определяется формулой:

$$Q_{\text{бз}} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{бм}}^{\text{кон}} - T_{\text{бм}}^{\text{нач}}),$$

где

V – объем биореактора, м³;

ρ – плотность сбраживаемой биомассы, кг/м³;

$T_{\text{бм}}^{\text{кон}}$, $T_{\text{бм}}^{\text{нач}}$ – температура сбраживаемой биомассы, соответственно брожения и начальная температура исходного сырья, оС;

c – массовая теплоемкость сбраживаемого субстрата, кДж/кг оС.

Теплота, теряемая биореактором в результате конвективных потерь, определяется формулой:

$$Q_{\text{пот}} = F \cdot K \cdot (T_{\text{бм}}^{\text{кон}} - T_{\text{нв}}),$$

где

F – площадь поверхности конструкции реактора, м²;

K – коэффициент теплопередачи от биомассы к наружному воздуху, Вт/(м²оС);

$T_{\text{нв}}$ – наружная температура воздуха, оС.

Для получения критерия определяющего долю теплоты необходимой для нагрева биомассы на 1 оС от теплоты, теряемой реактором при разнице температур между реактором и окружающей средой в 1 оС разделим $Q_{\text{бз}}/Q_{\text{пот}}$:

$$\frac{Q_{\text{бз}}}{Q_{\text{пот}}} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{\text{бм}}^{\text{кон}} - T_{\text{бм}}^{\text{нач}})}{F \cdot K \cdot (T_{\text{бм}}^{\text{кон}} - T_{\text{нв}})}$$

Объединим одинаковые параметры в отдельные комплексы. Один будет объединять конструкционные параметры $\beta_{\text{конст}}$, и теплофизические свойства системы $\mu_{\text{физ}}$

$$\beta_{\text{конст}} = \frac{V}{F}, \text{ м}^{-1}$$

$$\mu_{\text{физ}} = \frac{\rho \cdot c}{K} \text{ м} \cdot \text{с},$$

Влияние конструкционных особенностей

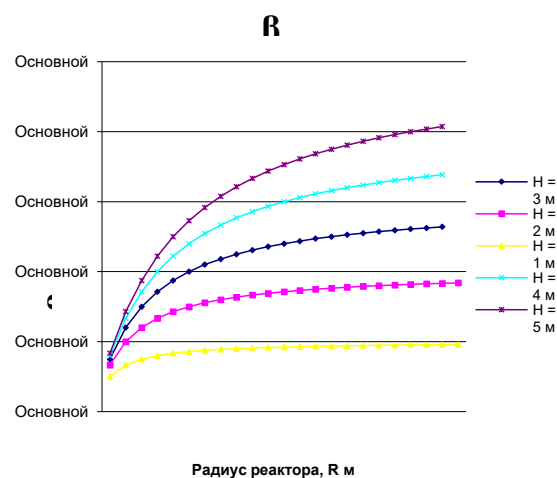


Рис.1. Диаграмма влияния конструкционных особенностей

Давайте теперь исследуем первый комплекс. Так как в качестве реакторов используются в основном цилиндрические емкости, то критерий $\beta_{\text{конст}}$ примет вид

$$\beta_{\text{конст}} = 0,5 \cdot \frac{H \cdot R}{H + R}, \text{ м}^{-1}$$

Проследив закономерность изменения конструкционного критерия от изменения длины H ,

м и радиуса R, м реактора в диапазоне $H = 1 - 5$ м, $R = 1-23$ м, и построив график влияния конструктивных особенностей (рис. 1), определили, что при радиусе реактора до 7 м максимальная скорость роста $\beta_{\text{конст}} = 0,2$ 1/м, а после не выше 0,05 1/м.

Второй критерий $\mu_{\text{физ}}$ состоит из физических констант ρ , и c , которые зависят от выбранной биомассы и переменного коэффициента теплопередачи K, который если пренебречь теплоотдачей тепла от биомассы к стенке и от стенки к окружающему воздуху, то данный критерий будет зависеть от материала выбранной изоляции и от ее толщины.

$$\mu_{\text{физ}} = (\lambda, \delta), \text{ м сут.}$$

Выведем формулу расчета и построим по ней график влияния типа изоляции и ее толщины на критерий $\mu_{\text{физ}}$.

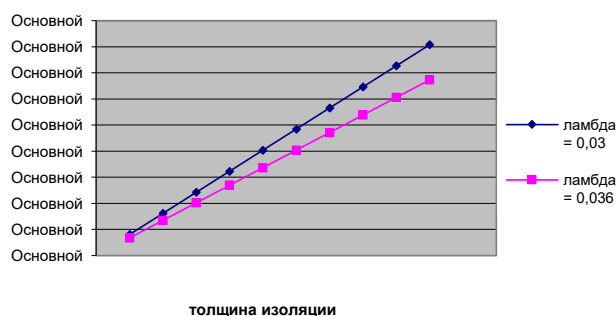


Рис. 2. Влияние типа изоляции и ее толщины на критерий $\mu_{\text{физ}}$

$$\mu_{\text{физ}} = \frac{c}{K \cdot 86400} \text{ м} \cdot \text{сут}, \text{ или}$$

$$\mu_{\text{физ}} = \frac{\delta}{\lambda \cdot 86400} \text{ м} \cdot \text{сут}$$

Так как биомасса имеет влажность 90 %, принимаем плотность и теплоемкость по воде, а в качестве примера изоляции принимаем пенополиуретан с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,036$ Вт/м°C и для примера взят другой изоляционный материал с $\lambda = 0,03$ Вт/м°C. Из графика видно, что тепловая эффективность быстрее растет при увеличении толщины, чем при замене на более дорогой слой изоляции с $\lambda = 0,03$ Вт/м°C. Основное преимущество этого графика заключается в возможности визуально подобрать толщину изолирующего материала в зависимости от требуемой инерционности системы.

Далее выведем общий критерий тепловой эффективности, который в дальнейшем будем называть коэффициентом тепловой инерционности системы φ . Он должен характеризовать

возможность системы регулирования реагировать на изменение температуры. Этот критерий складывается из произведения критерия учитывающего конструктивные особенности реактора и коэффициента, учитывающего теплофизические свойства среды и изоляции системы.

$$\varphi = \beta_{\text{конст}} \cdot \mu_{\text{физ}}$$

Еще один физический смысл коэффициента тепловой инерционности системы виден если его подставить в уравнение:

$$T_{\text{бм}}^{\text{кон}} - T_{\text{нв}} = \varphi \cdot (T_{\text{бм}}^{\text{кон}} - T_{\text{бм}}^{\text{нач}}).$$

Из этого уравнения следует, что данный критерий является ничем иным, как скоростью изменения температуры биомассы, в зависимости от изменения температуры окружающего воздуха. Другими словами показывает степень изменения температуры. Следует стремиться к увеличению критерия, но при этом не забывать о стоимостной характеристике системы.

Поэтому в дальнейшем надо изучить влияние повышения коэффициента тепловой инерционности на повышение капитальных вложений и период окупаемости проекта.

Выводы

С помощью выведенного критерия тепловой устойчивости возможна разработка биогазовых установок, имеющих более эффективные тепловые показатели и при этом имеющих оптимальный срок окупаемости и капитальные вложения.

Список литературы

1. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. - М.: Колос. - 1982. -148с.
2. Семененко И.В. Проектирование биогазовых установок. - К.: Техника, 1992. - 346 с.
3. Земсков В. И., Александров И. Ю. Проектирование технических систем производства биогаза в животноводстве: Учебное пособие. СПб: Издательство «Лань», 2017.-312с.
4. Зайченко В.М., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Жиганов И.Г Проблемы развития биоэнергетики в России. - Севастополь: Энергетические установки и технологии. 2020
5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи - М.: Энергия, 1977. - 344 с.

References

1. Baader B., Done E., Brenderfer M. Biogas: Theory and practice. - M.: Kolos. - 1982. -148s.
2. Semenenko I.V. Design of biogas plants. - K.: Technique, 1992. - 346 p.
3. Zemskov V. I., Aleksandrov I. Yu. St. Petersburg:

- Lan publishing house, 2017.-312p.
4. Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Zhiganov I.G. Problems of development of bioenergy in Russia. - Sevastopol: Energy installations and technologies. 2020
 5. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of heat transfer - M.: Energy, 1977. - 344 p.

УДК 620.92

Комбинированные установки для прямого преобразования потока солнечной радиации

Кувшинов В.В.¹, Чепенюк А.А.², Тиман Д.И.³, Березняк В.А.⁴, Артеменко И.Д.⁵
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская 33, 299053,
Севастополь, Россия,

¹VVKuvshinov@sevsu.ru, ²eingog@gmail.com, ³megadaniil2018@mail.ru, ⁴gern96-10@mail.ru, ⁵leftysingle@gmail.com

Статья поступила 02.09.2022 г.; после доработки 05.09.2022 г.

Аннотация

Рассмотрены вопросы прямого преобразования солнечной энергии путем комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Значительно повышен суммарный коэффициент преобразования.

Ключевые слова: солнечная станция, фотоэлектрический преобразователь, тепловой преобразователь, солнечная энергия, комбинированный коллектор, воздушно-жидкостный теплоноситель.

Combined installations for direct conversion of the solar radiation flux

Kuvshinov V.V.¹, Chepenyuk A.A.², Timan D.I.³, Berezhnyak V.A.⁴, Artemenko I.D.⁵
FGAOU VO "Sevastopol State University", st. Universitetskaya 33, 299053,
Sevastopol, Russia,

¹VVKuvshinov@sevsu.ru, ²eingog@gmail.com, ³megadaniil2018@mail.ru, ⁴gern96-10@mail.ru, ⁵leftysingle@gmail.com

Received 02.09.2022 y.; received in final form 05.09.2022 y.

Abstract

The issues of direct conversion of solar energy by combined generation of thermal and electrical energy are considered. Significantly increased the overall conversion factor.

Keywords: solar station, photovoltaic converter, thermal converter, solar energy, combined collector, air-liquid coolant.

Введение

В ближайшее годы системы, использующие лишь фотоэлектрическое, или только тепловое преобразование солнечной энергии достигнут своих предельных характеристик. Именно поэтому новые системы, использующие одновременно оба типа преобразования, как альтернатива традиционных установок, представляют все больший интерес для разработчиков новых технологий [1]. Переход на комбинированные системы означает переход на новую ступень развития технологии гелиотехники с более высокими характеристиками системы.

В ходе работы был проведен анализ фото-теплоэлектрических установок, разработанных в различных научных учреждениях. В институте возобновляемой энергетики (ныне ВИМСХ, г. Москва) был разработан комбинированный фототермический модуль [2], предназначенный для одновременного получения тепловой и электрической энергии за счет использования и превращения широкого диапазона электромагнитного излучения Солнца. В фототермическом модуле применено охлаждение рабочей поверхности за счет принудительного течения теплоносителя в гидравлических трактах. В научном центре при политехническом университете был разработан

экспериментальная модель модуля PVT [3], результаты испытаний показали, что с помощью модуля можно увеличить эффективность получения электрической энергии солнечными элементами более чем в 2 раза. На кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета в Институте ядерной энергии и промышленности было проведено исследование комбинированной солнечной установки с использованием в качестве приёмной поверхности комбинированного промышленного полноразмерного гелиопрофиля, состоящего из теплового абсорбера солнечного коллектора и кремниевых фотоэлектрических элементов [4] (см. фото на рис.1).



Рис.1. Комбинированная солнечная установка.

Несмотря на многообразие различных видов солнечных установок для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, всё таки большая часть современных разработок состоит из плоского гелиоколлектора на приёмной панели которого находятся солнечные элементы (см.рис 2). Такая конструкция позволяет комбинировать тепловые и фотоэлектрические установки и использовать для производства теплофотоэлектрических устройств серийные солнечные коллекторы и фотоэлектрические элементы уже выпускаемые промышленностью.

При проведении анализа комбинированных фототеплоэлектрических установок плоской конструкции, были выделены три основных конструкции. Это установки с воздушным, жидкостным и воздушно-жидкостным теплоносителем. Плоский водо-воздушный комбинированный теплоэлектрический гелиоколлектор имеет вид

изображенный на рис.2.

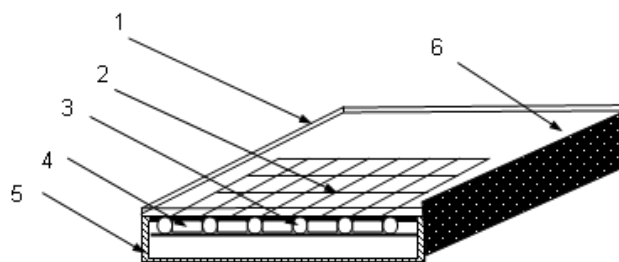


Рис.2. Устройство комбинированного коллектора с воздушно-жидкостным теплоносителем. 1 – верхнее остекление; 2 – панель с солнечными элементами; 3 – трубки для жидкого теплоносителя; 4 – каналы для воздуха; 5 – теплоизоляция; 6 – корпус;

Как видно из рисунка в этой установке теплопоглощающая пластина с фотоэлектрическими элементами размещена посередине металлического корпуса с тепловой изоляцией, сверху находится стекло, а снизу пластины находятся трубки для жидкого теплоносителя и каналы для воздуха, которые в зависимости от конструкции могут быть удалены или добавлены. Теплопоглощающая пластина с фотоэлементами является типичным абсорбером плоского солнечного коллектора. Циркулирующий теплоноситель охлаждает фотоэлементы, за счет чего растёт эффективность их работы и увеличивается суммарная выработка электроэнергии, в результате потребитель, кроме электроэнергии может ещё использовать для систем теплообеспечения горячую воду и нагретый воздух. Использование того или иного типа установок выбирается из задач, которые должна выполнять система солнечного обеспечения. Например, если потребитель рассчитывает получать электрическую энергию и обеспечивать только нагрев и вентиляцию помещений, то приемлем тип с воздушным теплоносителем, если необходимо получать только электроэнергию и горячую воду, то с жидкостным. При проектировании полной системы водоснабжения, отопления и вентиляции зданий можно использовать третий тип, изображенный на рис.1.

Для расчета энергетических характеристик системы используются уравнения, приведенные в работе [5], которые применимы для расчета почти всех существующих конструкций плоского коллектора:

$$Q_u = F_R A [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (1)$$

где: Q_u - полезная энергия, отводимая из коллектора в единицу времени, Вт; A - площадь

коллектора, м^2 ; F_R – коэффициент отвода теплоты из коллектора; I_T – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора (с учетом углового коэффициента R), $\text{Вт}/\text{м}^2$; τ – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению; α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению; U_L – полный коэффициент тепловых потерь коллектора, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ град})$; T_i – температура жидкости на входе в коллектор, $^\circ\text{C}$ (на номинальном режиме); T_a – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$. Упрощенный вариант этой формулы более применим для практических расчетов гелиосистем:

$$Q_u = AGC_p(T_{\text{вых}} - T_i) \quad (2)$$

где: A – полезная площадь коллектора (м^2); G – удельный массовый расход теплоносителя ($\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$); C_p – теплоемкость теплоносителя ($\text{Дж}/\text{кг К}$); $T_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе из коллектора; T_i – температура теплоносителя на входе;

Соответственно КПД солнечного коллектора определяется формулой:

$$\eta_{СК} = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{Q_u}{AI_o R} = \frac{q_u}{I_o R} \quad (3)$$

где q_u – удельная полезная мощность коллектора ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Фотоэлектрическая мощность системы определяется мощностью солнечных элементов, а тепловая мощность площадью и эффективностью абсорбера. Чтобы связать энергетические параметры фотоэлектрической и тепловой частей комбинированной установки воспользуемся формулами для расчета фотоэлектрических преобразователей. КПД солнечной батареи рассчитывается по известной формуле:

$$\eta_{СБ} = \frac{P_{\text{max}}}{SE_o} = \frac{I_{\text{max}} U_{\text{max}}}{SE_o} \quad (4)$$

где: S – полезная площадь солнечных элементов (м^2); E_o – освещенность рабочей поверхности солнечной батареи ($\text{Вт}/\text{м}^2$); P_{max} – мощность, вырабатываемая солнечной батареей (Вт); I_{max} – ток в рабочей точке (А); U_{max} – напряжение в рабочей точке (В). Для комбинированной установки величины A и S , а также I_T и E_o эквивалентны, т.е. можно записать:

$$\eta_{СК} = \frac{P_{СК}}{S_{СК} E_o}, \eta_{СБ} = \frac{P_{СБ}}{S_{СК} E_o} \quad (5)$$

где $P_{СК}$ и $P_{СБ}$, мощность отводимая от тепло-

вого коллектора и солнечной батареи, $S_{СК}$ – полезная площадь комбинированной солнечной установки, заполненная солнечными элементами, $\eta_{СК}$ – тепловой, а $\eta_{СБ}$ – электрический КПД комбинированной установки;

Авторами доклада были проведены сравнительные исследования комбинированной солнечной установки с использованием плоского концентратора (фото на рис.1). Исследования проводились на кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета в Институте ядерной энергии и промышленности. Для проведения экспериментов использовались две солнечные установки равных размеров, с одинаковыми тепловыми абсорберами, при этом на абсорбере одной установки находились солнечные элементы. Тип этой установки показан на рис.2.



Рис.3. Сравнительная тепловая выработка солнечных установок в $^\circ\text{C}$.

Фотоэлектрическая батарея установки состояла из трёх фотоэлектрических модулей с одинаковой мощностью. В результате проведения эксперимента были получены данные по работе комбинированного гелиопрофиля, представляющего собой сборную конструкцию, состоящую из отдельных элементов шириной 0,15 м и длиной до 7 м, готовых для сборки кровли зданий и сооружений. Каждый элемент гелиопрофиля имеет слабый теплообмен с соседней пластиной, что положительно влияет на охлаждение фотоэлементов. При этом для увеличения эффективности работы всего гелиопрофиля были применены плоские концентраторы.

Как видно из данных при одновременной выработке тепловой и электрической энергии,

температуры теплоносителя на выходе различались всего на 1-2 градуса, т.е. по выработке тепла установки почти не отличаются.

Существенное увеличение КПД всей системы связано с использованием комбинированной установкой значительной части солнечного спектра излучения.

Если тепловой коллектор использует в основном инфракрасную и длинноволновую видимую часть спектра, то кремниевые элементы используют ультрафиолетовую и коротковолновую видимую часть спектра.

Известно, что КПД полупроводниковых кремниевых элементов падает с увеличением их температуры.

В работе [6] приводятся уравнения, используемые для определения КПД фотоэлектрического элемента в зависимости от температуры. Зависимости изменения КПД фотоэлемента от температуры носят линейный характер:

$$\eta = \eta_0 (1 - \kappa (T - T_0)) \quad (6)$$

где T – температура солнечного элемента; κ – температурный градиент, зависящий от типа и конструкции фотопреобразователя, а η_0 – КПД ФЭП при стандартных условиях (освещенность 1000 В/м^2 , $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Обычно КПД (η_0) известная величина, для кремниевых элементов, исследуемой комбинированной солнечной установки он составляет 14-15 %.

