

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 2 № 1

**Севастополь
2016**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Т. 2. - № 1. – 100 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», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Экологическая безопасность».

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:

Кирияченко В.А. (главный редактор), к.т.н., профессор;
Омельчук Ю.А. (заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Федорова С.А. (ответственный секретарь), к.пед.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Акимов А.М.*, д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Тимощенко А.И.*, д.т.н., профессор;
Карницкий А.Б., д.т.н., профессор; *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

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»

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Истомин В.И., Тверская С.Е., Хлебникова В.В.</i> Методика расчета показателей энергоэффективности экономических ходовых режимов судна «Салгир»	5
<i>Качур С.А.</i> Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей	12
<i>Кузнецова Н.И., Серова-Нашева Н.В.</i> Анализ и расчет структурной надежности и оборудования АСУ ТП АЭС	20
<i>Пухлий В.А., Журавлев А.А.</i> К расчету рабочих лопаток диагональных турбомашин	25
<i>Софийский И.Ю., Мирошниченко С.Т., Коваль В.А.</i> Математическая модель определения нормативных значений давления пара и температурного напора в конденсаторе К-12150	31
<i>Чуклин А.А., Чукина А.В.</i> Моделирование пространственно-неоднородного потока в верхней камере смешивания реактора ВВЭР-1000 с использованием одномерных кодов	36
Электротехнические комплексы и системы	43
<i>Колодяжный В.В.</i> Возможности современных автоматических выключателей	43
<i>Омельченко Н.В.</i> Адаптация метода ортогонализации к анализу эффективности функционирования энергосистем	50
<i>Пронина А.К., Майорова Ю.А.</i> Использование маховикового накопителя энергии для сглаживания колебаний активной мощности при резкопеременной нагрузке	55
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	62
<i>Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Чванова Д.А.</i> Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей	62
<i>Чебоксаров В.В.</i> Сравнительный анализ эффективности двух схем маятниковых преобразователей энергии волн	68
Экологическая безопасность	76
<i>Гавриш В.М., Баранов Г.А., Дербасова Н.М., Матюхина П.В.</i> Разработка экологически безопасной технологии переработки органических отходов	76
<i>Деулин Б.И.</i> Автоматизированный твердотельный лазерный сканер на красителях	83
<i>Лукина Л.И., Моисеев Д.В., Фролова М.А.</i> Радиоэкологический мониторинг радиационного состояния почв чернобыльской зоны отчуждения	88
<i>Пономаренко П.А., Фролова М.А., Кравченко Н.В.</i> Анализ радионуклидной активности и годовой эквивалентной дозы, создаваемой природными радионуклидами	93

CONTENTS

Heating and Nuclear Power Plants	5
<i>Istomin V.I., Tverskaya S.E., Hlebnikova V.V.</i> Method of calculating indicators of power efficiency of economic navigation modes of vessel "Salgir"	5
<i>Kachur S.A.</i> Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole	12
<i>Kuznetsova N.I., Serova-Nasheva N.V.</i> Analysis and Calculation of Structural Reliability and Equipment of an ACS for Technological Process of NPP	20
<i>Pukhly V.A., Zhuravlev A.A.</i> To calculation of working shovels of diagonal turbomachines	25
<i>Sofijsky I.J., Miroshnichenko S.T., Koval V.A.</i> Mathematical model determining of normative values steam pressure and temperature difference in condenser K-12150	31
<i>Chuklin A.A., Chuklina A.V.</i> Simulation of spatially inhomogeneous flow in the upper mixing chamber of WWER-1000b by means of one-dimensional codes	36
Electrotechnical Facilities and Systems	43
<i>Kolodiy V.V.</i> Capabilities of modern switchgear	43
<i>Omelchenko N.V.</i> Adaptation of orthogonalization method to analysis of functioning power systems effectiveness	50
<i>Pronina A.K., Mayorova J.A.</i> The use of the flywheel energy storage device for smoothing fluctuations of power with rapidly changing load	55
Alternative and Renewable Power Sources	62
<i>Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Kakyshina E.G.</i> The photovoltaic installation to ensure smooth operation of autonomous consumers	62
<i>Cheboxarov V.V.</i> Comparative effectiveness analysis of two schemes of pendulum-type wave energy converters	68
Environmental Safety	76
<i>Gavrish V.M., Baranov G.A., Derbasova N.M., Matyuhina P.V.</i> Development of environmental safe technology for organic waste processing	76
<i>Deulin B.I.</i> Automated solid-state dye laser scanner	83
<i>Lukina L.I., Moiseev D.V., Frolova M.A.</i> Radio-ecological monitoring of radiation state soils in chernobyl abandon area	88
<i>Ponomarenko P.A., Frolova M.A., Kravchenko N.V.</i> Analysis of radionuclide activity and annual equivalent dose produced by natural radionuclids	93

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 656.61

Методика расчета показателей энергоэффективности экономических ходовых режимов судна «Салгир»

В.И. Истомин¹, С.Е. Тверская², В.В. Хлебникова³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ^{1,3}v-istomina@mail.ru, ²svetterskaya@mail.ru

Статья поступила 03.03.2016 г.; после доработки 10.03.2016 г.

Аннотация

Разработана методика расчета показателей энергоэффективности экономических ходовых режимов судна, что позволит наиболее оптимально выбирать экономическую скорость судна, уменьшить расход топлива и существенно повысить эффективность эксплуатации судов. Усовершенствована формула для определения коэффициента эффективности использования экономических ходовых режимов, которая позволяет значительно расширить диапазон использования экономических режимов при частоте вращения от 50 % до 100 % номинальной частоты вращения и существенно повысить эффективность морских грузоперевозок. Все расчеты производились на основе статистических данных, полученных при эксплуатации транспортного рефрижератора «Салгир».

Ключевые слова: показатели энергоэффективности, экономия топлива, экономический ходовой режим, методика расчета, коэффициент эффективности.

Method of Calculating Indicators of Power Efficiency of Economic Navigation Modes of Vessel "Salgir"

V.I. Istomin¹, S.E. Tverskaya², V.V. Hlebnikova³

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, Sevastopol, 299053, Russia,
^{1,3}v-istomina@mail.ru, ²svetterskaya@mail.ru

Received 03.03.2016 y.; received in final form 10.03.2016 y.

Abstract

In article the method of calculating indicators of economic efficiency of economic navigation modes of the vessel is developed. That will allow to choose the most optimal economic speed of the vessel, to reduce fuel consumption and significantly improve the efficiency of vessel operations. Improved formula for determining the coefficient of efficiency of use of economic navigation modes, which can significantly extend the range of use of economic modes at speeds up 50% to 100% rated speed and significantly improve the efficiency of sea freight. All calculations were made on the basis of statistical data obtained from operation of the transport refrigerator "Salgir".

Keywords: indicators of energy efficiency, fuel savings, economic navigation mode, the method of calculation, the coefficient of efficiency.

Введение

В последние годы все больше внимания уделяется повышению энергоэффективности и

экологической безопасности эксплуатации судов путем уменьшения расхода топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу.

Поэтому новые резолюции Международной

морской организации (ИМО) уделяют особое внимание использованию экономических ходовых режимов, обязывают судовладельцев просчитывать данные режимы при эксплуатации судов.

В частности комитет по защите морской окружающей среды (МЕРС) при ИМО разработал резолюцию ИМО МЕРС.203(62), которая вступила в силу 1 января 2013 года [1].

Ее основные требования следующие:

1. Для каждого нового судна валовой вместимостью 400 и более должны быть определены Требуемый и Достигнутый Конструктивные коэффициенты энергоэффективности.

2. На каждом новом или существующем судне валовой вместимостью 400 и более должен иметься и выполняться Судовой план управления энергоэффективностью судна (ПУЭС).

В резолюции оговаривается, что ПУЭС должен быть разработан Судовладельцем, оператором или любой другой заинтересованной стороной как судовой специфический план в соответствии с пересмотренным «Руководством ИМО по разработке Плана управления энергоэффективностью судна, 2012», приведенном в Резолюции МЕРС.213(63) [2].

В вышеуказанном документе содержатся рекомендации относительно разработки ПУЭС (плана управления энергоэффективностью судна), которые следует корректировать в соответствии с характеристиками и потребностями отдельных компаний и судов. ПУЭС предназначен в качестве средства управления для оказания помощи компании в управлении текущими экологическими показателями ее судов, и в силу этого рекомендуется, чтобы компания разработала процедуры выполнения плана, который ограничивает любое административное бремя на судне до необходимого минимума [2,3].

Компании следует разрабатывать ПУЭС в качестве плана для конкретного судна. ПУЭС преследует целью повышение энергоэффективности судна посредством четырех мер: планирования, осуществления, мониторинга, а также самооценки и усовершенствования. Эти компоненты играют важную роль в постоянном цикле улучшения управления энергоэффективностью судна. В каждом шаге цикла некоторые элементы ПУЭС будут обязательно меняться, а другие оставаться без изменений.

В качестве рекомендаций относительно передовой практики топливосберегающей эксплуатации судов в данной резолюции рассматриваются:

- топливосберегающая эксплуатация (улучшенное планирование рейса, проводка наиболее выгодными путями с учетом погоды,

оптимизация скорости, оптимизированная мощность на валу);

- оптимизированное управление судном (оптимальный дифферент, оптимальный балласт, оптимальная работа гребного винта и набегающего на гребной винт потока, оптимальное использование рулевого устройства и системы управления курсом судна);
- уход за корпусом;
- утилизация отходящего тепла.