Если солнечные элементы находятся в нижней части приемной поверхности (см. рис.1), то температура теплоносителя на входе в гелиоколлектор T_i (см. формулу 1), будет соответствовать температуре нагрева солнечных элементов T . Измеряя температуры на входе и выходе в гелиоколлектор, расход теплоносителя и значения тока и напряжения в рабочей точке, можно производить расчеты всей комбинированной установки.

Комбинированный солнечный коллектор имеет более высокую эффективность, а также при охлаждении солнечных элементов, согласно формуле (6) сохраняется их максимальный КПД. Для повышения интенсивности солнечного потока, в экспериментах использовался плоский концентратор с геометрическим коэффициентом концентрации 2.

На графиках (см. рис.4, 5) показаны экспериментальные данные по тепловой выработке и мощностным характеристикам комбинированного солнечного коллектора.

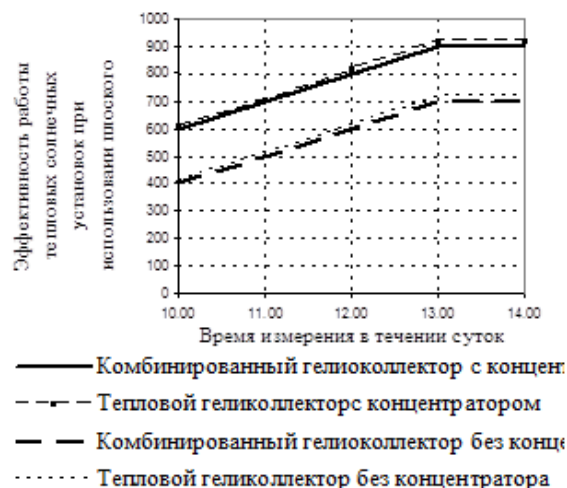


Рис.4. Сравнительная мощностная тепловая выработка солнечных установок.

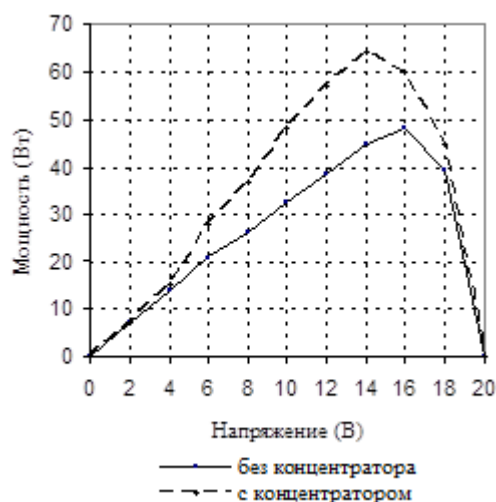


Рис.5. Мощностная характеристика отдельного фотоэлектрического блока комбинированного коллектора с использованием концентратора.

Выводы

В результате проведения эксперимента были получены данные по работе комбинированного гелио-профиля, представляющего собой сборную конструкцию, состоящую из отдельных элементов шириной 0,15 м и длиной до 7 м, готовых для сборки и монтажа кровли зданий и сооружений.

При использовании комбинированного абсорбера для выработки тепла и электроэнергии можно значительно увеличить общий КПД гелиоустановки, так при совместной работе фотоэлементов и теплового абсорбера, было получено увеличение общего КПД установки до 85 % при тепловом КПД 70 % и фотоэлектрическом 15 %.

Использование плоских концентраторов значительно экономит средства на выработку тепловой, и

в значительной мере электрической, энергии комбинированными солнечными установками. Охлаждение солнечных элементов циркулирующим теплоносителем на промышленных элементах гелио-профиля позволяет значительно увеличить выработку электроэнергии комбинированной установкой.

lar heat supply systems // Energoatom-izdat, Moscow, 1988.

6. Arbuzov Yu.D., Evdokimov V.M. Fundamentals of photo-electricity // Moscow 2007.

Список литературы

1. Кучинский В.П., Синицын Н.П., Суржик А.Н., Шевчук В.И. Методика определения тепловых характеристик фототермических модулей // Вісник енергетики, № 4, 2006, С. 44-47.
2. Кузнецов К.В., Тюхов И.И., Сергиевский Э.Д. Исследование характеристик солнечного воздушного гибридного коллектора // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве, Труды 6-й Международной научно-технической конференции, 13-14 мая 2008 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ – ч.4 – С. 227-231.
3. Рассмакин Б.П. и др. Отечественные солнечные коллекторы на основе алюминиевых тепловых труб // Материалы X международной конференции, АР Крым, п.г.т. Николаевка 14-18 сентября 2009 г., С. 175-178.
4. Кувшинов В.В., Сафонов В.А. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии // Сборник трудов СТУЭиП, № 31, 2009, С. 158-163.
5. Бекман У., Кейли С., Даффи Д. Расчет систем солнечного теплоснабжения // Энергоатомиздат, Москва, 1988 г.
6. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фото-электричества // Москва 2007.

References

1. Kuchinsky V.P., Sinitsyn N.P., Surzhik A.N., Shevchuk V.I. Method for determining the thermal characteristics of photothermal modules // Vidnovlyuvanna energetika, No. 4, 2006, pp. 44-47.
2. Kuznetsov K.V., Tyukhov I.I., Sergievsky E.D. Study of the characteristics of a solar air hybrid collector // Energy supply and energy saving in agriculture, Proceedings of the 6th International Scientific and Technical Conference, May 13-14, 2008, Moscow, State Scientific Institution VIESH - part 4 - p. 227- 231.
3. Rassamakin B.P. and others. Domestic solar collectors based on aluminum heat pipes // Proceedings of the X International Conference, Crimea, p.g.t. Nikolaevka September 14-18, 2009, pp. 175-178.
4. Kuvshinov V.V., Safonov V.A. Some results of the study of a combined installation for photothermal conversion of solar energy // Proceedings of SNUYaEiP, No. 31, 2009, pp. 158-163.
5. Beckman W., Caylee S., Duffy D. Calculation of so-

УДК 620.92

Некоторые результаты исследования энергетической ветро-солнечной установки на полигоне возобновляемых видов энергии в севастопольском государственном университете

Кувшинов В.В.¹, Чепенюк А.А.², Ивантеев И.С.³, Абейдулин С.А.⁴,
Коломийченко В.П.⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская 33, 299053, Севастополь, Россия, ¹VVKuvshinov@sevsu.ru, ²eingog@gmail.com,
³ivanteyev@gmail.com, ⁴SAAbaidulin@sevsu.ru, ⁵Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова, ул. Павла Дыбенко, 1А, 299028, г. Севастополь, Россия, ⁵mantulova@yandex.ru

Статья поступила 05.09.2022 г.; после доработки 06.09.2022 г.

Аннотация

Представлены результаты исследований, приведенных на полигоне Возобновляемой энергетики в Севастопольском государственном университете. Комбинированная генерация электрической энергии за счет преобразования ветрового потока и солнечной радиации позволяет максимально использовать потенциал возобновляемых источников энергии и существенно повышает эффективность работы электрической станции.

Ключевые слова: вертикально-осевая ветроэлектрическая установка, фотоэлектрические панели, ветро-солнечная система, солнечная установка, аккумуляторная система, трекерная система.

Some results of the study of the energy wind-solar installation at the polygon of renewable energy at Sevastopol state university

Kuvshinov V.V.¹, Chepenyuk A.A.², Ivanteev I.S.³, Abeidulin S.A.⁴,
Kolomiychenko V.P.⁵

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University",
st. Universitetskaya 33, 299053, Sevastopol, Russia, ¹VVKuvshinov@sevsu.ru, ²eingog@gmail.com,
³ivanteyev@gmail.com, ⁴SAAbaidulin@sevsu.ru, ⁵Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimova, st. Pavel Dybenko, 1A, 299028, Sevastopol, Russia, ⁵mantulova@yandex.ru

Received 05.09.2022 y.; received in final form 06.09.2022 y.

Abstract

The results of studies presented at the Renewable Energy test site at the Sevastopol State University are presented. Combined generation of electrical energy by converting wind flow and solar radiation makes it possible to maximize the potential of renewable energy sources and significantly increases the efficiency of the power plant.

Keywords: Vertical axis wind power plant, photovoltaic panels, wind-solar system, solar plant, battery system, tracker system.

Введение

Комбинированные ветро-солнечные системы позволяют значительно увеличить эффективность вырабатываемой электрической энер-

гии для индивидуальных и промышленных потребителей и в значительной степени дополняют друг друга, т. е. если нет ветра работает солнечная станция, в темное время суток происходит генерация за счёт ветрового потока, при этом чтобы не было простоя при отсутствии потоков

солнечной радиации и ветра потребителя обеспечивает аккумуляторная станция [1]. Для проведения экспериментов использовались вертикально-осевая ветроэлектрическая установка, мощностью 1,5 кВт, работающая в комбинации с фотоэлектрическими модулями с системой аккумулирования энергии. Для оценки влияния угла падения солнечных лучей на рабочую поверхность фотоэлектрических панелей были проведены исследования при помощи солнечной трекерной установки с системой слежения и ориентации на Солнце. Комбинированная выработка электрической энергии солнечно-ветровой установкой даёт возможность более эффективно использовать генерацию в различные месяцы года. Система ориентации на Солнце позволяет значительно поднять выработку электроэнергии фотоэлектрическими модулями [2-3].

Постановка задачи

Для обеспечения энергоснабжения индивидуальных потребителей в частных жилых домах в настоящее время приобрели большую популярность автономные ветровые и солнечные установки, снабженные системой аккумулирования энергии. Для изучения эффективности работы таких установок и бесперебойной работы оборудования необходимо дать оценку влияния мощностей ветрового потока и энергетической составляющей преобразования потока солнечной радиации на режимы работы и возможность выработки электрической энергии предложенными станциями. Для этого необходимо было провести экспериментальные исследования и оценить результаты исследований с целью определения более эффективных режимов генерации энергии, в том числе за счёт комбинированной работы ветровой, солнечной и аккумуляторной установок [4]. Территория полигона, расположенного в Севастопольском государственном университете, позволяет исследовать различные типы энергетических установок на основе возобновляемых источников энергии. Проведенные исследования ветро-солнечных установок показали, что за счет уникального места расположения площадки полигона на открытом месте на склоне берега Чёрного моря эффективность исследований значительно возрастает по сравнению с другими (технически возможными для исследований) площадками в районе Севастополя. Комбинированная выработка электрической энергии солнечной и ветровой установкой даёт возможность эффективно использовать генерацию в различные месяцы года [5]. Вертикально-осевая

ветроэлектрическая установка, мощностью 1,5 кВт, работающая в комбинации с фотоэлектрическими модулями и с системой аккумулирования энергии, позволяет использовать её для обеспечения индивидуальных потребителей практически круглогодично. Использование для солнечной фотоэлектрической установки трекерной системы ориентации позволяет увеличить выработку электрической энергии [6].

Экспериментальные исследования

Для проведения испытаний на территории Полигона использовались комбинированная ветро-солнечная установка, включающая в себя вертикальную ветроэлектрическую мини электростанцию мощностью 1,5 кВт и две солнечные панели суммарной мощностью 500 Вт (каждая мощностью по 250 Вт). Обе установки имеют общий шкаф управления с аккумуляторной системой.

На фото на рис. 1 показан расположение и общий вид комбинированной системы.



Рис. 1. Основные компоненты электрогенерирующей системы (ветро-солнечная комбинированная установка, г. Севастополь, Сев ГУ, турбаза «Горизонт»).

Также на полигоне находится трекерная система слежения за Солнцем, при помощи которой можно определять мощностные характеристики солнечных установок при изменении углов установки фотоэлектрических панелей [7].

На рис. 2 показана фотография экспериментальной установки.

Основные характеристики трекерной системы:

- Тип 2-х осевой (две плоскости вращения)
- Угол поворота: 180 градусов.



Рис. 2. Система автоматического слежения для фотоэлектрических панелей.

Для создания гарантированного энергоснабжения автономного потребителя требуется сооружение комбинированных систем на основе возобновляемых источников энергии. В нашем случае предложена ветро-солнечная гибридная система с аккумуляторной станцией. Для анализа выработки электрической энергии представленной комбинированной ветро-солнечной установкой воспользуемся данными суммарной солнечной радиации [8] и среднемесячными скоростями ветра на территории полигона (в Республике Крым, на территории северной части города Севастополя), которые приведены в таблице 1.

При проведении экспериментов были измерены мощностные и энергетические характеристики фотоэлектрических панелей и ветроэлектрической установки [8]. В результате проведения эксперимента были получены зависимости от времени года выработки электрической энергии ветровой и фотоэлектрической частью комбинированной установки, а также суммарная выработка ветро-солнечной системы [5-7].

На рисунке 3 показаны графики выработка электроэнергии комбинированной солнечно-ветровой электростанцией, находящейся на полигоне Сев ГУ.

Таблица 1. Среднемесячные значения суммарной солнечной радиации и скорости ветра

Месяц	Среднемесячная скорость ветра, м/с	суммарной солнечной радиации, Вт/м2
Январь	5,7	226
Февраль	6,2	320
Март	7,3	525
Апрель	5,4	690
Май	4,8	846
Июнь	5,2	855
Июль	6,1	840
Август	3,5	734
Сентябрь	5,3	560
Октябрь	7,5	404
Ноябрь	6,3	256
Декабрь	5,2	180

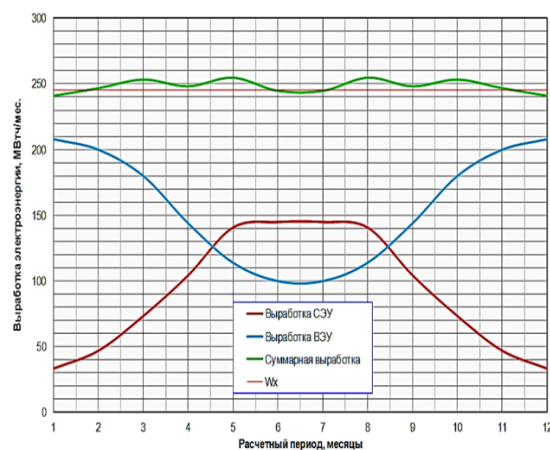


Рис. 3. Среднемесячная типичная динамика мощности, вырабатываемой ветро-солнечной электростанцией

Как видно из графиков солнечная часть установки имеет пиковую выработку электрической энергии конечно же в летние месяцы (красная линия). В то же время ветровая часть энергосистемы наиболее эффективно работает в зимние месяцы (синяя линия). При этом суммарная выработка всей установки в течение года равномерно распределена на всем месяцам. В этом и есть главные преимущества комбинированных и гибридных ветро-солнечных систем, которые проявляются при круглогодичном использовании. При этом в зимнее время основная выработка электроэнергии приходится на ветроэнергетические установки, а летом — на фотоэлектрические преобразователи [8].

При одинаковых установленных мощностях ВЭС и СЭС, их соответствующие вклады значительно варьируются в зависимости от сезона и в

течение всего года.

Следующие результаты экспериментов представлены трекерной системой, на которой можно располагать фотоэлектрические панели. Как видно из графиков, представленных на рис. 4, изменения мощности происходят практически в два раза, в зависимости от угла установки модуля. Например, в ясную погоду при падении лучей перпендикулярно на рабочую поверхность фотоэлектрических модулей (угол установки равен широте местности в г. Севастополь – 45 °), мощность модулей составляла практически максимальные значения около 500 Вт, однако при отклонении от перпендикуляра мощностные характеристики фотоэлектрических модулей падали ниже 250 Вт (т. е. почти в два раза). При этом в условиях облачности (освещённость менее 200 Вт/м²) зависимость мощностях характеристик модуля от угла наклона меняется по другим характеристикам рис. 3. Максимум мощности панели вырабатывают при расположении практически горизонтально Земли (углы установки близкие к 0°) и при установке почти вертикально (90°) за счет отражения от поверхности обладающей хорошим альбедо (бетон, снеговой покров, стены зданий).

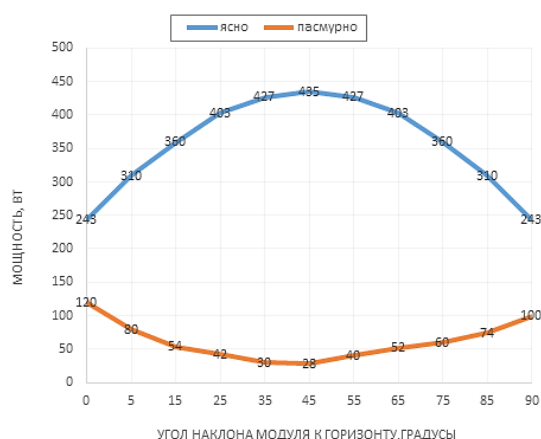


Рис.4. Изменение мощности фотоэлектрических модулей, в зависимости от угла наклона в ясную погоду и при сильной облачности

С учетом проведенных исследований можно утверждать, что предложенная трекерная система позволяет для фотоэлектрической установки (увеличить практически в два раза мощностные характеристики солнечных панелей и обеспечивает увеличение энергоснабжения электрической энергии. При использовании для солнечной фотоэлектрической установки трекерной системы ориентации (рис. 2) позволяет увеличить выработку электрической энергии до 50% в

течении всего календарного года.

Выводы

Территория полигона, расположенного в Севастопольском государственном университете, позволяет исследовать различные типы энергетических установок на основе возобновляемых источников энергии. Проведенные исследования ветро-солнечных установок показали, что за счет уникального места расположения площадки полигона на открытом месте на склоне берега Чёрного моря эффективность исследований значительно возрастает по сравнению с другими (технически возможными для исследований) площадками в районе Севастополя. Комбинированная выработка электрической энергии солнечной и ветровой установкой даёт возможность эффективно использовать генерацию в различные месяцы года. Вертикально-осевая ветроэлектрическая установка, мощностью 1,5 кВт, работающая в комбинации с фотоэлектрическими модулями и с системой аккумулирования энергии, позволяет использовать её для обеспечения индивидуальных потребителей практически круглогодично. Использование для солнечной фотоэлектрической установки трекерной системы ориентации позволяет увеличить выработку электрической энергии почти на 40 %. Проведенные исследования показали, что комбинированное использование ветро-солнечных систем энергоснабжения с системой аккумулирования энергии, а также солнечных электростанций с трекерной системой ориентации, позволяет обеспечивать автономных потребителей Крыма и Севастополя экологически чистой электроэнергией практически в любое время года с высокой эффективностью.

Список литературы

1. Бекиров Э.А., Асанов М.М., Алькатаа А., Оптимизация режимов работы систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии, Строительство и техногенная безопасность, 2018, № 13 (65), с. 107-113.
2. Zondag, H., PVT ROADMAP, A European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology, PV Catapult - Contact n° 502775 (SES6) / H. Zondag, M. Bakker, W. van Helden, Energy Research Centre of the Netherlands ECN, 2006.
3. Kuvshinov, V.V., Al-Rufae, F.M., The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region, Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp 252–255.
4. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed

- Mohammed and Husam Abdulhusein Wahhab,. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no.14, pp. 3666-3673.
5. Abd Ali, L.M., Ahmed Mohammed, H., and Anssari, M.O.H., Modeling and simulation of tidal energy, *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, no. 14, pp. 3698–3706.
 6. Усков А. Е. Определение оптимальной группы потребителей для электроснабжения с использованием ветро-солнечных электростанций // Вестник Донского государственного технического университета, 2018. Том. 18, № 1, с. 118–123.
 7. Guryev, V.V., Yakimovich, B.A., Al-Rufae, F.M., The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the Republic of Crimea and the Middle East, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp 189–194.
 8. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).