Однако в настоящее время недостаточно исследованы вопросы расчета экономических ходовых режимов при различных переходах в разных погодных условиях при разных запасах ходового времени, поэтому цель исследования актуальна.

В настоящее время все актуальнее становится задача экономии топлива при эксплуатации судов, вследствие повышения цен на горюче-смазочные материалы (ГСМ). За период с 1970 г. цены на ГСМ выросли более чем в 10 раз (в ценах 2015 года) и, как следствие из этого, значительно повысилась стоимость эксплуатации судов транспортного флота. Около 70 % стоимости эксплуатации судна составляет стоимость ГСМ.

Поэтому одним из эффективных средств снижения удельного расхода топлива является работа главного двигателя (ГД) на режимах экономичного хода, которые позволяют снизить расходы топлива за рейс на 10...15 %. Это обусловлено кубической зависимостью мощности двигателя от скорости судна, из которой следует, что даже незначительное снижение скорости позволяет получить ощутимый выигрыш в потребляемой двигателем мощности и, следовательно, в расходе топлива [4 - 7].

Постановка цели научного исследования

Целью научных исследований является совершенствование формулы для определения коэффициента эффективности использования экономических ходовых режимов и разработка методики расчета показателей энергоэффективности экономических ходовых режимов судна, которая позволит наиболее оптимально выбирать экономическую скорость судна, уменьшить расход топлива и существенно повысить эффективность эксплуатации судов.

Расчет винтовой характеристики и коэффициента эффективности использования экономичного хода.

Винтовая характеристика – зависимость эффективной мощности ГД от частоты вращения

при непосредственной работе двигателя на гребной винт (ГВ) фиксированного шага и неизменных внешних условиях плавания.

Между элементами пропульсивного комплекса (системы гребной винт – главный двигатель) существует кинематическое и динамическое взаимодействие.

Кинематическое взаимодействие (механическая связь) при прямой передаче проявляется в равенстве частот вращения вала главного двигателя и гребного винта или в том, что поступательная скорость последнего равна поступательной скорости движения корпуса судна. Физическая сущность этого взаимодействия не нарушается и при наличии редуктора.

Динамическая связь выражается в равенстве моментов на гребном винте и крутящего момента на валу двигателя M_e

$$M_e = \frac{M_B}{\eta_{вл}}, \quad (1)$$

где:

$$M_e = \frac{N_e}{6,28n} - \text{крутящий момент на валу двигателя, кН·м;}$$

$$M_B = k_2 \rho n^2 D^5 - \text{момент на гребном винте;}$$

$$\eta_{вл} \approx 0,98 - \text{КПД валопровода;}$$

k_2 – безразмерный коэффициент момента;

ρ – плотность забортной воды, кг/м³;

D – диаметр винта, м;

n – частота вращения гребного вала, с⁻¹.

Эти два вида связи обуславливают работу ГД по единым с ГВ характеристикам, т.е. на установившихся режимах работы судовой двигатель полностью подчиняется закону гребного винта и развивает только ту мощность, которую винт поглощает. В свою очередь, характеристики винта зависят от скорости и сопротивления среды движению судна, которое изменяется в зависимости от условий плавания или, другими словами, от эксплуатационных характеристик корпуса судна.

Мощность двигателя при работе на гребной винт равна (кВт)

$$N_e = \frac{6,28 k_2 \rho n^3 D^5 \cdot 10^{-3}}{\eta_{вл}}. \quad (2)$$

Практически точно можно считать, что в достаточно широком диапазоне частоты вращения между скоростью судна и частотой вращения гребного винта существует линейная зависимость. Следовательно, можно принять, что в

рабочем диапазоне частоты вращения относительная поступь гребного винта

$$\lambda_p = v/n \cdot D = \text{const.} \quad (3)$$

Поскольку коэффициент момента $k_2 = f(\lambda_p \cdot n/D)$, то можно также полагать, что $k_2 = \text{const.}$

Если учесть, что для конкретного судна ρ , D и $\eta_{вл}$ – величины постоянные, из выражения (2) получаем (для водоизмещающих судов)

$$N_e = C \cdot n^3, \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров винта, осадки, плотности воды и пр.

Таким образом, графически винтовая характеристика изображается кубической параболой. Каждому конкретному условию плавания соответствует своя винтовая характеристика гребного винта и двигателя [4-7].

Построим винтовую характеристику для судна транспортный рефрижератор «Салгир», основные технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики ТР «Салгир»

Тип и назначение судна		Транспортный рефрижератор
Район плавания		Неограниченный
Год постройки		1996г.
Завод-изготовитель		Shin Kurushima Dockyard Co. Ltd
Основные размерения	длина	Lmax = 100,7 м
	ширина	16,6 м
	высота борта до верхней палубы	9,9 м
Валовая вместимость, брутто		3767
Валовая вместимость, нетто		1568
Минимальный надводный борт		Летний 3,31 м
Дедвейт (при осадке по летнюю грузовую марку)		4241 т
Грузоподъемность		3008 т
Осадка в полном грузу (по летнюю грузовую марку)		Tcp = 6,62м
Осадка порожнем (доковая)		Tcp = 3,15м
Водоизмещение в полном грузу		6516 т
Водоизмещение порожнем		2636 т
Скорость хода	построечная	в грузу 15,8 уз
	эксплуатационная	в грузу 13,2 уз
Марка ГД		5L35MC
Мощность ГД		3088 кВт
Частота вращения ГД		210 об/мин
Удельный расход топлива ГД		0,176 кг/кВт
Тип топлива		IFO-380
Тип главной передачи		Прямая передача

На судне установлен главный двигатель 5L35MC, его характеристики представлены в таблице 1.

Исходя из формулы (4) найдем коэффициент пропорциональности

$$C = \frac{N_e}{n^3}. \quad (5)$$

Подставив значения эффективной мощности и частоты вращения гребного винта, получим значение C

$$C = 3088/210^3 = 0,333 \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Затем рассчитаем эффективную мощность ГД N_e при разной частоте вращения гребного винта (50, 60, 70, 80, 90, 100 % от номинального значения) при полной загрузке судна (рис. 1).

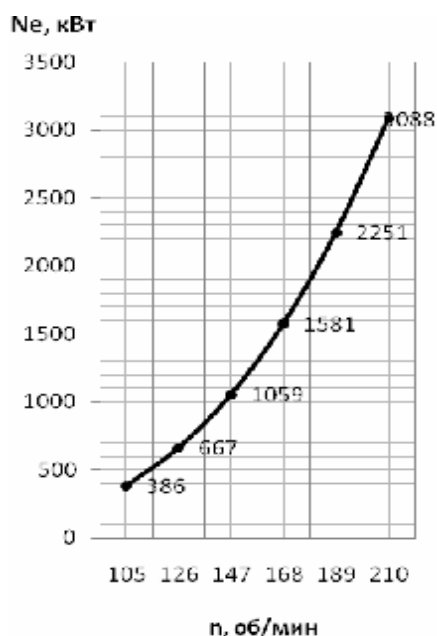


Рис. 1. Винтовая характеристика транспортного рефрижератора «Салгир»

Расчетные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость мощности ГД от частоты вращения

Частота вращения, n		Мощность, Ne
%	об/мин	кВт
50	105	386
60	126	667
70	147	1059
80	168	1581
90	189	2251
100	210	3088

Далее определим коэффициент эффективности использования экономичного хода K_3 для

каждого значения частоты вращения гребного винта n_i с учетом формулы (4). Зависимость от частоты вращения гребного винта определим по следующей формуле:

$$K_3 = \frac{N_n}{N_{ni}} - 1 = \frac{cn^3}{cn_i^3} - 1 = \left(\frac{n}{n_i} \right)^3 - 1, \quad (7)$$

где N_n — мощность ГД на режиме полного хода;

N_{ni} — мощность ГД на экономических ходовых режимах.

Ранее коэффициент эффективности использования экономичного хода определялся из выражения

$$K_3 = \frac{N_n}{N_{ni}} - 1,$$

при этом частота вращения винта изменялась лишь на 20 %.

Используя модернизированную формулу для определения коэффициента эффективности использования экономичного хода (7), мы получим кубическую зависимость коэффициента эффективности от частоты вращения, благодаря чему сможем расширить диапазон изменения частоты вращения гребного винта от 50 % до 100 %.

Расчетные значения коэффициента эффективности использования экономичного хода от частоты вращения гребного винта представлены в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость коэффициента K_3 от частоты вращения гребного винта

Частота вращения, n		Коэффициент эффективности, K_3
%	об/мин	-
50	105	7
60	126	3,63
70	147	1,91
80	168	0,95
90	189	0,37
100	210	0

Расчет основных экономических и энергетических показателей эксплуатации судна типа транспортный рефрижератор «Салгир» при использовании экономических ходовых режимов

Данные расчеты будут произведены при условии, что плотность воды средняя, старение оборудования не учитывается, так как предположительно судно находится в надлежащем состоянии, проведены все необходимые ремонтные ра-

боты, обрастание днища также не учитывается. При учете вышеизложенных критериев должны быть внесены определенные коэффициенты.

Рассчитаем основные экономические и энергетические показатели эксплуатации судна типа транспортный рефрижератор «Салгир» [4,6].