References

1. Bekirov E.A., Asanov M.M., Alkataa A., Optimization of operating modes of power supply systems using renewable energy sources, *Construction and technogenic safety*, 2018, No. 13 (65), p. 107-113.
2. Zondag, H., PVT ROADMAP, A European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology, *PV Catapult - Contact n° 502775 (SES6)* / H. Zondag, M. Bakker, W. van Helden, Energy Research Center of the Netherlands ECN, 2006.
3. Kuvshinov, V.V., Al-Rufae, F.M., The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 252–255.
4. Layth Mohammed Abd Ali, Haider Ahmed Mohammed and Husam Abdulhusein Wahhab,. A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, no.14, pp. 3666-3673.
5. Abd Ali, L.M., Ahmed Mohammed, H., and Anssari, M.O.H., Modeling and simulation of tidal energy, *J. Eng. Appl. Sc.*, 2019, no. 14, pp. 3698–3706.
6. Uskov A. E. Determination of the optimal consumer group for power supply using wind-solar power plants // *Bulletin of the Don State Technical University*, 2018. Vol. 18, no. 1, p. 118–123.
7. Guryev, V.V., Yakimovich, B.A., Al-Rufae, F.M., The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the Republic of Crimea and the Middle East, *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 189–194.
8. Photovoltaic devices from crystalline silicon. Method for correcting the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST

28976-91. – [Enter. 19.04.91]. - М.: ИПК Standards Publishing House, 2004. - 42 p. – (National standard of Russia).

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.92

Расчет динамики системы распределенного асинхронного электропривода

Л.Н. Канов

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 10.06.2022 г.; после доработки 13.06.2022 г.

Аннотация

Представлена возможность численного моделирования системы распределенного асинхронного электропривода, состоящего из асинхронных двигателей, получающих питание от удаленного источника через кабели. Построена математическая модель системы электропривода, состоящей из синхронного генератора, трансформатора, асинхронных электродвигателей и статической нагрузки. Показано, что для повышения точности расчетов кабели целесообразно представлять линиями с распределенными по длине параметрами. Описан алгоритм составления уравнений модели, приведены примеры расчета типичных режимов.

Ключевые слова: синхронный генератор, асинхронный электродвигатель, трансформатор, распределенный электропривод, кабельная линия, математическое моделирование, напряжение, ток, нагрузка, процесс пуска.

Calculation of dynamics of the system Distributed asynchronous electromechanic drive

L.N. Kanov

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia, lkanov48@mail.ru

Received 10.06.2022 y.; received in final form 13.06.2022 y.

Abstract

Possibility of numeral design of the system of the up-diffused asynchronous electromechanic, consisting of asynchronous engines, recipient a feed from remote through cables is presented. The mathematical model of the system of electromechanic, consisting of remote synchronous generator, transformer, asynchronous electric motors and static loading is built. It is showed that for the increase of exactness of calculations it is expedient to present cables lines with the parameters up-diffused on length. The algorithm of drafting of equalizations of model, examples of calculation of the typical modes, is described..

Keywords: synchronous generator, asynchronous electric motor, transformer, up-diffused electromechanic, cable bus, mathematical design, tension, current, loading, starting process.

Введение

Конструктивную основу электроприводов портовых и судовых электротехнических комплексов составляют распределенные системы

асинхронных электродвигателей, трансформаторов, синхронных генераторов, соединенных разветвленной сетью кабельных линий. На больших

предприятиях и крупных судах длины соединительных кабелей достигают многих сотен метров. Работа подобных систем электропривода сопровождается многочисленными коммутациями, пусками и остановками, а также широким диапазоном изменения моментов сопротивления нагрузок двигателей. Поэтому коммутации одного двигателя влияют на работу других. Наличие работающих двигателей ухудшает условия пуска прочих. Взаимное влияние электроприводов отражается и на процессах самозапуска двигателей после провалов или кратковременных перерывов напряжения питания.

Задаче анализа поведения электроприводов в динамических режимах посвящены многие публикации, например, [1 – 4]. В [1] выполнены исследования для однородных групп из 4...10 двигателей с помощью имитационного моделирования, что позволило выявить определенные закономерности взаимного влияния электроприводов и различия в результатах моделирования различными программными продуктами. Последнее говорит о недостаточном качестве этих продуктов.

В работах [2, 3] исследовано управление от одного инвертора группы двигателей, соединенных кабелями, с дополнительным учетом емкости кабелей. Пусковые токи, ударные моменты потери мощности в двухдвигательном электроприводе исследованы в [4, 5] при плавном изменении частоты напряжения статоров двигателей с помощью преобразователя частоты. Исследование выполнено также методом имитационного моделирования в среде *MatLab*.

К настоящему моменту актуальной представляется задача расчета взаимного влияния электродвигателей в разветвленной системе электропривода с учетом длин и всех параметров кабелей, рассматриваемых как цепи с распределенными параметрами, а также трансформаторов и питающих генераторов.

Целью статьи является построение методики расчета электромеханической динамики подобных распределенных систем асинхронного электропривода при различных коммутациях.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- построение математической модели распределенного асинхронного электропривода сложной конфигурации;
- расчет режимов электродвигателей, трансформаторов, синхронного генератора при

различных коммутациях и взаимного влияния электродвигателей.

Математическое описание элементов системы распределенного электропривода

Вследствие того, что механическая инерция асинхронных двигателей существенно преобладает над электромагнитной, применим алгебраические уравнения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [6] в ортогональной системе координат dq с опережающим вращением поперечной оси

$$\left. \begin{aligned} U_{cd} &= -\omega_k (L_c i_q + L_{ad} i_{pq}) + r_c i_{cd}; \\ U_{cq} &= \omega_k (L_c i_{cd} + L_{ad} i_{pd}) + r_c i_{cq}; \\ 0 &= -(\omega_k - p\Omega)(L_p i_{pq} + L_{ad} i_{cd}) + r_p i_{pd}; \\ 0 &= (\omega_k - p\Omega)(L_p i_{pd} + L_{ad} i_{cd}) + r_p i_{pq}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Полагаем, что вещественные части токов и напряжений являются проекциями соответствующих векторов на продольную координатную ось d , а мнимые части – на поперечную ось q

$$\begin{aligned} \dot{U}_c &= U_{cd} + jU_{cq}; & \dot{I}_c &= i_{cd} + ji_{cq}; \\ \dot{I}_p &= i_{pd} + ji_{pq} \text{ и что } U_{cq} = 0. \end{aligned}$$

Преобразуем систему (1) в два комплексных уравнения

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_c &= (r_c + j\omega_k L_c) \dot{I}_c + j\omega_k L_{ad} \dot{I}_p; \\ 0 &= (r_p + j(\omega_k - p\Omega)L_p) \dot{I}_p + j(\omega_k - p\Omega)L_{ad} \dot{I}_c. \end{aligned} \right\}$$

Отсюда получаем выражение для тока статора

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{r_c + j\omega_k L_c + \frac{\omega_k L_{ad}^2 (\omega_k - p\Omega)}{r_p + j(\omega_k - p\Omega)L_p}},$$

знаменатель которого представляет входное сопротивление асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$$\underline{Z}_{AD} = r_c + j\omega_k L_c + \frac{\omega_k L_{ad}^2 (\omega_k - p\Omega)}{r_p + j(\omega_k - p\Omega)L_p}. \quad (2)$$

В этих формулах L_c , L_p , r_c , r_p – индуктивности и сопротивления фаз обмоток статора и ротора; L_{ad} – взаимная индуктивность; ω_k – частота напряжения статора; Ω – угловая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов. Величина входного сопротивления двигателя является функцией скорости вращения ротора.

Уравнение механической динамики ротора

имеет вид баланса моментов

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{TP} \Omega + M_H(\Omega) + L_{ad}(i_{cq} i_{pd} - i_{cd} i_{pq}), \quad (3)$$

здесь k_{TP} – коэффициент трения; $M_H(\Omega)$ – момент сопротивления нагрузки.

Далее согласно [6] уравнения синхронного генератора, ротор которого вращается со скоростью ω_k без учета демпфирующих контуров в ортогональной системе dq – координат имеет вид

$$\left. \begin{aligned} U_{sd} &= -r_s I_{sd} + \omega_k L_{sq} I_{sq}; \\ U_{sq} &= -r_s I_{sq} - \omega_k L_{sd} I_{sd} - \omega_k M_f I_f, \end{aligned} \right\}$$

где I_f – ток возбуждения.

Ограничимся рассмотрением синхронного неявнополюсного генератора при $L_{sq} = L_{sd} = L_s$ и, трактуя вещественные составляющие напряжения и тока статора как продольные проекции векторов, а мнимые – поперечные проекции, и домножая второе уравнение в последней системе на мнимую единицу, объединим эти уравнения в одно комплексное уравнение

$$\dot{U}_s + (r_s + j\omega_k L_s) \dot{I}_s = -j\omega_k M_f I_f. \quad (4)$$

Комплексные уравнения на фазу понижающего трехфазного трансформатора с двумя одинаковыми вторичными обмотками w_2, w_3 имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (r_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 - j\omega(M_{12} \dot{I}_2 + M_{13} \dot{I}_3); \\ -\dot{U}_2 &= (r_2 + j\omega L_2) \dot{I}_2 - j\omega(M_{21} \dot{I}_1 - M_{23} \dot{I}_3); \\ -\dot{U}_3 &= (r_3 + j\omega L_3) \dot{I}_3 - j\omega(M_{31} \dot{I}_1 - M_{32} \dot{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где полагаем $n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_1}{w_3} > 1$, тогда

$$L_2 = L_3 = \frac{L_1}{n^2}; \quad M_{23} = M_{32} = L_2;$$

$$M_{21} = M_{12} = M_{31} = M_{32} = \frac{L_1}{n}.$$

Здесь M – коэффициенты взаимной индукции между соответствующими обмотками, n – коэффициент трансформации. Принятая однолинейная схема трансформатора изображена на рис.1.

Кабельные линии, соединяющие элементы системы, представляют собой электрические цепи с распределенными параметрами [7]. На рис.2 показана однолинейная схема замещения участка кабеля длиной dx , где обозначены

r_0, L_0, g_0, C_0 – удельные сопротивление, индуктивность, проводимость и емкость.

Выражения напряжения и тока на фазу линии имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}(x) &= \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x}; \\ \dot{I}(x) &= \frac{\underline{A}_1 e^{-\gamma x} - \underline{A}_2 e^{\gamma x}}{\underline{Z}_B}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)}$ – коэф-

фициент распространения; $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}}$ –

волновое сопротивление линии; $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ – комплексные постоянные, определяемые из граничных условий на концах кабельной линии.

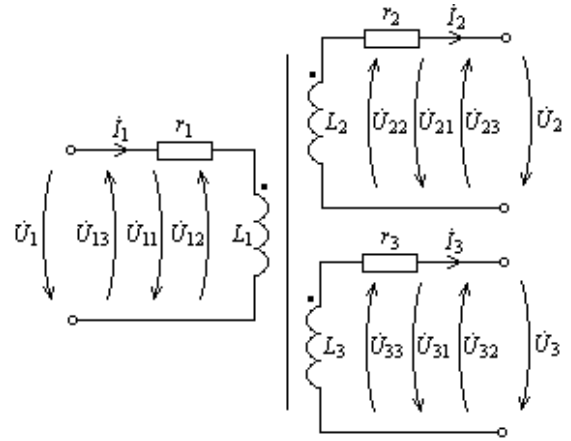


Рис.1. Трехфазный понижающий трансформатор

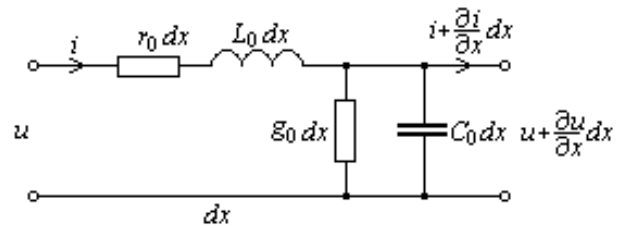


Рис.2. Схема замещения участка кабельной линии

Математическая модель системы распределенного электропривода

Рассмотрим математическую модель типичной системы распределенного электропривода, содержащей синхронный генератор, трансформатор, асинхронные двигатели, нагрузку и кабельную сеть, рис.3.

На схеме обозначены: СГ – синхронный генератор; Тр-р – понижающий трансформатор с двумя вторичными обмотками; АД2 ... АД6 – асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами; R_3 – сопротивление нагрузки. Длины шести кабельных линий обозначены $x_1, x_2, \dots, x_6$.

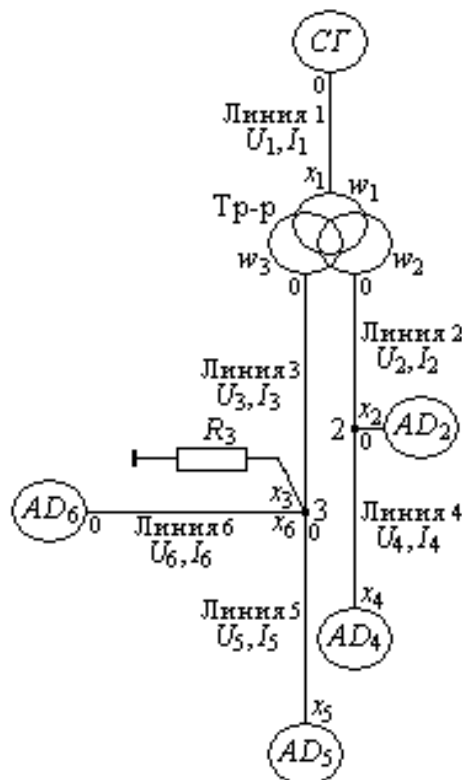


Рис.3. Однолинейная схема системы распределенного электропривода

Следовательно, для анализа режима по уравнениям (1)–(6) нужно определить 12 постоянных $\underline{A}_{k1}, \underline{A}_{k2}$; $k = 1, 2, \dots, 6$. Граничные условия в характерных узловых точках системы по [7] следующие:

– выход СГ:

$$\dot{U}_1(0) + (r_s + j\omega_k L_s) \dot{I}_1(0) = -j\omega_k M_f I_f; \quad (7)$$

– первичная обмотка трансформатора:

$$\dot{U}_1(x_1) = (r_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1(x_1) - \dots - j\omega(M_{12} \dot{I}_2(0) + M_{13} \dot{I}_3(0)); \quad (8)$$

– первая вторичная обмотка:

$$-\dot{U}_2(0) = (r_2 + j\omega L_2) \dot{I}_2(0) - \dots - j\omega(M_{21} \dot{I}_1(x_1) - M_{23} \dot{I}_3(0)); \quad (9)$$

– вторая вторичная обмотка:

$$-\dot{U}_3(0) = (r_3 + j\omega L_3) \dot{I}_3(0) - \dots - j\omega(M_{31} \dot{I}_1(x_1) - M_{32} \dot{I}_2(0)); \quad (10)$$

– в узле 2:

$$\dot{I}_2(x_2) = \dot{I}_4(0) + \frac{\dot{U}_4(0)}{\underline{Z}_{AD2}(\Omega_2)}; \quad \dot{U}_2(x_2) = \dot{U}_4(0); \quad (11)$$

– в конце линии 4:

$$\dot{I}_4(x_4) = \frac{\dot{U}_4(x_4)}{\underline{Z}_{AD4}(\Omega_4)}; \quad (12)$$

– в узле 3:

$$\dot{I}_3(x_3) = \dot{I}_5(0) + \dot{I}_6(0) + \frac{\dot{U}_6(0)}{R_H(t)}; \quad \dot{U}_3(x_3) = \dot{U}_5(0); \quad \dot{U}_5(0) = \dot{U}_6(0); \quad (13)$$

– в конце линии 5:

$$\dot{U}_5(x_5) = \dot{I}_5(x_5) \underline{Z}_{AD5}(\Omega_5); \quad (14)$$

– в конце линии 6:

$$\dot{U}_6(x_6) = \dot{I}_6(x_6) \underline{Z}_{AD6}(\Omega_6). \quad (15)$$

Конкретная запись граничных условий в характерных точках системы в соответствии с выражениями (7)–(15) приведена в Приложении.

Таким образом, уравнения (7)–(15) представляют линейную систему комплексных уравнений для определения постоянных $\underline{A}_{k1}, \underline{A}_{k2}$; $k = 1, \dots, 6$. Определив эти постоянные, находим токи статоров двигателей:

$$\dot{I}_{c2} = \frac{\dot{U}_4(0)}{\underline{Z}_{AD2}(\Omega_2)}; \quad \dot{I}_{c4} = \frac{\dot{U}_4(x_4)}{\underline{Z}_{AD4}(\Omega_4)}; \\ \dot{I}_{c5} = \frac{\dot{U}_5(x_5)}{\underline{Z}_{AD5}(\Omega_5)}; \quad \dot{I}_{c6} = \frac{\dot{U}_6(x_6)}{\underline{Z}_{AD6}(\Omega_6)}.$$

По этим токам по двум комплексным уравнениям (1) получаем токи роторов $\dot{I}_{p2}, \dot{I}_{p4}, \dot{I}_{p5}, \dot{I}_{p6}$. Отделяя вещественные и мнимые части токов статоров и роторов, по (3) получаем возможность определять электромагнитные моменты двигателей, и, следовательно, решать систему дифференциальных уравнений (3) для скоростей вращения рассматриваемых двигателей. Решение выполняется в среде MathCad; на каждом шаге решения из уравнений (7) – (15) находятся постоянные $\underline{A}_{k1}, \underline{A}_{k2}$, токи и напряжения в концах и началах кабелей.

Обсуждение результатов моделирования

Расчеты выполнены для электрических машин небольшой мощности со следующими типичными параметрами:

– генератор: сопротивление и индуктивность фазы обмотки статора $r_s = 0,02$ Ом, $L_s = 3,5$ мГн, коэффициент взаимной индукции $M_f = 44,6$ мГн, ток возбуждения $I_f = 40$ А, частота напряжения $\omega_k = 314$ с⁻¹, мощность $P_{2H} = 150$ кВт, выходное напряжение $U_1 = 660$ В;

– трансформатор: коэффициенты трансформации $n_{12} = n_{13} = 1,73$, $n_{23} = 1$; мощность $S_H = 150$ ВА, сопротивления и индуктивности обмоток $r_1 = 0,05$ Ом, $L_1 = 0,1$ Гн, $r_2 = r_3 = 0,03$ Ом, $L_2 = L_3 = 33,4$ мГн; коэффициенты взаимной индукции $M_{12} = M_{13} = 57,8$ мГн, $M_{23} = 33,4$ мГн;

– одноступенчатые асинхронные двигатели: напряжение статора 380 В, сопротивления и индуктивности обмоток $r_c = 0,27$ Ом, $L_c = 0,05$ Гн, $r_p = 0,19$ Ом, $L_p = 44$ мГн, коэффициент взаимной индукции $L_{ad} = 49$ мГн, число пар полюсов $p = 3$, номинальная скорость вращения $\Omega = 102$ с⁻¹, мощность $P_{2H} = 30$ кВт, моменты инерции, кг·м²: $J_2 = 0,4$, $J_4 = 0,5$, $J_5 = 0,45$, $J_6 = 0,6$; одинаковые моменты нагрузки $M_H = 0,05 \cdot \Omega$ Н·м.