При изменении частоты вращения гребного винта от 50 до 100 % от номинальной:

G_3 – часовой расход топлива, кг/час;

Q_3 – расход топлива на милю, кг/миль;

$\mathcal{E}_m$ – экономия топлива на милю пути, кг/миль;

$\mathcal{E}_q$ – экономия топлива в час, кг/час.

Часовой расход топлива на номинальном режиме при частоте вращения 210 об/мин и мощности ГД равной 3088 кВт равен

$$G_n = N_e \cdot q_e = 3088 \cdot 0,176 = 544 \text{ кг/час.} \quad (8)$$

Рассчитаем часовой расход топлива на различных экономичных ходовых режимах при изменении частоты вращения гребного винта от 50 % до 100 % от номинального значения по следующей формуле.

$$G_{zi} = \frac{G_n}{1 + K_{zi}}, \text{ кг/час.} \quad (9)$$

Данные расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4. Зависимость часового расхода топлива от частоты вращения гребного винта

Частота вращения, n		Часовой расход топлива, G
%	об/мин	кг/час
50	105	68
60	126	117
70	147	187
80	168	279
90	189	397
100	210	544

Построим график зависимости часового расхода топлива от частоты вращения гребного винта (рис. 2).

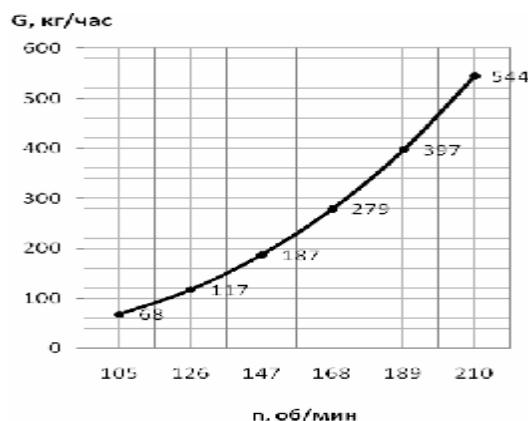


Рис. 2. Зависимость часового расхода топлива от частоты вращения гребного винта

Затем определим расход топлива на милю для различных экономичных ходовых режимов. Для этого рассчитаем расход топлива на милю пути при номинальной мощности и частоте вращения

$$Q_n = \frac{G_n}{u} = \frac{544}{15,8} = 34,43, \text{ кг/миль.} \quad (10)$$

Расход топлива на милю для различных экономичных ходовых режимов при изменении частоты вращения гребного винта от 50 % до 100 % от номинального значения определим по следующей формуле.

$$G_{zi} = \frac{G_n}{(1 + K_{zi})^3}, \text{ кг/миль.} \quad (11)$$

Данные расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5. Зависимость часового расхода топлива от частоты вращения гребного винта

Частота вращения, n		Расход топлива на милю, Q_3
%	об/мин	кг/миль
50	105	8,83
60	126	12,75
70	147	16,96
80	168	22,1
90	189	27,99
100	210	34,43

По расчетным данным построим график зависимости расхода топлива на милю от частоты вращения гребного винта (рис. 3).

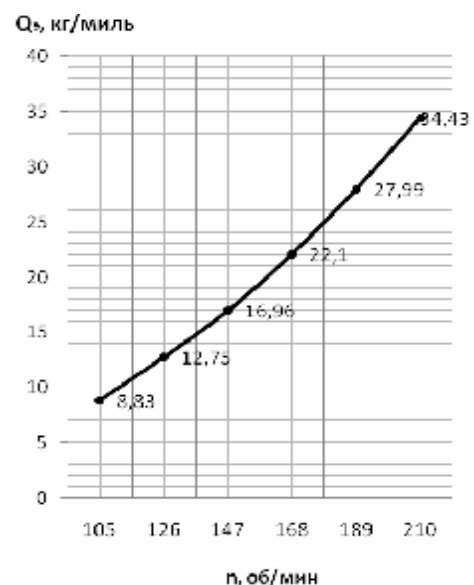


Рис. 3. Зависимость расхода топлива на милю от частоты вращения гребного винта

Затем рассчитаем экономию топлива на милю пути при использовании различных экономических ходовых режимов.

$$\Delta_{\text{ми}} = Q_{\text{эи}} \left(\left(1 + K_{\text{эи}} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \text{ кг/миль}, \quad (12)$$

Данные расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6. Зависимость часового расхода топлива от частоты вращения гребного винта

Частота вращения, n		Экономия топлива на милю, $\Delta_{\text{м}}$
%	об/мин	кг/миль
50	105	25,61
60	126	21,68
70	147	17,47
80	168	12,38
90	189	6,44
100	210	0

Построим график зависимости экономии топлива на милю пути от частоты вращения гребного винта (рис. 4).

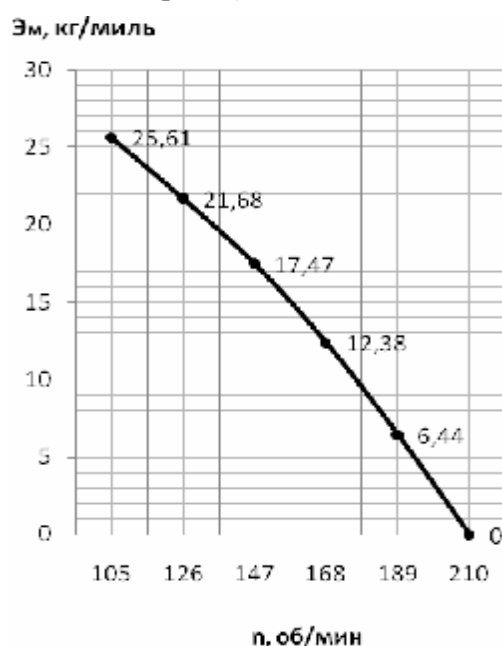


Рис. 4. Зависимость экономии топлива на милю от частоты вращения гребного винта

Все полученные расчетные зависимости являются теоретическими и не учитывают влияния обрастания корпуса судна, силу и направление ветра, волнения моря на показатели энергоэффективности, однако позволяют определить характер изменения показателей энергоэффективности судна при использовании экономических ходовых режимов и выбрать оптимальный режим движения судна.

Заключение

1. Усовершенствованная формула для определения коэффициента эффективности использования экономичного хода от частоты вращения позволяет значительно расширить диапазон использования экономичных ходов (от 100 % до 50 % от номинальной частоты вращения при изменении коэффициента эффективности от 0 до 7) и существенно повысить энергоэффективность морских грузоперевозок.

2. Проведенные исследования позволяют судовладельцам наиболее оптимально выбирать экономическую скорость движения судна, что позволит существенно повысить эффективность эксплуатации судов.

3. Основными составляющими экономического эффекта использования экономичных ходовых режимов судов являются:

- экономия топлива и смазочных материалов на единицу пути;
- сокращение расходов на докование и продление междоговального периода эксплуатации судна вследствие снижения интенсивности обрастания корпуса судна за счет увеличения ходовой составляющей в бюджете эксплуатационного времени при сокращении непроизводительных простоев в ожидании причала;
- увеличение коэффициента полезного действия гребных винтов, спроектированных на режим полного хода, при работе на сниженных скоростях судов;
- увеличение моторесурса главных двигателей за счет их работы при пониженных тепловых и динамических нагрузках;
- увеличение ресурса работы всех трущихся деталей главной энергетической установки пропорционально уменьшению частоты вращения;
- сокращение валютных расходов на приобретение топлива за счет исключения промежуточных бункеровок в неудобных портах вследствие снижения расхода топлива на единицу пути;
- увеличение чистой валютной выручки за счет возможности погрузки дополнительного груза при сокращении запасов топлива на рейс.

Список литературы

1. Правила энергоэффективности для судов, пересмотренное Приложение VI Конвенции

МАРПОЛ 73/78 (Резолюция МЕРС.203(62).— 2012.

2. Руководство ИМО по разработке Плана управления энергоэффективностью судна, Резолюция МЕРС.213(63). — 2012.
3. Руководство по добровольному использованию эксплуатационного показателя энергоэффективности (ЭПЭЭ), ИМО МЕРС.1/Circ. 684
4. Взаимодействие элементов судового пропульсивного комплекса: учеб. пособие. / Под общ. ред. В.П. Мануилова. — М.: ЦРИА «Морфлот», 1982. — 48 с.
5. Глотов Ю.Г. Эксплуатация судовых энергетических установок: учеб. пособие для мореходных училищ / Ю.Г. Глотов, В.А. Семченко, И.Г. Беляев. — М.: Транспорт, 1995 — 342 с.
6. Капитонов И.В. Режимы работы судовых дизелей на экономичном ходу: учеб. пособие / И.В. Капитонов. — М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. — 48с.
7. Проектирование пропульсивной установки судов с прямой передачей мощности на винт: учеб. пособие / В.П. Шостак, В.И. Гершаник, В.П. Кот, Н.С. Бондаренко. — Николаев: УДМТУ, 2003. — 500 с.

References

1. *Pravila energoeffektivnosti dlya sudov, peresmotrennoe* Prilogenie VI Konvencii MARPOL 73/78 [Rules energy efficiency for ships the revised

Annex VI of MARPOL 73/78] (Resolution МЕРС, 203(62), 2012.