– кабельные линии: удельные параметры: $r_0 = 0,6$ мОм/м, $L_0 = 7$ мкГн/м; $g_0 = 50$ мкСм/м, $C_0 = 0,09$ мкФ/м; принятые длины кабелей, м: $x_1 = 255$, $x_2 = 263$, $x_3 = 330$, $x_4 = 270$, $x_5 = 300$, $x_6 = 280$.

На рис.4 изображен пуск одновременно всех четырех двигателей в момент времени $t = 0$ при напряжении генератора 660 В. Пуск сопровождается провалом напряжения $U_1(0)$ генератора до 390 В в течение трех секунд. В силу принятой

архитектуры кабельной сети двигателя достигают установившейся скорости неодновременно. Это приводит к колебаниям напряжения в сети и на запускаемых двигателях, например, на двигателе AD_6 .

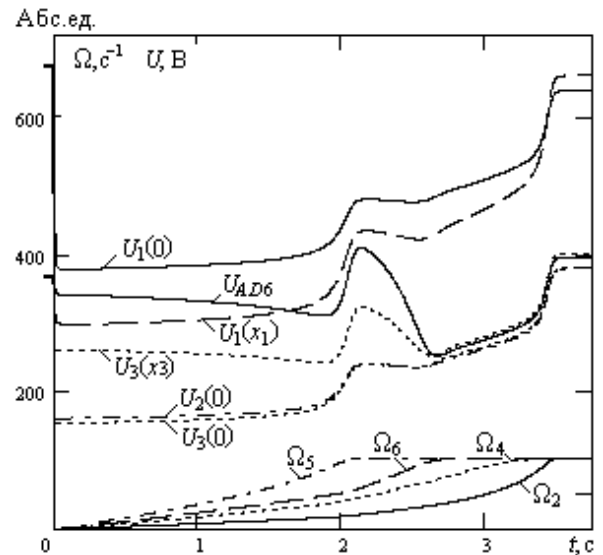


Рис. 4. Одновременный пуск всех двигателей

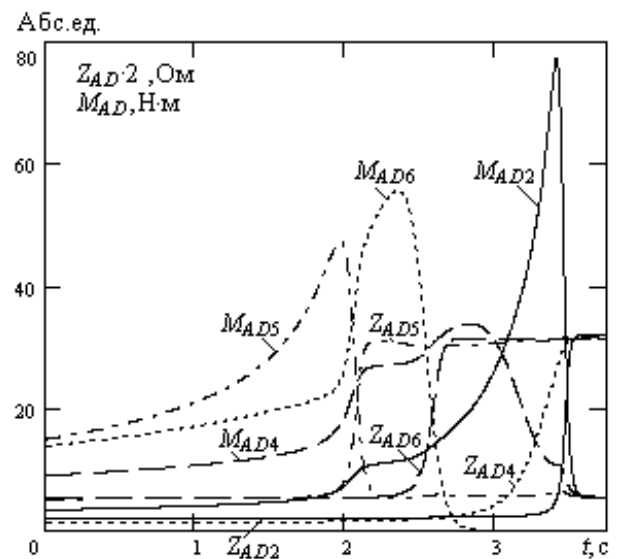


Рис.5. Электромагнитные моменты и входные сопротивления двигателей

На рис.5 показаны соответствующие электромагнитные моменты двигателей и их входные сопротивления (показаны увеличенными вдвое).

После достижения установившейся скорости входные сопротивления увеличиваются до 16 Ом.

На рис.6 показаны пусковые токи двигателей. Их величины не превышают полутора раза Ампер при номинальном рабочем значении

22 А.

Рассмотрим далее влияние пуска на уже работающие двигатели.

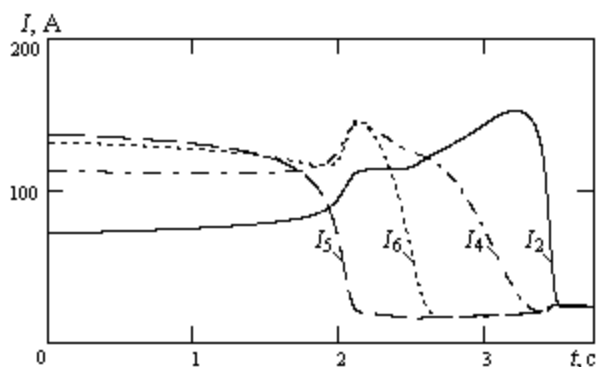


Рис.6. Пусковые токи двигателей

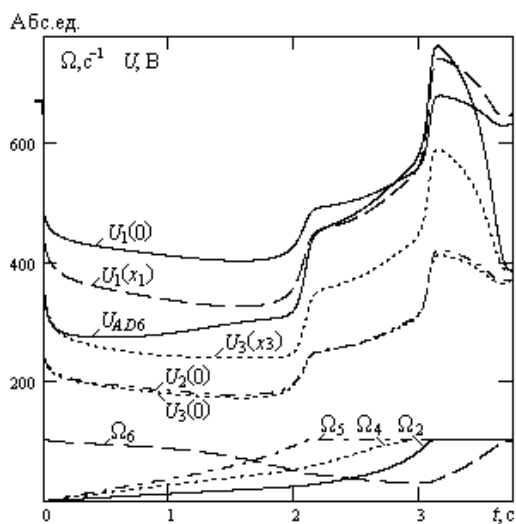


Рис.7. Пуск трех двигателей при одном работающем двигателе

На рис.7 показан процесс пуска трех двигателей AD_2 , AD_4 , AD_5 при работающем двигателе AD_6 , нагрузка которого составляет $M_{H6} = 55\Omega$ Н·м. Рисунок показывает, что вследствие значительного провала напряжения работающий двигатель теряет большую часть скорости, однако после завершения пуска трех двигателей успевает набрать свою скорость. Длительность пуска трех двигателей меньше, чем четырех (рис.4) вследствие меньшего провала напряжения.

На рис.8 показан процесс наброса нагрузки на один из работающих двигателей. Первоначальная нагрузка на двигатели задавалась по $0,45\Omega$ Н·м. Скорости двигателей в исходном

стационарном режиме составляли:

$$\Omega_2 = \Omega_4 = 97 \text{ с}^{-1}, \quad \Omega_5 = \Omega_6 = 98 \text{ с}^{-1}.$$

В момент времени $t = 0,5$ с к двигателю приложена нагрузка $M_{H6} = 1,45\Omega_6$, т.е. 142 Н·м. Двигатель потерял почти всю скорость, двигатели AD_2 и AD_4 также начали снижать скорость из-за провала напряжения. После снятия нагрузки в момент $t = 3$ с двигатель AD_6 начал восстанавливать скорость. Двигатель AD_5 практически не изменил скорости, так как находится электрически далеко от AD_6 . Спустя 6 с двигатели AD_2 и AD_4 также начали восстанавливать скорости.

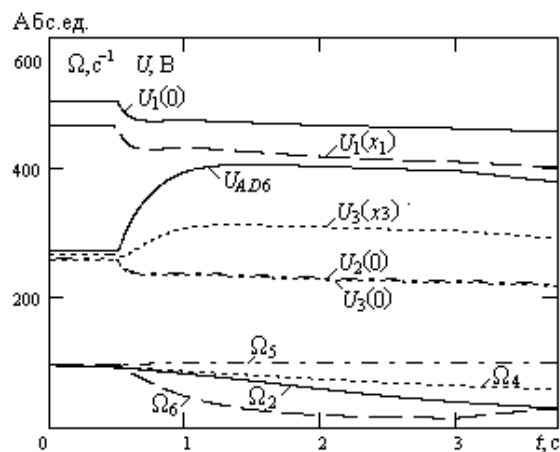


Рис.8. Наброс нагрузки на двигатель AD_6

На рис.9 представлен еще один экстремальный режим включения в интервал времени от $t = 0,5$ с до $t = 2$ с статической нагрузки в виде резистора R_3 величиной 6 Ом при всех четырех двигателях, вращающихся со скоростями $\Omega_2 = \Omega_4 = 98 \text{ с}^{-1}$, $\Omega_5 = \Omega_6 = 99 \text{ с}^{-1}$ под одинаковой нагрузкой $M_H = 1,45\Omega$. Рисунок показывает, что двигатели AD_2 и AD_4 выпали из режима, а двигатели AD_5 и AD_6 сохранили работоспособность, хотя и существенно потеряли скорости. Это также объясняется сравнительно большей удаленностью двигателей AD_5 и AD_6 от точки включения статической нагрузки.

Таким же образом имеется возможность анализировать и другие динамические режимы распределенной нагрузки.

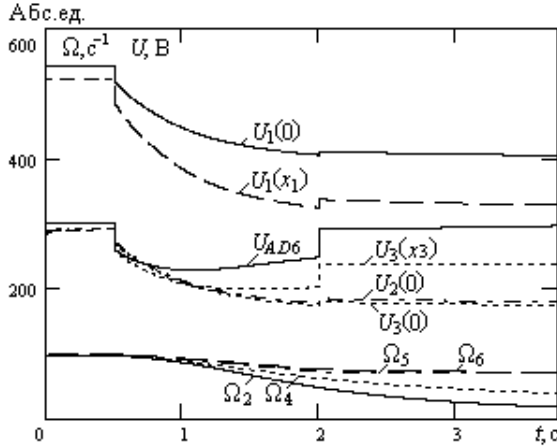


Рис.9. Включение статической нагрузки

Заключение

В статье показано, что существует принципиальная возможность исследования режимов работы группы асинхронных двигателей, находящихся в реальной сети электроснабжения с учетом влияния кабельных линий с распределенными параметрами. Учет распределенных параметров кабельных линий позволяет выполнять расчет режима с более высокой точностью, чем обычно применяемые методики.

Применение подобного подхода к расчетной практике позволяет разрабатывать программное обеспечение, что дает возможность задавать конфигурацию системы электроснабжения, длины и параметры ветвей кабелей, количество двигателей и их параметры, последовательности включения двигателей для расчета реальных процессов пусков и отключений приводов погрузочно – разгрузочных комплексов, характера нагрузки на двигателях при моделировании режимов работы портовых и судовых механизмов.

Перспективной представляется задача расширения системы электропривода с учетом увеличения количества синхронных генераторов и трансформаторов, а также построения алгоритмов частотного оптимального управления подобными системами на основе полупроводниковых преобразователей частоты.

Приложение

Синхронный генератор по (7)

$$\underline{A}_{11} + \underline{A}_{12} + (r_s + j\omega_k L_s) \frac{\underline{A}_{11} - \underline{A}_{12}}{\underline{Z}_{B1}} = -j\omega_k M_f I_f$$

Первичная обмотка трансформатора по (8) (первое уравнение (5))

$$\underline{A}_{11} e^{-\gamma_1 x_1} + \underline{A}_{12} e^{\gamma_1 x_1} = (r_1 + j\omega L_1) \frac{\underline{A}_{11} e^{-\gamma_1 x_1} - \underline{A}_{12} e^{\gamma_1 x_1}}{\underline{Z}_{B1}} - j\omega M_{12} \frac{\underline{A}_{21} - \underline{A}_{22}}{\underline{Z}_{B2}} - j\omega M_{13} \frac{\underline{A}_{31} - \underline{A}_{32}}{\underline{Z}_{B3}}.$$

Первая вторичная обмотка трансформатора по (9) (второе уравнение (5))

$$0 = \underline{A}_{21} + \underline{A}_{22} - j\omega M_{21} \frac{\underline{A}_{11} e^{-\gamma_1 x_1} - \underline{A}_{12} e^{\gamma_1 x_1}}{\underline{Z}_{B1}} + (r_2 + j\omega L_2) \frac{\underline{A}_{21} - \underline{A}_{22}}{\underline{Z}_{B2}} + j\omega M_{23} \frac{\underline{A}_{31} - \underline{A}_{32}}{\underline{Z}_{B3}}.$$

Вторая вторичная обмотка трансформатора по (10) (третье уравнение (5))

$$0 = \underline{A}_{31} + \underline{A}_{32} - j\omega M_{31} \frac{\underline{A}_{11} e^{-\gamma_1 x_1} - \underline{A}_{12} e^{\gamma_1 x_1}}{\underline{Z}_{B1}} + (r_3 + j\omega L_3) \frac{\underline{A}_{31} - \underline{A}_{32}}{\underline{Z}_{B3}} + j\omega M_{32} \frac{\underline{A}_{21} - \underline{A}_{22}}{\underline{Z}_{B2}}.$$

Узловая точка 2 по (11)

$$\frac{\underline{A}_{21} e^{-\gamma_2 x_2} - \underline{A}_{22} e^{\gamma_2 x_2}}{\underline{Z}_{B2}} = \frac{\underline{A}_{41} - \underline{A}_{42}}{\underline{Z}_{B4}} + \frac{\underline{A}_{41} + \underline{A}_{42}}{\underline{Z}_{AD2}};$$

$$\underline{A}_{21} e^{-\gamma_2 x_2} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_2 x_2} = \underline{A}_{41} + \underline{A}_{42}.$$

В конце линии 4 по (12)

$$\frac{\underline{A}_{41} e^{-\gamma_4 x_4} - \underline{A}_{42} e^{\gamma_4 x_4}}{\underline{Z}_{B4}} = \frac{\underline{A}_{41} e^{-\gamma_4 x_4} + \underline{A}_{42} e^{\gamma_4 x_4}}{\underline{Z}_{AD4}(\Omega_4)}.$$

Узловая точка 3 по (13)

$$\frac{\underline{A}_{31} e^{-\gamma_3 x_3} - \underline{A}_{32} e^{\gamma_3 x_3}}{\underline{Z}_{B3}} = \frac{\underline{A}_{51} - \underline{A}_{52}}{\underline{Z}_{B5}} + \dots$$

$$\dots + \frac{\underline{A}_{61} - \underline{A}_{62}}{\underline{Z}_{B6}} + \frac{\underline{A}_{61} + \underline{A}_{62}}{R_H(t)};$$

$$\underline{A}_{31} e^{-\gamma_3 x_3} + \underline{A}_{32} e^{\gamma_3 x_3} = \underline{A}_{51} + \underline{A}_{52};$$

$$\underline{A}_{61} + \underline{A}_{62} = \underline{A}_{51} + \underline{A}_{52}.$$

В конце линии 5 по (14)

$$\underline{A}_{51} e^{-\gamma_5 x_5} + \underline{A}_{52} e^{\gamma_5 x_5} = \frac{\underline{A}_{51} e^{-\gamma_5 x_5} - \underline{A}_{52} e^{\gamma_5 x_5}}{\underline{Z}_{B5}} \underline{Z}_{AD5}(\Omega_5);$$

В конце линии 6 по (15)

$$\underline{A}_{61} e^{-\gamma_6 x_6} + \underline{A}_{62} e^{\gamma_6 x_6} = \frac{\underline{A}_{61} e^{-\gamma_6 x_6} - \underline{A}_{62} e^{\gamma_6 x_6}}{\underline{Z}_{B6}} \underline{Z}_{AD6}(\Omega_6).$$

Список литературы

1. Комков А.Н., Чернев М.Ю., Блюк В.В. Исследование взаимного влияния асинхронных электроприводов центробежных насосов в составе электротехнической системы // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2019. Т.62. № 5. С.62 – 67.

- DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2019 – 5 – 62 – 67.
2. Ещин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в системе электроснабжения / Е.К.Ещин // Электротехника, 2002. – № 1. – С.40 – 43.
 3. Ещин.Е.К. Управление состоянием группы асинхронных электродвигателей в сети электроснабжения // Изв.ВУЗов. Электромеханика. – 2020. – Т.63. – № 1. – С.62 – 68. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2020 – 1 – 62 – 68.
 4. Усихин В.Н. О влиянии нагрузки на токи в электроустановках переменного тока до 1 кВ // Промышленная энергетика. – 2001. – № 1. – С.29 – 33.
 5. Канов Л.Н. Оптимизация процесса пуска распределенного асинхронного электропривода / Научный журнал «Энергетические установки и технологии». 2021. Т.7. № 4. Изд. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». С.23 – 29. ISSN 2413 – 5526.
 6. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М., Колесников Е.Б., Овсянников Д.С. Исследование частотного двухдвигательного пуска электропривода скребкового конвейера методом математического моделирования // Изв.ВУЗов. Электромеханика. – 2022. – Т.65. – № 1. – С.49 – 55. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2022 – 1 – 49 – 55.
 7. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 247 с.
 8. Электрические системы. Электрические сети / В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др. М.: Изд-во «Высшая школа», 1998. 511 с.
 9. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: изд-во «Высшая школа», 2001. – 431 с.
 10. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М., Л.: изд-во «Высшая школа», 2001. – 528 с.
 11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М: Изд-во «Юрайт», 2012. 701 с.
- References**
1. Komkov A.N., Chernev M.U., Bluk V.V. *Issledovanie vzaimnogo vliyaniya asinkhronnykh elektropriwodov tsentrobezhnykh nasosov v sostave elektrotekhnicheskoi sistemy* [Research of cross-coupling of asynchronous electromechanics of Chempumps in Composition the Electrical engineering system/. News of higher educational establishments. Electromechanics/. – 2019. Vol. 62, No.5.– PP.62-67. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2029 – 5 – 62 – 67.
 2. Eshchin E.K. *Model asinchronnogo elektrodvigatelya v ssisteme elektrosnabzheniya* [A Model of Asynchronous electric motor is in the System of Electrosupply]. Electrotechnique/. – 2002. No.1. – PP.40-43.
 3. Eshchin E.K. *Upravlenie sostoyaniem gruppy asinkhronnykh elektrodvigateli v seti elektrosnabzheniya* [A Control the State of Group of Asynchronous electric motors is in the Network of Electrosupply]. News of higher educational establishments. Electromechanics/. – 2020. Vol. 63, No.1.– PP.62-68. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2020 – 1 – 62 – 68.
 4. Usikhin V.N. *O vliyani nagruzki na toki v elektroustanovkakh peremennogo toka do 1 kV* [About Influence of Loading on Currents in Electroplants of Alternating current to 1 kV]. Industrial Energetic/. – 2001. – No.1. – PP.29 – 33.
 5. Kanov L.N. *Optimizatsiya protsessa puska raspredelennogo asinkhronnogo elektroprivoda* [Optimization of Process of Starting of the up-diffused Asynchronous electromechanic]. A scientific magazine is the «Power plants and technologies». 2021. T.7. No. 4. Publ. of FGAOU In the «Sevastopol state university». P.23 – 29. ISSN 2413 – 5526.
 6. Babokin G.I., Shprekher D.M., Kolesnikov E.B., Ovsyannikov D.S. *Issledovanie chastotnogo dvukhdvigatel 'nogo puska elektroprivoda skrebkovogo konveera metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Research of the frequency twomotors starting of electromechanic of scraper conveyer by the method of mathematical design]. News of higher educational establishments. Electromechanics/. – 2022. Vol. 65, No.1.– PP.49-55. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2022 – 1 – 49 – 55.
 7. Strakhov S.V. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepyakh, soderzhashchikh mashiny peremennogo toka* [Transients are in Electric chains, Containing the machines of Alternating current]. M., L.: the State power publishing house, 1960. 247 p.
 8. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti*. M.: Izd-vo is «Higher school», 1998. 511 p.
 9. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical Modeling of Electric machines]. Moscow: Izd. «Higher school», 2001. – 431 p.
 10. Kovach K., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients are in the Machines of Alternating current]. Moscow, Leningrad: Izd. «Higher school», 2001. – 528 p.
 11. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical bases of the Electrical Engineering. Electric chains]. M.: Izd-vo of «Yurayt», 2012. 701 p.