2. Rukovodstvo IMO po razrabotke Plana upravleniya energoeffektivnost' u sudna [The IMO guidelines for the development of the Plan ship energy efficiency management], Resolution МЕРС.213(63), 2012.
3. Guidance on voluntary using of operational index energy efficiency (АРЕЕ), IMO МЕРС.1/Circ. 684.
4. *Vzaimodeistvie elementov sudovogo propul'sivnogo kompleksa* [The interacting elements of ship propulsion complex Training manual]. Under the Gen. edit V.P. Manuilova. Mosko, CRPA "Morflot", 1982, 48 p.
5. Glotov Yu.G., Semchenko V. A., Belyaev I. G. *Eksploatatsiya sudovyh energeticheskikh ystanovok* [Operation of ship power plants: Training manual for Maritime schools]. Moscow, Transport, 1995, 342 p.
6. Kapitonov I.V. *Regimu rabotu sudovuh dizeley na ekonomichnom hody* [Modes of operation of marine diesel engines on economical mode: Training manual]. Moscow: V/O "Moregenerally", 1985, 48 p.
7. *Proektirovanie propul'sivnoy ystanovki sudov s pryamoym heredacheiy moch'nosti na vint* [Engineering propulsion of vessels with direct power transmission on the screw]. V.P. Shostak, V.I. Gershanik, V.P. Cote, N. With. Bondarenko: Training manual. Nikolaev: UDMTU, 2003, 500 p.

УДК 621.039.56

Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей

С.А. Качур

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

Статья поступила 10.02.2016 г.; после доработки 12.02.2016 г.

Аннотация

Выдвинуты гипотезы, описывающие возможность создания монополя ядерного реактора в земных условиях на основе существующих естественных пространственно-временных монополей Земли и Солнца. Приведены условия взаимодействия естественных монополей, участвующих в создании монополя реактор. Определены параметры естественных монополей и монополя ядерного реактора.

Ключевые слова: ядерный реактор, мгновенная критичность, сингулярность, скрытая сингулярность, голая сингулярность, пространственно-временной монополь.

Space Curvature of Nuclear Reactor Near-by Prompt Criticality by Means of Natural Spatio-Temporal Monopole

S.A. Kachur

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 10.02.2016 y.; received in final form 12.02.2016 y.

Abstract

Hypothesis describing possibility of nuclear reactor monopole in earthly terms on the basis of existent natural spatio-temporal of Earth and Sun monopole is given. The interaction conditions of natural monopoles at creation of reactor monopole are given. The parameters of natural monopoles and nuclear reactor monopole are given.

Keywords: nuclear reactor, instantaneous criticism, singularities, hidden singularities, naked singularities, spatio-temporal monopole.

Введение

Интерес к идее перемещения в пространстве и времени огромен. Однако, проблемы, связанные с исследованием пространственно-временных эффектов, реализацией переходов в параллельные пространства, несмотря на существующие теоретические разработки [1-3] в настоящее время не решены.

Практические попытки осуществить искривление пространственно-временного континуума техническими средствами приводили к результатам, которые не давали исследователям

морального права продолжать работу в этом направлении. Наиболее ярким примером экспериментов по использованию внешних электромагнитных полей для «прокола» пространства является филаделфийский эксперимент. Для проведения эксперимента на палубе эсминца DE-173 («Элдридж») были смонтированы четыре мощных катушки с целью создания электромагнитного поля, способного скрыть корабль из поля зрения. В трюме располагались четыре синхронизированные по фазе генератора (мощностью 75 kW каждый), способные «накачивать» им-

пульсным напряжением палубные индуктивности на резонансной частоте. 28 октября 1943 года, после включения системы, эсминец исчез на некоторое время, оставив на воде четкий отпечаток своего корпуса. В результате эксперимента несколько человек исчезли навсегда, пятеро оказались вплавлены в стальную обшивку корабля, многие лишились рассудка.

Однако существует множество свидетельств естественного перемещения людей в пространстве и времени, а также проявления феномена искривления пространства-времени при ядерных испытаниях. В этих случаях пространственно-временной эффект связан с взаимодействием гравитационных и электромагнитных полей космических объектов (Солнца, Земли) и человека. Пространство и время деформируются и искривляются в ответ на присутствие вещества или энергии. Такие деформации структуры пространства и времени передают силу тяжести из одного места в другое.

Предлагаемое в работе 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. позволяет объяснить «гравитационные аномалии».

Понятие пространственно-временного монополя ядерного реактора было введено в [4].

Пространственно-временной монополь – 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 [4].

Выдвигается гипотеза, что 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 [5].

Пространственно-временной монополь 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) [4]. 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 монополь голой сингулярности является зеркальным отражением квантовой модели пространства скрытой сингулярности (черной дыры) [6]. 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.

Предлагаемая статья является продолжением исследований пространственно-временных эффектов, порождаемых ядерным реактором в состоянии близком к мгновенной критичности [4,6-10]. Использование естественных пространственно-временных монополей при создании монополя реактора снижает до минимума риск неблагоприятного исхода эксперимента. Кроме того, биологический объект необходимо заменить техническим с аналогичными биологическим системам параметрами.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – определение условий возникновения взаимодействия естественных пространственно-временных монополей, которые определяют появление монополя ядерного реактора.