УДК 621.318.4

Управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа как средство повышения эффективности электропередачи сверхвысокого напряжения

В.В. Смирнов¹, И.К. Смирнов², О.Р. Ивченко³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия.¹svadick@mail.ru, ²35ivan115s@mail.ru, ³oleg.ivchenko.00@mail.ru

Статья поступила 28.08.2022 г.; после доработки 30.08.2022 г.

Аннотация

В современных экологических, экономических и политических условиях растет актуальность электростанций с переменными режимами генерации, например, солнечных ветровых, геотермальных, биоэнергетических станций. Соответственно, необходимы управляемые, гибкие электрические сети способные эффективно работать с переменной нагрузкой. Эта эффективность передачи электроэнергии может быть обеспечена применением управляемой поперечной компенсации реактивной мощности посредством установки плавно-регулируемых силовых индуктивных устройств.

Ключевые слова: устройства компенсации реактивной мощности, управляемые шунтирующие реакторы (УШР), управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа (УШРТ), единая энергетическая система, FACTS, магнитная система, системы автоматического управления, управляемые линии электропередачи.

Controlled transformer-type shunt reactor as a means of increasing the efficiency of ultra-high voltage power transmission

V.V. Smirnov¹, I.K. Smirnov², O.R. Ivchenko³FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia.¹svadick@mail.ru, ²35ivan115s@mail.ru, ³oleg.ivchenko.00@mail.ru

Received 28.08.2022 y.; received in final form 30.08.2022 y.

Abstract

In modern environmental, economic and political conditions, the relevance of power plants with variable generation modes, such as solar wind, geothermal, bioenergy stations, is growing. Accordingly, controlled, flexible electrical networks capable of operating efficiently with variable loads are needed. This efficiency of electric power transmission can be ensured by the use of controlled transverse compensation of reactive power through the installation of smoothly adjustable power inductive devices.

Keywords: reactive power compensation devices, controlled shunt reactors (CSR), controlled shunt reactors of transformer type (CSRT), unified power system, FACTS, magnetic system, automatic control systems, controlled transmission line, power systems.

Введение

В настоящее время в электроэнергетике большое значение придается созданию управля-

емых или гибких линий электропередач, являющихся составной частью «интеллектуальных» (Smart Grid) сетей с устройствами FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems).

Для оптимального ведения режимов таких энергосистем необходимы высокоэффективные средства регулирования потоков как активной, так и реактивной мощности.

Для управления режимами по напряжению и реактивной мощности наряду с традиционным применением генераторов, синхронных и статических компенсаторов, коммутируемых реакторов и конденсаторных батарей в последнее десятилетие все более широко используются новые устройства – шунтирующие реакторы (ШР).

Шунтирующие реакторы применяются в сетях высших классов напряжения для компенсации избыточной реактивной мощности линий электропередачи при малых нагрузках. Токоограничивающие реакторы применяются в сетях 6-10 кВ. Характеристики обоих типов реакторов неизменны. Это обстоятельство вызывает ряд трудностей в эксплуатации. Постоянно включенные шунтирующие реакторы ограничивают пропускную способность линий.

Постоянно включенные токоограничивающие реакторы с неизменной индуктивностью не позволяют обеспечить достаточно глубокого ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях, поскольку увеличение индуктивности реактора приводит к снижению напряжения на фидере в нормальных условиях эксплуатации.

Возможность изменения индуктивности реакторов обеспечит значительное улучшение условий эксплуатации электрических сетей. Плавное и более быстрое регулирование обеспечивают управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа (УШРТ).

Цель исследования

Основной целью данной работы является анализ перспектив применения, УШРТ в энергосистеме, эффективности различных современных конструктивных решений в сфере разработки шунтирующих реакторов и преимуществ управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа перед другими средствами и устройствами того же принципа действия, обеспечивающими повышение эффективности работы и энергосбережения единой энергетической системы России.

Особенности применения ШР и УШР

Шунтирующие реакторы (ШР), обычно устанавливаются на подстанциях или линиях электропередачи классов напряжения 330 кВ и

выше. В случаях особо длинных линий они могут применяться и при более низких напряжениях: 110 и 220 кВ. Основное назначение ШР – снизить до допустимого уровня напряжение на открытом конце воздушной (ВЛ) или кабельной линии (КЛ) при их одностороннем включении на шины питающей сети. Вторая цель установки ШР – ограничить так называемый «сток» избыточной реактивной мощности с ВЛ или КЛ (при малых нагрузках по линии) в примыкающую к линии сеть.

Третье назначение ШР – снизить величину временных перенапряжений и энергию коммутационных перенапряжений до уровней, допустимых для работы установленных на линии ограничителей перенапряжений (ОПН), которые не всегда имеют достаточный запас по выдерживаемому напряжению и поглощаемой энергии.

Реакторы необходимы, прежде всего, в режимах малой передаваемой по линиям мощности или на холостом ходу этих линий. По мере увеличения передаваемой по линии активной мощности реактивная мощность, вырабатываемая емкостью линии, все больше потребляется в ее же продольной индуктивности, и, следовательно, снижается необходимость в шунтирующих реакторах, как дополнительных потребителей реактивной мощности, установленных по концам линии или на шинах примыкающих к линии подстанций.

Особенно заметным негативное влияние шунтирующих реакторов на пропускную способность оказывается для протяженных линий, поскольку суммарная реактивная мощность ШР для таких линий, как правило, значительна.

Для исключения упомянутого негативного влияния шунтирующие реакторы приходится оснащать собственными выключателями и многократно коммутировать ими реактор в течение суточного графика изменения передаваемой по линиям мощности.

Вместе с тем известно, что коммутации реакторов являются нежелательными, так как приводят к скачкам напряжения в местах установки ШР, к быстрому расходованию ресурса выключателей, к созданию коммутационных перенапряжений, воздействующих на изоляцию обмоток реактора.

Кроме того, отключенное состояние реакторов недопустимо не в коем случае, если оно совпадает с аварийными коммутационными операциями на электропередаче, так как требуемое в этом случае для ограничения перенапряжений быстрое подключение ШР будет не-

возможно. Так же, не имея плавного регулирования своей реактивной мощности, значительно снижают предел статической устойчивости электропередачи.

Все перечисленные недостатки ШР преодолеваются путем их замены на управляемые шунтирующие реакторы (УШР).

Создание УШР значительно расширило область традиционного применения шунтирующих реакторов. Например, в сетях 35–220 кВ в России и в других энергетически развитых странах мира уже нашли широкое применение так называемые устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), представляющие собой параллельное соединение УШР и конденсаторной батареи, при котором обеспечивается плавное регулирование реактивной мощности от режима ее потребления до режима ее выработки.

Применение управляемых шунтирующих реакторов позволяет повысить предел передаваемой мощности по условию статической устойчивости практически до значения ее натуральной мощности, что особенно актуально для протяженных линий.

С использованием УШР стало возможным создание транснациональных электропередач переменного тока протяженностью до 2000–2500 км без использования дорогостоящей технологии передачи постоянным током. Потребность в управляемых средствах компенсации реактивной мощности имеется в сетях всех классов напряжения.

Однако именно в сетях 500 кВ и выше число и важность решаемых с помощью УШРТ задач оказываются наиболее значительными.

Во-первых, линии 500–750 кВ имеют большую длину, а их фазы выполнены с расщеплением проводов на несколько составляющих (для ограничения потерь на корону).

Следовательно, такие линии являются источниками повышенной реактивной мощности, которая в зависимости от режима электропередачи изменяется в широком диапазоне значений, приводя к недопустимым колебаниям напряжения в сети, к росту потерь (при понижении напряжения), к риску повреждения оборудования (при его повышении).

Во-вторых, электропередачи 500–750 кВ, как правило, выполняют ответственную роль магистральных, системообразующих, межгосударственных, транснациональных и поэтому по ним, в случае необходимости, надо иметь возможность передать значительную мощность с должным запасом устойчивости.

Особенности функционирования и эксплуатации УШРТ

Первая модель управляемого реактора трансформаторного типа УШРТ усовершенствованной конструкции была создана на кафедре электрических и электронных аппаратов Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета (СПбГПУ). Несмотря на малую мощность (10 кВ, 100 квар) она позволила подтвердить возможность создания реакторов с приемлемыми характеристиками, а также внести необходимые поправки в расчетные формулы.

Следующий этап нового направления развития УШРТ состоялся в Индии в компании BHEL по инициативе крупного специалиста в области трансформаторостроения V.K.Lakhiani. В результате сотрудничества СПбГПУ и BHEL при огромном внимании к проекту со стороны руководства BHEL и прежде всего со стороны д-ра Y.P.Abbi был создан трехфазный реактор 11 кВ, 2 Мвар. Испытания этого реактора полностью подтвердили справедливость теоретических разработок. Потери мощности в нем немного превышают потери в обмотках, а содержание высших гармонических не превышает 2% от номинального тока.

Успешный результат этого этапа развития УШРТ позволил перейти к следующему этапу: создание промышленного образца УШРТ 400 кВ, 50 Мвар. Производство этого реактора было завершено в середине 2001 года, а его официальный пуск в эксплуатацию состоялся в начале ноября того же года. С тех пор реактор успешно эксплуатируется на промежуточной подстанции линии 400 кВ вблизи г.Итарси в Центральной Индии.

Затем был обобщен опыт теоретических исследований и их реализации в практических конструкциях. Естественно, основное внимание особенностям конструкции и расчета характеристик УШРТ без повторения известных истин трансформаторостроения.

При больших напряжениях и больших мощностях управляемых реакторов они не вписываются в транспортные габариты по высоте и по ширине даже при по фазном исполнении. В этом случае целесообразно разделять обмотки на две равные части, помещая их вокруг разных стержней. При этом обмотки должны быть намотаны на стержни таким образом, чтобы они создавали магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу в одном и том же направлении. В этом случае каждая обмотка рассчитана на половину рабочего напряжения: одна часть обмотки на

напряжение $0-0,5U_{\text{ФН}}$, а вторая на напряжение $0,5U_{\text{ФН}} - U_{\text{ФН}}$. Соединенные последовательно вместе эти разделенные обмотки работают под номинальным напряжением.

Поэтому высота окна магнитопровода УШРТ с разнесенными обмотками больше высоты окна магнитопровода с одинарными обмотками при той же высоте каждой из обмоток.

Разделение обмоток УШРТ на две равные части позволяет значительно уменьшить их высоту и наружный диаметр. В связи с этим создание УШРТ с разнесенными обмотками требуемой мощности на ультравысокие напряжения оказывается вполне возможным, тогда как создание УШРТ с одинарными обмотками на ультравысокие напряжения (1000 кВ и выше) с габаритами, определяемыми правилами транспортировки, нереально. Особенностью УШРТ с разнесенными обмотками является необходимость продления ярем до краев высоковольтных обмоток для обеспечения улавливания магнитного потока по выходе из межобмоточного пространства, а также для обеспечения крепления одному

из вариантов рис.1.

Управляемый шунтирующий реактор представляет собой двух обмоточный трансформатор с напряжением короткого замыкания, равным фазному напряжению. Его первичная обмотка постоянно подключена к линии, а нейтраль заземлена. Вторичная обмотка замкнута управляющим блоком. При применении в управляющем блоке тиристоров с регулируемыми углами зажигания предусматривается третья обмотка КО, располагаемая между сетевой обмоткой (СО) и обмоткой управления (ОУ). Эта обмотка предназначена для подавления высших гармонических в токе реактора. Для подавления 3, 5 и 7 гармоник к КО подключены фильтры.рис.2. В зависимости от угла зажигания тиристоров ток в обмотке управления изменяется от номинального до нуля, а в сетевой обмотке от номинального индуктивного тока до емкостного тока, обусловленного фильтрами высших гармонических.

Такой реактор трансформаторного типа (УШРТ) безынерционный. Путем быстрого изменения угла зажигания тиристоров его ток

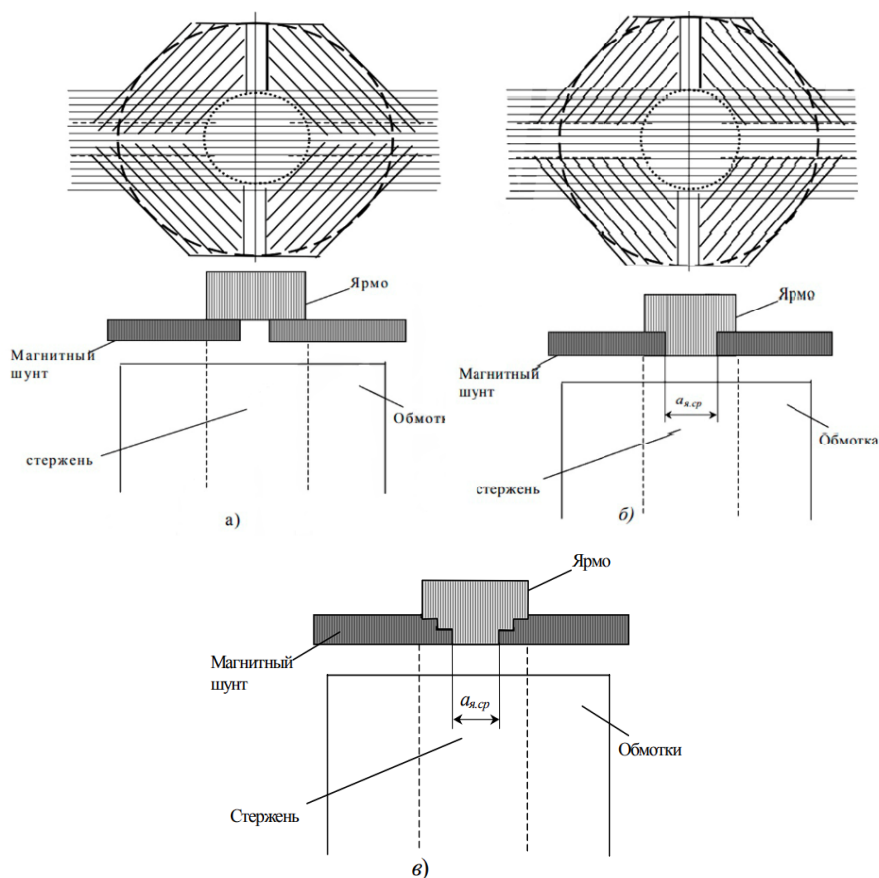


Рис. 1. Секторный шунт: аналог кольцевому шунту (а), в одноступенчатом варианте стыковки с ярмом (б), в двухступенчатом варианте (в).

можно изменять за полпериода промышленной частоты во всем диапазоне регулирования (например, от нуля до номинального тока). Потери мощности в таком реакторе такие же, как в трансформаторе той же мощности.

Содержание высших гармонических в токе сетевой обмотки не превышает 2% от номинального тока во всем диапазоне его регулирования. Такие характеристики УШРТ позволяют подключать их непосредственно к линиям электропередачи. В нормальных режимах работы линий они обеспечивают компенсацию избыточной зарядной мощности линий, автоматически следя за режимом работы электропередачи. В аварийных режимах (разрыв электропередачи, короткое замыкание на линии и т.п.) они быстро изменяют ток до необходимой величины, обеспечивая ограничение внутренних перенапряжений, быстрое погасание дуги короткого замыкания и т.п.

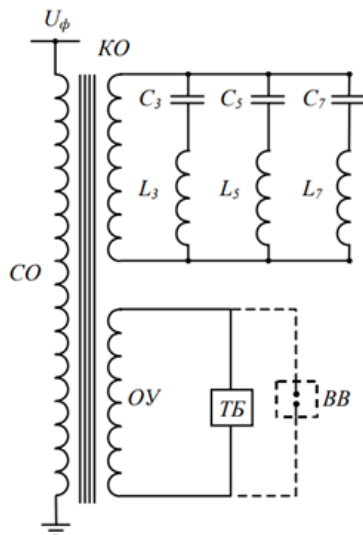


Рис.2. Принципиальная схема силовой части управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа.

Для полной компенсации избыточной зарядной мощности линии номинальный ток реактора должен быть равен зарядному току ненагруженной линии.

$$I_{р.ном} = I_H \cdot \lambda, \quad (1)$$

где I_H - натуральный ток линии;

λ - волновая длина линии.

Избыточный реактивный ток линии изменяется в зависимости от тока нагрузки I согласно следующему соотношению.

$$I_{р.изб} = I_H \cdot \lambda \left[1 - \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Соответственно должен изменяться ток реактора, обеспечивающий компенсацию $I_{р.изб}$.

Поэтому система управления реактором должна обеспечивать измерение тока нагрузки в линии (с помощью трансформатора тока), вычисление необходимого тока реактора по формуле (2) или более точной, измерение тока в сетевой обмотке реактора с помощью трансформатора тока, сравнение вычисленного и измеренного токов и выработку сигнала на изменение угла зажигания тиристоров в зависимости от знака разности вычисленного и измеренного токов реактора. При положительном значении этой разности угол зажигания тиристоров должен уменьшаться (чтобы обеспечить увеличение тока), при отрицательном значении этой разности - увеличиваться. Согласно формуле (1) при передаче мощности, близкой к натуральной, ток в сетевой обмотке реактора должен быть близким к нулю. Однако, для обеспечения устойчивости работы электропередачи необходимо иметь некоторый запас по регулированию тока. При передаче по линии натуральной мощности такой запас обеспечивается емкостным током через сетевую обмотку реактора, обусловленным фильтрами высших гармонических. Поэтому нет никаких проблем обеспечения устойчивой передачи мощности вплоть до натуральной мощности линии.

На холостом ходу линии ее зарядный ток максимален и равен произведению $I_H \cdot \lambda$. Поэтому при внезапном сбросе нагрузки на линии (например, при разрыве электропередачи) необходимо обеспечить быстрое увеличение мощности реактора вплоть до номинальной, чтобы предотвратить повышение напряжения на линии сверх допустимого значения.

С этой целью система управления реактора должна получать сигнал на отключение линейных выключателей и без задержки вырабатывать сигнал на увеличение мощности реактора до номинального значения. Поскольку время отключения выключателя составляет несколько периодов промышленной частоты, ток через УШРТ достигает номинального значения до момента отключения линии.

Аналогично для включения линии под напряжение необходимо подать сигнал на систему управления УШРТ одновременно с сигналом на привод выключателя. В этом случае при появлении напряжения на линии ток через сетевую обмотку УШРТ будет равен номинальному току. Следует отметить трудность обеспечения синхронизирующего устройства УШРТ в этом случае, поскольку перед включением выключателя на линии напряжение отсутствует.

Для исключения возможных ошибок целесообразно параллельно тиристорному блоку

управления устанавливать вакуумный выключатель, замыкающий накоротко обмотку управления УШРТ по сигналу на включение линейного выключателя. После включения линии с обеих сторон проблема синхронизации тиристорной системы управления отпадает и вакуумный выключатель должен быть немедленно отключен для обеспечения возможности регулирования тока реактора.

УШРТ имеет еще одну существенную особенность. Поскольку его напряжение короткого замыкания близко к 100%, любые замыкания в обмотке управления реактора не могут увеличить его ток свыше номинального. Поэтому не требуется силового выключателя для аварийного отключения УШРТ. Его аварийное отключение можно обеспечить выключателем нагрузки, а в неповрежденном состоянии - разъединителем, поскольку при отсутствии тока в ОУ ток в сетевой обмотке составляет доли процента ($\approx 0,5\%$) от номинального тока. Следовательно, для профилактического отключения УШРТ необходимо обесточить ОУ реактора, для чего следует предусмотреть возможность подачи специального сигнала на закрытие тириستоров (на увеличение угла их зажигания до 90°). Естественно, при повреждении высоковольтной обмотки УШРТ (например, замыкании части витков) ток через оставшуюся часть СО может увеличиться сверх номинального значения. Однако это крайне редкое явление должно рассматриваться как авария на линии, требующая ее отключения линейным выключателем.

Заключение

Проведенный анализ особенностей работы управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов, сравнение с другими устройствами компенсации реактивной мощности, отечественный и зарубежный опыт в области современных средств регулирования в энергосистемах показал техническую и экономическую эффективность применения управляемых шунтирующих реакторов.

Показано, что применение УШРТ в комплексе с использованием высоковольтных линий электропередач повышенной пропускной способности, а также других устройств типа FACTS, позволяет создавать электропередачи переменного тока с заданной пропускной способностью и без ограничения дальности передачи электроэнергии при соблюдении всех необходимых технических и экологических требований.

Так же применение УШРТ позволяет

- успешно решать технические аспекты дальнейшего функционирования объединенной электроэнергетической системы стран СНГ и осуществления соединений на параллельную работу энергосистем регионов, в частности, решить проблему объединения на параллельную работу ОЭС Сибири и ОЭС Востока. Для решения данной задачи потребуются УШРТ 220, 500 кВ общей установленной мощностью не менее 7000 МВАр;
- повысить предел передаваемой мощности по условию статической устойчивости практически до значения ее натуральной мощности, что особенно актуально для протяженных линий. С использованием УШР стало возможным создание транснациональных электропередач переменного тока протяженностью до 2000–2500 км;
- управлять режимами работы сетей таким образом, чтобы снизить потери, повысить пропускную способность линий электропередачи. За счет этого повышается надежность работы системы, значительно экономится электроэнергия при ее передаче.

Список литературы

1. Г.Н.Александров, В.П.Лунин. Управляемые реакторы // Издание центра подготовки кадров энергетики. 2005.
2. Скидан А.А., Смирнов В.В., Ивченко О.Р., Смирнов И.К. Применение управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора в гибких электрических системах // Энергетические установки и технологии. 2022. Т8 № 2. С. 29-34.
3. Кондратенко Д.В., Долгополов А.Г., Шibaева Т.А., Виштибеев А.В. Статический компенсатор реактивной мощности на базе УШР как необходимое средство повышения энергоэффективности в электроэнергетике // ЭЛЕКТРО. 2010.
4. Долгополов А.Г., Соколов С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий // Новости Электротехники. 2012. № 3 (75).
5. C. BENGTTSSON, Z. GAJIC, M. KHORAMI. Dynamic Compensation of Reactive Power by Variable Shunt Reactors: Control Strategies and Algorithms. Paper C1-303, CIGRE 2012.

References

1. G.N.Alexandrov, V.P.Lunin. *Upravlyayemye reaktory* [Publication of the Energy Training Center] ELECTRO Publ., 2005.
2. Skidan A.A., Smirnov V.V., Ivchenko O.R., Smirnov I.K. Application of a magnetization-controlled shunt reactor in flexible electrical systems // Power installations and technologies. 2022. T8 No. 2. pp. 29-34.
3. Kondratenko D.V., Dolgoplov A.G., Shibaeva

- T.A., Vishtibeev A.V. *Sticheskiy kompensator reaktivnoy moshchno-sti na baze USHR kak neobkhodimoye sredstvo po-vysheniya energoeffektivnosti v elektroener-getike* [Static reactive power compensator based on CSR as a necessary tool for improving energy efficiency in the electric power industry]. ELECTRO Publ., 2010.
4. Dolgoplov A.G., Sokolov S.E. *Upravlyayemye reaktory. Obzor tekhnologiy* [Controlled reactors. Technology Overview]. News of Electrical Engineering. Publ., 2012, 75p.
 5. C. BENGTTSSON, Z. GAJIC, M. KHORAMI. Dynamic Compensation of Reactive Power by Variable Shunt Reactors: Control Strategies and Algorithms, CIGRE 2012, Paper C1-303

УДК 53.082.7

Разработка устройства контроля остаточной емкости аккумуляторной батареи

И.Б. Широков¹, С.Д. Кабайда², Е.И. Широкова³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия¹shirokov@ieee.org, ²serdjao.k@mail.ru, ³shirokova@ieee.org

Статья поступила 09.06.2022 г.; после доработки 13.09.2022 г.

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме контроля остаточной емкости аккумуляторных батарей и химических источников тока (ХИТ). Проведен сравнительный анализ существующих приборов и методов контроля остаточной емкости. Определено, что недостатки существующих методов не позволяют либо организовать прецизионный контроль остаточной емкости химического источника тока, либо являются недостаточно точными, либо слишком дорогими. Предложен новый метод определения остаточной емкости аккумуляторной батареи, основанный на принципе распределения зарядов между емкостями. Информацию об остаточной емкости аккумулятора получаем путем разницы зарядов между параллельно подключенным конденсатором к аккумулятору и собственно, самим аккумулятором. Данный метод стал возможен благодаря появлению операционных усилителей с малым напряжением дрейфа, что способствует улавливанию столь малой разницы зарядов. Приведена блок-схема устройства для реализации метода и рассмотрены теоретические возможности его работы.

Ключевые слова: химический источник тока, распределение заряда, контроль емкости, емкость, параллельное подключение.

Development of a device for monitoring the residual capacity of an accumulator battery

I.B. Shirokov¹, S.D. Kabaida², E.I. Shirokova³

Sevastopol State University, Universitetskaya st., 33, Sevastopol, 299053, Russia.

¹shirokov@ieee.org, ²serdjao.k@mail.ru, ³shirokova@ieee.org

Received 09.06.2022 y.; received in final form 13.09.2022 y.

Annotation

The article is devoted to the actual problem of monitoring the residual capacity of batteries and chemical current sources (HIT). A comparative analysis of existing devices and methods for monitoring the residual capacity is carried out. It is determined that the shortcomings of the existing methods do not allow either to organize a precision control of the residual capacity of a chemical current source, or are insufficiently accurate, or too expensive. A new method for determining the residual capacity of a battery is proposed, based on the principle of charge distribution between containers. Information about the remaining capacity of the battery is obtained by the difference of charges between the capacitor connected in parallel to the accumulator and the battery itself. This method was made possible by the emergence of operational amplifiers with low drift voltage, which contributes to the capture of such a small charge difference. A block diagram of a device for implementing the method is given and the theoretical possibilities of its operation are considered.

Keywords: chemical current source, charge distribution, capacity control, capacity, parallel connection.

Введение

Все мы сейчас живем в мире цифровых технологий и электротехники, и соответственно

очень важно иметь возможность осуществлять контроль остаточной емкости химических источников тока. К сожалению, на данный момент осу-

шествовать прецизионный контроль емкости довольно проблематично либо из-за высоких потерь энергии, либо из-за дороговизны предлагаемых устройств, а также возможно сложности в использовании конкретных типов оборудования либо методов.

Метод, предложенный в данной статье, решает все перечисленные выше проблемы, а также остается относительно недорогим по сравнению с имеющимися аналогами.

Методы и приборы определения остаточной емкости химических источников тока

На данный момент существует несколько основных методов определения остаточной емкости аккумуляторных батарей.

Первым из них является проверка химического источника тока нагрузочной вилкой (Рис.1).



Рис. 1. Нагрузочная вилка

Нагрузочная вилка - прибор для определения под нагрузкой электрического напряжения на клеммах аккумуляторной батареи; состоит из вольтметра, нагрузочного резистора в защитном кожухе и двух контактных ножек, присоединяемых к полюсам проверяемой батареи.

Как правило, один из контактов для подключения выполнен в виде провода большого сечения с зажимом типа крокодил, а второй в виде контактного штыря, закрепленного на корпусе вилки. Также на корпусе находится индикатор и средства управления, если вилка цифровая. При работе вилка коммутирует большие токи (50-

200А), вся мощность рассеивается на измерительных сопротивлениях — спиральях выделяется в виде большого количества тепла. Именно поэтому время использования вилки ограничено секундами, а корпус вилки оборудован ручкой из теплоизоляционного материала.

Для оценки состояния батареи аккумулятор необходимо зарядить и подождать несколько часов, чтобы выровнялась температура и плотность электролита. Рекомендуется продержат АКБ в электрическом покое 24 часа. После этого можно приступать к замерам.

Замеры осуществляются с помощью специальной таблицы либо сразу выводятся на дисплей в зависимости от модели устройства.

Недостатками данного метода являются большие потери емкости из-за того, что данный метод подразумевает собой деформацию самого аккумулятора, а также данное устройство имеет достаточно большую погрешность относительно предложенного нами метода.

Вторым же методом измерения является метод длительного разряда.

На сегодняшний день полная разрядка и зарядка — это единственный прямой и максимально достоверный способ определения емкости АКБ. Специализированные устройства контроля разряда/заряда батареи (УКРЗ) позволяют выполнить глубокую разрядку и последующую полную зарядку батареи с постоянным контролем емкости. Однако эта процедура занимает очень много времени: 15-17-20-24 часа, иногда и более суток, в зависимости от емкости и текущего состояния батареи. Хотя метод дает наиболее точные результаты, из-за временных затрат его применение ограничено.

Третьим методом измерения является измерение при помощи тестеров Кулон. (Рис.2).

Принципиальным развитием идеи нагрузочной вилки можно считать семейство цифровых приборов-тестеров Кулон (Кулон-12/6f, Кулон-12m, Кулон-12n и другие) для проверки состояния свинцовых кислотных аккумуляторов, а также другие подобные устройства.

Они позволяют проводить быстрые замеры напряжения, приближенно определять емкость АКБ без контрольного разряда и сохранять в памяти несколько сотен, а иногда и тысяч измерений.

Приборы Кулон питаются от аккумулятора, на котором проводятся измерения. Входящие в комплект провода с разъемами «крокодил» имеют части, изолированные друг от друга, что обеспечивает четырехзажимное подключение к аккумулятору и устраняет влияние на показания

прибора сопротивления в точках подключения зажимов. По заявлению разработчика, прибор анализирует отклик аккумулятора на тестовый сигнал специальной формы, при этом измеряемый параметр примерно пропорционален площади активной поверхности пластин аккумулятора и, таким образом, характеризует его емкость. Фактически, точность показаний зависит от достоверности методики, разработанной производителем.



Рис. 2. Прибор Кулон

Емкость аккумулятора – электрический заряд, отдаваемый полностью заряженным аккумулятором – измеряется в ампер-часах и представляет собой произведение тока разряда на время. Для точного определения емкости необходимо произвести разряд батареи (процесс длительный, многочасовой), постоянно фиксируя величину заряда, отдаваемого батареей. При этом относительная емкость АКБ в зависимости от времени изменяется нелинейно. Например, для аккумуляторной батареи типа LCL-12V33AP относительная емкость меняется со временем следующим образом:

Время разряда, часы.	Относительная емкость, %.
0,1	37
1,3	48
1,7	53
1,9	76
4,2	84
9,2	92
20	100

Прибор Кулон при помощи быстрого измерения ориентировочно определяет емкость полностью заряженного аккумулятора. Он не предназначен для оценки степени заряженности АКБ,

все измерения необходимо проводить на полностью заряженной батарее. Устройство кратковременно подает тестовый сигнал, регистрирует отклик от батареи и через несколько секунд выдает ориентировочную емкость АКБ в ампер-часах. Одновременно на экран выводится измеренное напряжение. Полученные значения можно сохранять в памяти прибора.

Производитель подчеркивает, что устройство не является прецизионным измерителем, но позволяет оценочно определять емкость свинцовой кислотной батареи, особенно если пользователь самостоятельно откалибровал прибор при помощи аккумулятора такого же типа, что и тестируемый, но с известной емкостью. Процедура, калибровки подробно изложена в инструкции к прибору.

Предварительные выводы

Нагрузочная вилка обладает следующими преимуществами: портативность, быстрое проведение измерений. В то же время ей присущи недостатки: по заявлению разработчика не является прецизионным измерителем, а также нагрузочные вилки старого образца могут портить целостность электролита.

Другой метод, именуемый методом длительного разряда, имеет преимущество, заключающееся в достоверности способа измерения емкости. В то же время ему присущ недостаток в виде очень долгой процедуры.

Альтернативный подход предполагает использование прибора «Кулон», который обладает портативностью, быстротой измерения. Специализированные модели позволяют сохранять результаты и переносить их на компьютер для подготовки отчетов. Вместе с тем, часть параметров АКБ определяется по косвенным методикам, точность измерений является оценочной.

Новый метод определения остаточной емкости аккумуляторной батареи

Новый метод определения остаточной емкости химического источника тока (ХИТ) или аккумуляторной батареи основан на законе сохранения заряда, который применяется при подключении к химическому источнику тока некоторого конденсатора известной емкости.

Структурная схема устройства показана на Рис.3.

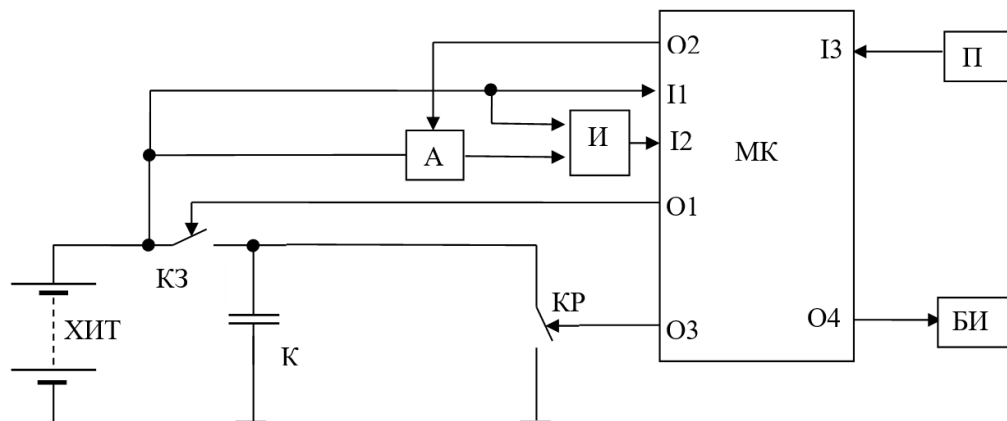


Рис. 3. Структурная схема разработанного устройства

При включении данного устройства первоначально напряжение на аккумуляторе запоминается аналоговым запоминающим устройством (А). Процесс запоминания текущего значения напряжения инициируется запускающим импульсом, поступающим с выхода О2 микроконтроллера (МК).

После этого с выхода О1 микроконтроллера подается сигнал на ключ замыкания (КЗ) и к аккумулятору подключается параллельно конденсатор (К) известной емкости. Поскольку общий заряд аккумулятора в отдельности и заряд аккумулятора плюс конденсатора сохраняется, то результирующее напряжение на клеммах аккумулятора плюс конденсатор несколько падает.

Это новое значение напряжение подается на разностный инструментальный усилитель (И), на другой вход которого подается напряжение с выхода аналогового запоминающего устройства.

Разность этих напряжений, которая реально может быть очень мала и не превышать десятков или сотен микровольт, усиливается разностным инструментальным усилителем до величины нескольких вольт и подается на вход аналого-цифрового преобразователя I2 микроконтроллера.

Отдельно напряжение с аккумулятора также подается на вход I1 микроконтроллера.

Микроконтроллер по заданному алгоритму, принимая во внимание известную емкость подключаемого конденсатора, высчитывает емкость аккумулятора (ХИТ) и выводит полученные результаты на индикатор (БИ).

После завершения процедуры измерений микроконтроллер с выхода О1 подает сигнал размыкания на ключ заряда и с выхода О3 подает

сигнал замыкания на ключ разряда (КР). Таким образом, происходит разряд параллельно подключенного конденсатора и устройство приводится в начальное положение, готовое к новым измерениям.

Математическая модель и параметры измерения остаточной емкости

Известна формула, связывающая емкость конденсатора C с его зарядом Q и напряжением на его обкладках U

$$Q = CU. \quad (1)$$

Если принять заряд ХИТ в ампер-часах или в кулонах за искомую величину его заряда Q_{UT} , то сам ХИТ (ССС) можно охарактеризовать некоторым эквивалентным конденсатором емкостью C_{CCS} , напряжение на обкладках которого будет равно:

$$U_{CCS} = Q_{UT} / C_{CCS}. \quad (2)$$

Это напряжение и запоминают в аналоговом запоминающем устройстве (А) под действием управляющего сигнала, поступающего с выхода О2 микроконтроллера МК.

Выходное напряжение аналогового запоминающего устройства (А) подают на второй вход разностного инструментального усилителя (И).

После этого микроконтроллером (МК) формируют сигнал замыкания электронного ключа (КЗ), и конденсатор известной емкости (К) за некоторое время переходного процесса полностью заряжается от ХИТ. При этом напряжение на соединенных вместе ХИТ и конденсатора дости-

гает некоторого значения, которое будет уже несколько меньше, чем исходное значение ЭДС ХИТ. Надо понимать при этом, что заряд как собственно отдельного ХИТ, так и ХИТ с подключенным конденсатором не изменяется.

При этом суммарную емкость пары аккумулятор плюс конденсатор можно охарактеризовать как

$$C_{\Sigma} = C_{CCS} + C_T. \quad (3)$$

Тогда напряжение на этой паре будет равно

$$U_{CCS+C} = Q_{UT} / (C_{CCS} + C_T). \quad (4)$$

Это напряжение подают на первый вход разностного инструментального усилителя (И), на выходе которого формируют напряжение, пропорциональное разности напряжений U_{CCS} и U_{CCS+C} . Очевидно, что второе напряжение всегда будет несколько меньше, чем первое.

Поскольку заряд сохраняется как отдельного ХИТ, так и ХИТ плюс конденсатор, то можно составить следующее равенство

$$U_{CCS} C_{CCS} = U_{CCS+C} (C_{CCS} + C_T). \quad (5)$$

Откуда можно вычислить эквивалентную емкость химического источника тока, которую определяют следующим выражением

$$C_{CCS} = C_T \cdot \frac{U_{CCS+C}}{U_{CCS} - U_{CCS+C}}. \quad (6)$$

Тогда эквивалентный заряд химического источника тока можно определить как

$$Q_{UT} = C_{CCS} U_{CCS} = C_T \cdot \frac{U_{CCS+C} \cdot U_{CCS}}{U_{CCS} - U_{CCS+C}}. \quad (7)$$

В числителе выражения (7) присутствуют два значения напряжений U_{CCS+C} и U_{CCS} . Надо понимать, что нет нужды контролировать оба эти значения напряжений. Они реально отличаются друг от друга на достаточно малую величину, которой можно в этом случае пренебречь и переписать выражение (8) в следующем виде

$$Q_{UT} = C_T \cdot \frac{U_{CCS}^2}{U_{CCS} - U_{CCS+C}}. \quad (8)$$

Таким образом, вычисленное микроконтроллером (МК) значение заряда ХИТ Q_{UT} , а также значение его эквивалентной емкости C_{CCS} выводят на блок индикации (БИ).

После этого микроконтроллером (МК) формируют сигнал управления электронным ключом разряда (КР), производя тем самым его отключение, в результате чего происходит разряд

конденсатора (К) и система готова к последующим измерениям.

Заключение

В рамках статьи проведен сравнительный анализ существующих методов определения остаточной емкости аккумуляторных батарей, с разработанным нами методом.

Выявлены такие недостатки используемых методик: длительность измерений, энергетические потери, точность измерений, а также необходимость особых навыков и знаний для проведения измерений. Перечисленные недостатки не позволяют организовать достаточно быстрый и высокоточный контроль остаточной емкости аккумуляторных батарей.

В качестве решения проблемы предложен новый метод, основанный на распределении зарядов при параллельном подключении конденсатора к аккумулятору.

Метод основан на определении разницы напряжений отдельного аккумулятора и аккумулятора с параллельно подключенным к нему конденсатором. Эта разница напряжений усиливается с помощью инструментального усилителя, построенного на операционном усилителе, имеющим предельно низкое напряжение смещения нуля и его дрейф.

Приведена структурная схема устройства для реализации разработанного метода и рассмотрены теоретические возможности его работы.

Также возможна реализация метода в виде системы мониторинга для этого нужно будет подключить модуль отправки пакетов данных, а также прописать в коде на включение устройства в определенное время. Системный подход позволит гораздо удобнее контролировать остаточную емкость батарей в устройствах на предприятиях.

Представлена математическая модель вычисления остаточной емкости через параллельное подключение конденсатора к аккумулятору. Описанная модель учитывает различные погрешности, в виде температуры окружающей среды, балансных резисторов.

Разработанный метод контроля остаточной емкости может использоваться везде, где присутствуют химические источники тока

Список литературы

1. «Большой политехнический энциклопедический

словарь / Ред. А. Ю Ишлинский. — 2004»

References

1. «Large Polytechnic Encyclopedic Dictionary / Ed. A. Ishlinskiy. – 2004»

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

УДК 62-503.55

Программно-аппаратный комплекс для выращивания растений в домашних условиях методом гидропоники¹Т.А. Верещагин, ²А.А. Ходаковский, ³А.Е. Скрыпник, ⁴И.Б. Широков

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,

г. Севастополь, 299053, Россия, ¹temurvereshagin@yandex.ru, ²alexanderkhodakovkiy@gmail.com, ,³skrypnika18@gmail.com, ⁴shirokov@ieee.org

Статья поступила _____; после доработки _____

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме ухода за растениями в домашних условиях. Проведён сравнительный анализ существующих аналогов как с использованием классического метода, выращивания растений в грунте, так и метод выращивания растений в водных растворах. Определено, что существующие методы требуют затрат большого количества времени на обслуживание, либо не подходят для размещения в домашних условиях. Был разработан метод выращивания растений на основе гидропоники, покрывающий недостатки существующих аналогов. Постройка цифровой копии устройства и растения в цифровой среде позволяет анализировать данные, подобрать и создать оптимальные условия для развития растения.

Ключевые слова: гидропоника, интернет вещей, микроконтроллер, удобрения, влажность, сетевой протокол

Software and hardware complex for growing plants at home by the method of hydroponics¹T.A. Vereshagin, ²A.A. Khodakovskiy, ³A.E. Skripnik, ⁴I.B. Shirokov

Department of "Electronics engineering", Sevastopol state university, Sevastopol, 299053, Russian Federation,

¹temurvereshagin@yandex.ru, ²alexanderkhodakovkiy@gmail.com, , ³skrypnika18@gmail.com, ⁴shirokov@ieee.org

Received _____; received in final form _____

Abstract

The article is dedicated to the actual problem of caring for plants at home. A comparative analysis of existing analogues using the classical method of growing plants in the ground and the method of growing plants in aqueous solutions. It is determined that the existing methods require a lot of time for maintenance, or are not suitable for placement at home. A method of growing plants based on hydroponics has been developed, covering the disadvantages of existing analogues. Building a digital copy of the device and the plant in a digital environment allows you to analyze data, select and create optimal conditions for the development of the plant.

Keywords: hydroponic, Internet of Things, microcontroller, fertilizers, humidity, web protocol

Введение

Обычно, при выращивании растений в домашних условиях используется низкопроизводительный метод посадки растений в грунт [1]. Такой метод требует постоянного внимания к растению на протяжении всего их роста. Растение в

высокой степени подвержено заболеваниям и паразитам, от которых сложно избавиться, не повредив само растение, так как эти заболевания и паразиты с высокой долей вероятности остаются в почве, откуда их можно убрать только сильными химикатами. Также нужно точно следить за периодичностью добавления удобрений растения

и количеством питательной смеси, чтобы корни не получили химический ожог, а пересадка растения является процессом, несущим угрозу для всего растения.

Существует способ посадки некоторых растений в ёмкость с водой с питательной смесью [2], согласно которому растение получает необходимые питательные вещества и водного раствора. Однако, при таком методе, требуется частая замена воды для предотвращения образования плесени и загнивания корней. Но, при замене воды требуется замена и удобрений, что, при такой регулярности этого процесса, несёт в себе большой риск, в случае ошибки с количеством смеси. Также, при таком методе, корневая система растения часто оказывается неустойчивой из-за отсутствия опоры.

Эффективным методом с минимальными рисками для растения является метод гидропоники. Однако подавляющее большинство современных устройств на основе гидропоники созданы для использования в промышленности [3], что не позволяет использовать их в домашних условиях по причинам габаритов, неудобного управления и необходимости в ручном контроле параметров полива удобрения и состояния растения, а также непродуманной эстетической составляющей.

Существуют модели гидропоники, приспособленные к размещению в домашних условиях [4], но они также, как и промышленные гидропоники требуют полностью ручного удобрения, контроля параметрами полива, не имеют встроенного освещения, а контроль состояния растения осуществляется вручную, при помощи различных тестеров, требующих продолжительного времени для замеров.

Постановка задачи

На основе проведённого анализа было разработано устройство для домашнего выращивания растений, лишённое недостатков, имеющихся у существующих аналогов.

Для большего удобства пользователя и увеличения эффективности была разработана концепция настольного устройства основанного на принципе гидропоники. Принцип гидропоники основывается на выращивании растений без почвы, в таком случае они получают необходимые вещества из водного раствора.

Данный метод позволяет более эффективно насыщать корни воздушной смесью и не даёт им загнивать. Все необходимые вещества из удобрений усваиваются растением, ничего не оседает в

грунте. Существенно снижается вероятность появления паразитов, а в случае их появления от них будет проще избавиться, так как нет почвы, в которой они могут пережить воздействие методов лечения растения. Также метод использования лишен необходимости замены почвы.

Устройство, описанное в данной статье, благодаря отсутствию недостатков, перечисленных выше, может быть размещено на рабочем столе, подоконнике и любой подобной горизонтальной поверхности. Также для управления и помощи в обслуживании данной гидропонной системы предполагается использовать функциональное приложение, связанное с ней по сети интернет. Пользователь может из любой точки мира, где есть доступ к глобальной сети, управлять регулярностью и интенсивностью полива, подачи удобрений и освещения, а также получать данные с датчиков температуры, влажности воздуха, влажности корней, освещённости и углекислого газа. Также приложение позволит настроить ручную или выбрать из существующих шаблонов реакции системы на изменение параметров, получаемых с датчиков.

Подход к решению проблемы

При решении поставленной проблемы была использована парадигма Интернета вещей (Internet of things, IoT), которая предполагает не только подключение вещей к сети интернет, но и построение их цифровой копии. Это позволит контролировать рост растения, основываясь на данных собираемых с датчиков, используемых в устройстве, что в свою очередь сводит участие человека в выращивании растения до минимума.

Корни растений нуждаются не только в воде и минералах, растворённых в ней, но и в воздухе. Для большей эффективности подачи нужных веществ было принято решение использовать принцип периодического затопления, что в отличие от посадки растений в грунт позволяет не только следить за состоянием корневой системы, но и контролировать показатели, влияющие на рост растений.

Для реализации подключения к сети интернет и сбора данных с датчиков, а также для первичной обработки данных было предложено использование микроконтроллера, компании “Espressif Systems” модели “esp32”. Выбор данной модели обусловлен наличием у неё встроенного интерфейса Wi-Fi, что позволяет просто связываться с мобильным приложением в локальной сети и по сети Internet, а также достаточной про-

изводительностью вычислительного ядра и наличием всех необходимых шин передачи данных для общения с датчиками.

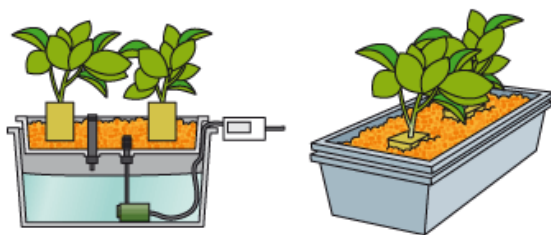


Рис. 1. Обобщённая структура гидропоники

Как интерфейс, через который можно отслеживать параметры устройства и окружающей среды, а также задавать настройки для описываемого устройства, в проекте используется мобильное приложение. Для написания приложения используется Фреймворк для языка C# под названием “Xamarin Forms” от компании Microsoft. Данный Фреймворк был выбран благодаря современному и поддерживаемому языку C#, а также простому переносу приложения для проноса на другие системы. В приложении реализовано добавление новых устройств, контроль за внешними и внутренними параметрами, настройка частоты полива и времени засветки, напоминание о смене воды с удобрением, что позволяет эффективно выращивать посаженую культуру.



Рис. 2. Интерфейс приложения с основными параметрами датчиков и расчетов.

Необходимо эффективно и быстро передавать данные в сети интернет, но распространённые в сети технологии, такие как http и https не подходят для использования в устройствах на основе микроконтроллеров из-за своей сложности и значительной нагрузке на вычислительное ядро.

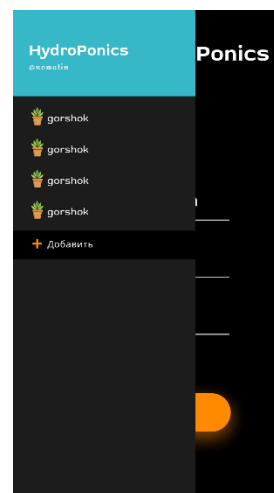


Рис. 3. Интерфейс приложения с окном добавления новых устройств.

Для использования предлагается использовать открытый протокол Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [5] который лишён данных минусов. Данный протокол основан на системе Издатель – Брокер(Сервер) – Подписчик, что позволяет построить эффективную структуру обменная данными между устройствами.



Рис. 4. Структура протокола MQTT

До подключения к сети Wi-Fi устройство не имеет связи с сетью интернет, следовательно, и к MQTT брокеру. В таких случаях устройство раздаст интернет и на время первичных настроек станет локальным MQTT брокером, со стабильным IP адресом в локальной сети. При отключении интернета или не возможности подключиться к сети Wi-Fi, произойдёт похожий процесс за исключением обязательной передачи настроек.

При построении цифровой копии устройства нужна информация, собираемая с датчиков. Датчики собирают данные о 3 значимых частях устройства:

1. Окружающая среда (Температура воздуха, влажность воздуха, количество углекислого газа)
2. Корневая система (Температура среды, влажность среды, Показатель кислотности среды)
3. Питательный раствор (Температура, Показатель кислотности).

На основе полученных данных строиться

цифровая копия устройства, которая позволяет не только качественно дозировать поступление питательных веществ, но и более точно прогнозировать время до замены питательного раствора, и

сигнализировать о не приемлемой среде для выращивания той или иной культуры.

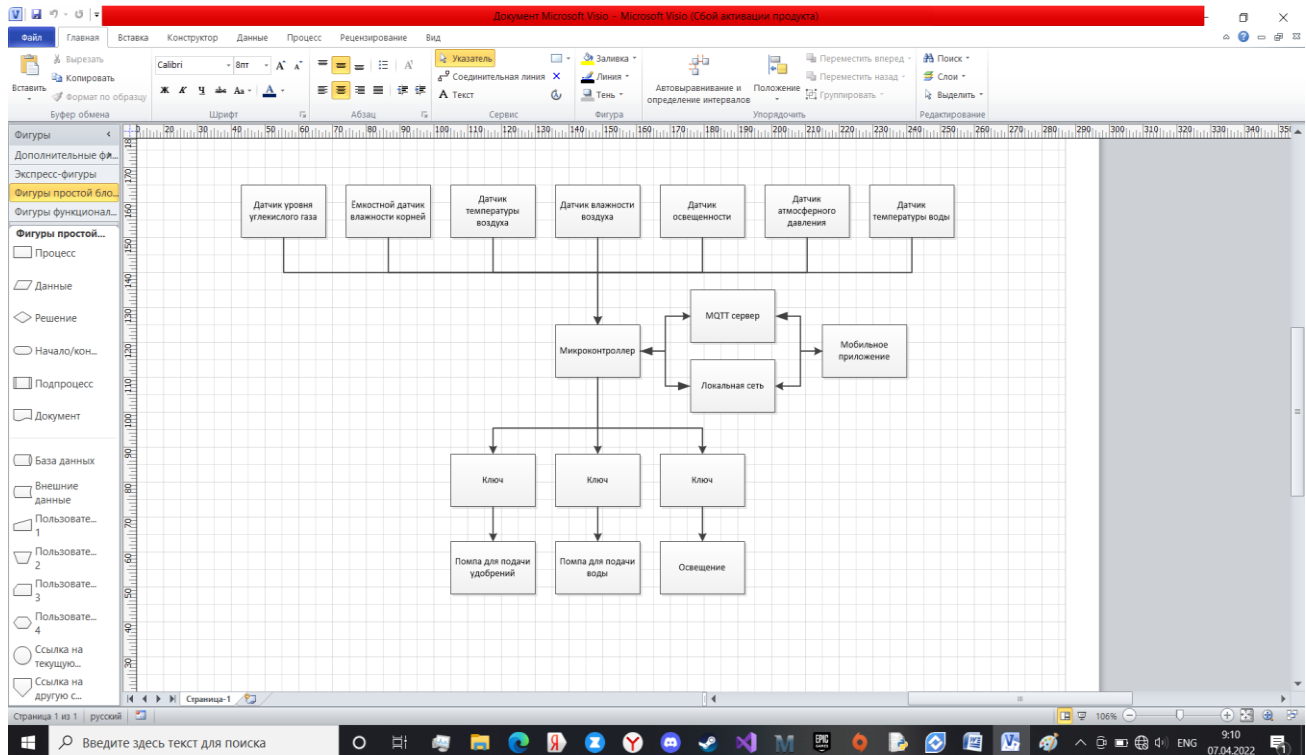


Рис. 5. Блок-схема устройства слоем эпоксидной смолы.

Конструкция

Из-за использования устройства в домашней среде, при проектировании корпуса устройства была поставлена не только задача максимальной эффективности роста культур, но и совокупности форм и размеров позволяющий ставить устройство на стол, подоконник и другие поверхности. Был разработана модель с 3 основными частями: Подпол с электроникой, центральная часть для хранения питательного раствора и основной горшок для роста культур.

Для построения прототипов устройства был использован 3д принтер послойном на послойном нанесении пластика, данный метод имеет множество преимуществ, таких как: простота прототипирования и точность изготовления, но имеется и существенный недостаток из-за метода построения модели между слоями образуются трещины, что сказывается на герметичности устройства, для решения данной проблемы предполагается покрывать внутренние стенки тонким

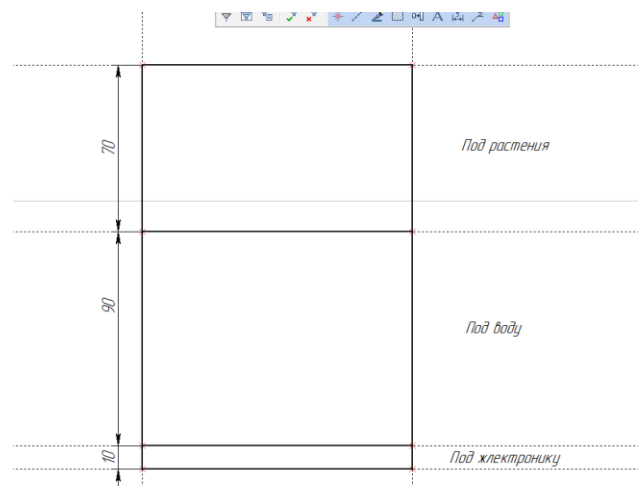


Рис. 6. Структура корпуса устройства.

Заключение

В ходе проведения разработок, представленных в данной статье, была разработана цифровая модель устройства, предназначенного для обеспечения жизнедеятельности растений в условиях комнатной среды. Полученное в результате

устройство показало существенные преимущества в автономности и качестве роста растения в сравнении с существующими аналогами. Использование принципов гидропоники позволило эффективнее и более контролируемо доставлять до растения необходимые питательные вещества. Добавление в схему микроконтроллера позволило освободить пользователя от необходимости контроля и регулярного ухода за растением. С момента посадки растения и до сбора урожая от пользователя требуется только один раз в 2-3 недели менять воду в устройстве и 2-4 раза в год подливать удобрения в специальный резервуар. Микроконтроллер круглосуточно собирает и анализирует данные с различных датчиков, автоматически, исходя из настроек, рассчитывает параметры полива, удобрения и освещения. Также, использование Wi-Fi модуля позволило существенно повысить комфорт использования устройства, позволяя настраивать его и получать данные о растении через мобильное приложение в любой точке мира, где есть доступ в интернет.

Список литературы

1. Быховец, С.Л. Дневник сезонного ухода за комнатными растениями и цветами / С.Л. Быховец, В.М. Гончарук. - М.: Мн: Харвест, 2004. - 384 с.
2. <https://www.treeland.ru/article/home/plant/Plants-in-bottles-how-to-grow-plants-in-water>
3. [https://podokonnik.temadnya.com/946897484705695873/komnatnye-rasteniya-rastuschie-v-vode/..](https://podokonnik.temadnya.com/946897484705695873/komnatnye-rasteniya-rastuschie-v-vode/)
4. <https://sevastopol.regmarkets.ru/product/yee062f335cf015bf1779ffc384fe4bd2/>
5. <https://habr.com/ru/post/463669/>
6. Алиев Э.А. Выращивание овощей в гидропонных теплицах. — 2-е изд. И перераб. — К. Урожай, 1985 — 160 с.

References

1. Bykhovets, S.L. Diary of seasonal care of indoor plants and flowers / S.L. Bykhovets, V.M. Goncharuk. - M.: Mn: Harvest, 2004. - 384 p.
2. <https://www.treeland.ru/article/home/plant/Plants-in-bottles-how-to-grow-plants-in-water>
3. [https://podokonnik.temadnya.com/946897484705695873/komnatnye-rasteniya-rastuschie-v-vode/..](https://podokonnik.temadnya.com/946897484705695873/komnatnye-rasteniya-rastuschie-v-vode/)
4. <https://sevastopol.regmarkets.ru/product/yee062f335cf015bf1779ffc384fe4bd2/>
5. <https://habr.com/ru/post/463669/>
6. Aliev E.A. Growing vegetables in hydroponic greenhouses. — 2nd ed. And reworked — To . Harvest, 1985 — 160

УДК 624.075

Принципы расчета элементов конструкций, работающих за пределами упругости

Корнеева Н.К.¹, Пичугова Л.Н.², Глушкова Е.В.³, Павлова И.А.⁴,
Худякова В.А.⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, korneeva_nk@mail.ru, , kebpf2015@mail.ru, , glusev@mail.ru,
pavlovaira2001@mail.ru, , lerakhudiakova96@gmail.com.

Статья поступила 24.06.2022 г.; после доработки 28.06.2022 г.

Аннотация

В работе рассмотрены отличительные особенности расчета и схематизация диаграммы растяжения, а также упруго - пластический изгиб бруса, работающего за пределами упругости.

Ключевые слова: диаграмма растяжения, упругие деформации, упруго - пластический изгиб бруса, гипотеза плоских сечений, изгибающий момент.

Principles of Calculation of Structural Elements Working beyond elasticity

Korneeva, N.K.¹, Pichugova, L.N.², Glushkova E.V.³, Pavlova I.A.⁴,
Khudyakova V.A.⁵.

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, korneeva_nk@mail.ru, ,
kebpf2015@mail.ru, , glusev@mail.ru, pavlovaira2001@mail.ru, , lerakhudiakova96@gmail.com

Received 24.06.2022 y.; received in final form 28.06.2022 y.

Abstract

The paper considers the distinctive features of calculation and schematization of the tensile diagram, as well as the elastic-plastic bending of the bar operating beyond elasticity.

Keywords: tensile diagram, elastic deformations, elastic-plastic bending of a beam, hypothesis of flat sections, bending moment.

Введение

Многообразие возникающих на практике задач связано с пластическими деформациями тел. К актуальным задачам относятся исследования некоторых технологических операций, таких, например, как навивка пружин или штамповка различных изделий.

При решении подобного рода задач закон Гука теряет свою силу, и прямая пропорциональность между напряжениями и деформациями заменяется некоторой более сложной зависимо-

стью, определяемой видом диаграммы растяжения на интересующем нас интервале нагрузок. И хотя пластические деформации существенно больше упругих, они по-прежнему малы по сравнению с единицей. Расчеты в области малых пластических деформаций часто встречаются в инженерной практике при исследовании прочности и жесткости элементов конструкций сложной формы, в небольших объемах которых не удастся избежать появления пластических деформаций при действии производственных нагрузок.

Постановка задачи

Основной задачей нашей работы является изучение наиболее важных принципов расчета элементов конструкций, работающих за пределами упругости, на основе приобретенных сведений из научных источников и математического анализа технических закономерностей.

Описание исследования

Отличительные особенности расчета и схематизация диаграммы растяжения

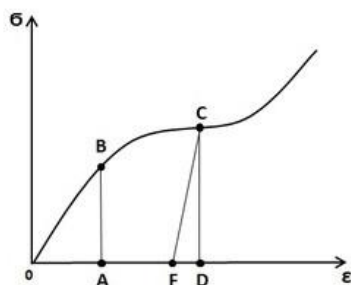


Рис. 1 Диаграмма растяжения.

Когда нагрузка достигает определенного значения, к упругим деформациям добавляются остаточные (пластические) деформации. Эти деформации не исчезают после снятия нагрузки. Для расчета конструкций, которые могут быть подвержены пластической деформации, используются так называемые теории упруго-пластической деформации. Если в обычных задачах деформации не превышают значения OA при расчетах с допуском на пластическую деформацию, то значение ϵ оказывается существенно большим, но меньшим по сравнению с единицей. Ввиду малости пластических деформаций

($\epsilon < 5\%$) принцип неизменности начальных размеров полностью применим - пластически деформированная система мало отличается от недеформированной. Принцип независимости сил в этом случае неприменим. Напряжения и деформации при нагружении и разгрузке не совпадают. Принято различать активную и пассивную деформацию образца. При активной деформации напряжение увеличивается, при пассивной - уменьшается.

Таким образом, сегмент диаграммы OBC соответствует активной деформации, а CF - пассивной деформации. Деформацию, измеренную сегментом OD , можно рассматривать как сумму чисто пластической, необратимой деформации

OF и упругой деформации FD , которая восстанавливается после снятия нагрузки. Таким образом, деформация образца не является ни чисто пластической, ни чисто упругой.

Для пластических деформаций невозможно использовать метод расчета по допустимым напряжениям. Для того чтобы ввести зависимость в расчетные формулы

$$\sigma = f(\epsilon)$$

диаграмма растяжения должна быть схематизирована.

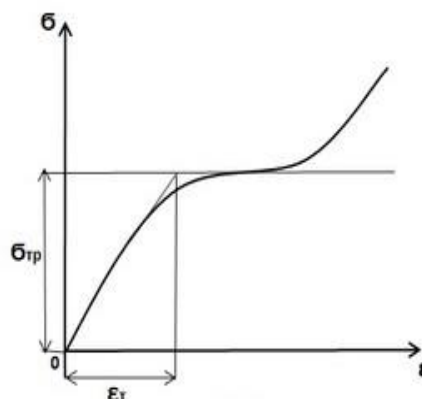


Рис. 2 Схематизированная диаграмма растяжения.

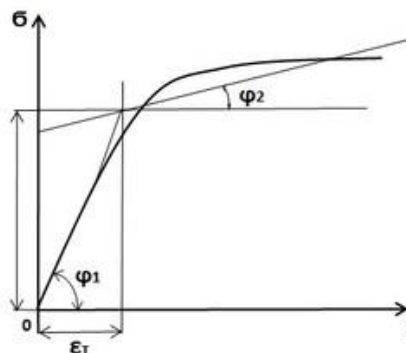


Рис. 3 Диаграмма идеальной пластичности.

При упругих деформациях на участке OA (рис.1.) диаграмма растяжения близка к прямой, и можно с весьма большой степенью точности предположить, что σ пропорционально ϵ . При достаточно больших удлинениях этот закон теряет свою силу точно так же, как теряет свою силу и закон Гука. Диаграмма, показанная на (рис. 2, рис. 3.), называется диаграммой идеальной пластичности.

Если диаграмма имеет площадку текучести, как, например, для малоуглеродистых сталей, то можно аппроксимировать диаграмму как состоящую из двух прямых линий (рис. 2). Также можно представить зависимость между σ и ϵ в

виде двух прямых линий для некоторых диаграмм, где нет площадки текучести (рис. 3). При $\varepsilon \leq \varepsilon_T$ имеем $\sigma = E\varepsilon$.

При $\varepsilon \geq \varepsilon_T$ имеем

$$\sigma - \sigma_T = D(\varepsilon - \varepsilon_T),$$

где E и D – угловые коэффициенты прямых.

Значение D обычно значительно меньше E . Такие диаграммы характерны для большинства легированных сталей.

В некоторых случаях упругой деформацией можно пренебречь по сравнению с пластической деформацией. Тогда диаграмма растяжения схематизируется линиями OA и AB (рис. 4). До напряжений, не превышающих предел текучести, тело считается жестким, при более высоких напряжениях – пластичным. Материал, наделенный такими свойствами, называется жестко – пластическими.

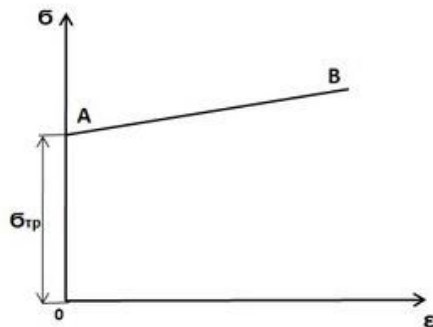


Рис. 4

Функция, отображающая диаграмму растяжения, выбирается в зависимости от формы кривой. Во многих случаях вместо выбранной аналитической зависимости

$$\sigma = f(\varepsilon)$$

Пользуются графическими, графоаналитическими или численными методами решения.

Упруго – пластический изгиб бруса

Рассмотрим случай чистого изгиба прямого бруса при наличии пластических деформаций.

Для простоты будем считать, что поперечное сечение имеет две оси симметрии и что диаграммы растяжения и сжатия материала одинаковы.

Мы не будем устанавливать аналитическую зависимость между напряжением τ и деформацией ε , и предположим, что диаграмма растяжения дана графически (рис. 1).

Пусть для бруса справедлива гипотеза плоских сечений. Тогда получим:

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho} \quad (1),$$

где $\frac{1}{\rho}$ – кривизна упругой линии изогнутого бруса, y – расстояние от нейтральной линии.

Изгибающий момент в сечениях бруса будет:

$$M = \int \sigma y b dy \quad (2)$$

Задаемся кривизной $\frac{1}{\rho}$ и по формуле (1) находим максимальное удлинение

$$\varepsilon_{max} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{\rho}.$$

Рядом с чертежом поперечного сечения изображаем диаграмму растяжения (рис. 5) и отмечаем на ней точку A , соответствующую найденному значению ε_{max} . Строим эпюру напряжений. Для некоторого значения y удлинения ε находим напряжение σ .

Площадь полученной кривой дает, согласно выражению (2) значение изгибающего момента.

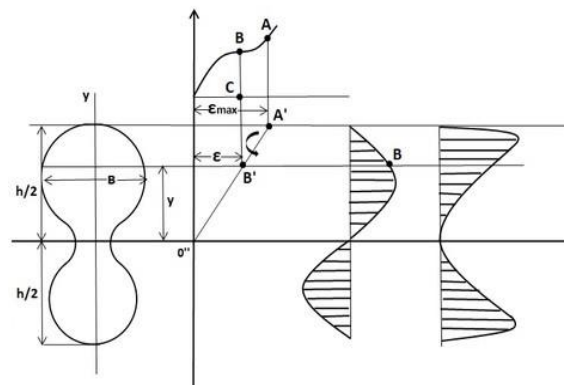


Рис. 5

Таким образом, в результате этих операций имеется одна точка зависимости $\frac{1}{\rho}$ от момента M .

При построении кривой (рис. 6.), кривизна балки определяется заданным моментом. Затем строится эпюра напряжений для кривизны балки $\frac{1}{\rho}$, соответствующей заданному моменту M .

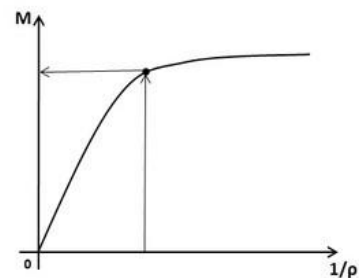


Рис. 6

В этом случае разгружающие напряжения

изменяются в сечении по линейному закону

$$\sigma = \frac{M_y}{Y_x}$$

Наложив эту линейную эпюру на эпюру рабочих напряжений (рис. 8), мы получим эпюру остаточных напряжений. Результирующие напряжения будут самоуравновешенными.

Если ширина сечения является постоянной величиной, то есть балка имеет прямоугольное сечение, то определение напряжений выглядит гораздо проще, тогда диаграмма растяжения имеет участок удельной пластичности.

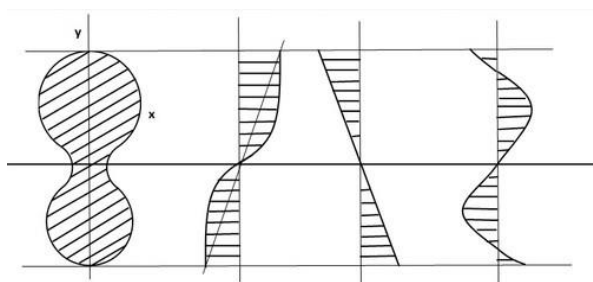


Рис. 7 Эпюра остаточных напряжений

Имеем прямоугольное сечение со сторонами b и h и диаграмму растяжения, показанную на (рис. 8). Поперечное сечение балки разделено на две зоны: упругую и пластическую.

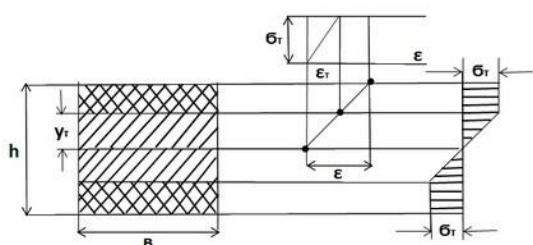


Рис. 8 Диаграмма растяжения, две зоны - упругая и пластическая

Значение Y_T определяет границу этих зон и находится из выражения (1).

$$Y_T = \varepsilon_T \rho \quad (3)$$

По мере увеличения момента и кривизны Y_T уменьшается. Зона упругости уменьшается. Изгибающий момент определяется выражением (2)

$$M = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma y dy$$

После интегрирования находим: имея в виду, что

$$Y_T = \varepsilon_T \rho = \frac{\sigma_T \rho}{E}$$

получаем

$$M = \frac{bh^2}{4} \sigma_T - \frac{1}{3} b \sigma_T^3 \frac{\rho^2}{E^2} \quad (4)$$

откуда:

$$\frac{1}{\rho} = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} b \sigma_T^3}{\frac{1}{4} b h^2 \sigma_T - M}} \quad (5)$$

Кривизна бруса возрастает и обращается в бесконечность с увеличением момента M

$$M = \frac{1}{4} b h^2 \sigma_T \quad (6)$$

В этом случае $\rho = 0$ и Y_T обращается в нуль.

Таким образом, несущая способность стержня исчерпана, и большая нагрузка не может быть им воспринята. Понятно, что в действительности кривизна стержня не может обратиться в бесконечность, и этот случай следует рассматривать как предельный. Применимость формулы (5) ограничена величиной момента M не только сверху, но и снизу. При малых значениях момента пластическая зона отсутствует, кривизна определяется по формулам, полученным в предположении линейной зависимости между σ и ε :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ} = \frac{12M}{Eh^3b}$$

Это соотношение будет правильным до тех пор, пока

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} \leq \sigma_T,$$

$$\text{т. е. } M \leq \frac{1}{6} b h^2 \sigma_T.$$

Заключение

В статье рассмотрены принципы расчета элементов конструкций, работающих за пределами упругости, произведены необходимые для исследования математические преобразования.

Выводы

1. При расчетах конструкций, в элементах которых могут быть допущены пластические деформации, используются теории упруго - пластических деформаций.

Функция, отображающая диаграмму растяжения, подбирается в зависимости от формы кривой.

2. При малых значениях момента пластическая зона отсутствует

Список литературы

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. 1999г., 592 с.
2. Рындин Н.И. Краткий курс теории упругости и

пластичности: Ленинградский университет, 1974г., 136 с.

3. Бессонов А.П. Энциклопедия по машиностроению, 1975г., 354 с.
4. Феменко В.Ф. Основы расчета элементов конструкций, работающих за пределами упругости, 2006г., 4 с.
5. Иванищева О.И., Семькина Т.Д., Щеглова Ю.Д., Расчет конструкций за пределами упругости, 2004г., 27с.
6. Илюшин А.А. Пластичность. Упруго-пластические деформации, 1948г., 376 с.
7. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. 1986г., 154 с.
8. Беляев А.Н., Щередекин В.В. Сопротивление материалов. 2013г., 491с.
9. Исаков Е.Г., Корольков А.О., Литвинов А.Н. Расчет предельных нагрузок и остаточных деформаций в элементах конструкций. 2018г., 1с.

References

1. Feodosiev V.I. Strength of materials. 1999, 592 p.
2. Ryndin N.I. A short course in the theory of elasticity and plasticity: Leningrad University, 1974, 136 p.
3. Bessonov A.P. Encyclopedia of mechanical engineering, 1975, 354 p.
4. Femenko V.F. Fundamentals of calculation of structural elements operating beyond the limits of elasticity, 2006, 4 p.
5. Ivanishcheva O.I., Semykina T.D., Shcheglova Yu.D., Calculation of structures beyond the limits of elasticity, 2004, 27p.
6. Ilyushin A.A. Plastic. Elastic-plastic deformations, 1948, 376 p.
7. Zaslavsky B.V. A short course in the strength of materials. 1986, 154 p.
8. Belyaev A.N., Shcheredekin V.V. Strength of materials. 2013, 491s.
9. Isakov E.G., Korolkov A.O., Litvinov A.N. Calculation of ultimate loads and residual deformations in structural elements. 2018, 1s.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- экологическая безопасность;
- химические технологии атомных станций;
- информационные технологии в энергетике;
- моделирование физических процессов;
- физика в ядерной энергетике;
- автоматизация процессов контроля и управления;
- судовые энергетические установки;
- холодильные установки;
- гидравлические энергоустановки;
- компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовок статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
- компакт-диск с текстовым файлом.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

Статья должна содержать:

- шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
- место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
- аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
- ключевые слова;
- индекс UDC (УДК для англ. блока);
- заглавие (на английском языке);
- фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

- место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
- аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
- ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
- статья на языке оригинала;
- список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
- список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *.doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dpi.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск №3, Том 8 2022 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами

05.14.01 Энергетические системы и комплексы

05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование

05.14.08 Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

05.26.05. Ядерная и радиационная безопасность

Адрес редакции:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7.

Телефон редакции: 8(692) 710164

<https://old.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1272-njeut>

e-mail: nauchnyyzhurnal@mail.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

Главный редактор: Качур Светлана Александровна

Подписано к печати 28.09.2022. Заказ 31/22. Дата выхода в свет: 30.09.2022. Тираж 65 экз. Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 9.3.

Севастополь, 2022