Для достижения поставленной цели необходимо определить:

- условия взаимодействия естественных монополей, участвующих в создании монополя реактора, и их основные параметры;
- параметры объекта, при которых возможно туннелирование монополей Земли и Солнца;
- параметры элементов монополя ядерного реактора.

Условия взаимодействия естественных монополей и их параметры

Выдвигается три гипотезы.

Первая гипотеза (условие создание монополя). Образование монополя М1 типа «скрытая сингулярность» в евклидовом пространстве возможно при туннелировании двух монополей М2 и М3 типа «голая сингулярность» для объекта, находящегося на границе создаваемого монополя. Туннелирование монополей осуществляется на частотах антирезонанса ω_{AP} и резонанса ω_{PM} . Точка туннелирования («прокола») пространств должна лежать в области расширения всех трех монополей.

Вторая гипотеза (условие антирезонанса). Антирезонанс, определяющий туннелирование монополей, происходит на частоте ω_{AP} , обусловленной основными частотами и коэффициентами искривления существующих монополей и коэффициентом искривления создаваемого монополя при $n = 1$ ($k_{M1} = 2\pi n$ [4]). Объект в точке туннелирования должен быть способен функционировать на частоте ω_{AP} .

Соотношение основных частот сингулярностей определяется следующим образом

$$\omega_{M3} > \omega_{M1} > \omega_{M2} > \omega_{AP},$$

где ω_{M1} , ω_{M2} , ω_{M3} – основные частоты монополей М1, М2 и М3 соответственно.

Соотношение, задающее частоту антирезонанса, имеет вид

$$\omega_{AP} = \frac{k_{M1}}{n} \cdot \frac{\omega_{M3}}{k_{M2}} \equiv \frac{\omega_{M2}}{k_{M3}}, \quad k_{M1} = 2\pi n, \quad (1)$$

где k_{M1} , k_{M2} , k_{M3} – коэффициенты искривления монополей М1, М2 и М3 соответственно.

Выражение (1) для определения частоты антирезонанса можно записать следующим образом

$$\omega_{AP} = 2\pi \frac{\omega_{M3}}{k_{M2}}. \quad (2)$$

Третья гипотеза (условие резонанса). Резонанс, определяющий перетекание энергии из монополей на объект, происходит на частотах фотонов, обладающих большой энергией (на

волнах около 250 мкм). Объект в точке туннелирования должен излучать в терагерцовом диапазоне на двух частотах: на частоте $\omega_{\phi M3}$ фотонного излучения монополя М3 и на частоте $\omega_{\phi M2}$ фотонного излучения монополя М2. Соотношение частот описывается в виде

$$\omega_{PM} = \omega_{\phi M2} = k_{M3} \omega_{\phi M3}. \quad (3)$$

Таким образом, объект должен быть способным одновременно функционировать на трех частотах: ω_{AP} , ω_{PM} , ω_{PM}/k_{M3} .

Данные гипотезы определяют возможность создания монополя ядерного реактора в земных условиях на основе существующих естественных пространственно-временных монополей.

В ситуации, когда объект обладает частотой антирезонанса, но не имеет резонансной частоты, для реактора, находящегося в близком к мгновенной критичности состоянии, монополь не образуется. Однако энергия реактора перетекает через объект на монополь Земли, при этом происходит разрушение объекта. Объект выступает в роли некоего «молниеотвода».

Представляется, что при воздействии на человека гамма-излучением в частотном спектре сердца может появиться частота антирезонанса. Однако если при этом мозг человека синхронно породит излучение (мысль) на частоте резонанса, то воздействие на организм низкой частоты будет нейтрализовано за счет появления туннеля и перехода в пространство естественных монополей.

Исходя из сказанного выше, следует, что в экспериментах по изучению пространственно-временных эффектов не должен быть использован в качестве объекта человек. Необходимо до проведения эксперимента разработать технический объект с указанным набором частот.

Определим формулы расчета параметров таких естественных монополей как монополи планет солнечной системы и Солнца.

Сопоставим Солнцу монополь М2, Земле или любой другой планете солнечной системы – монополь М3. Поскольку k_{M2} является постоянным, то для любой планеты частота антирезонанса зависит от ее основной частоты $\omega_{пл}$, определяемой ее радиусом $R_{пл}$

$$\omega_{пл} = \frac{c}{R_{пл}}. \quad (4)$$

Если не известен радиус монополя планеты, то его можно вычислить из (1)

$$R_{Mпл} = R_{пл} \frac{\omega_C}{\omega_{AP}},$$

$$\omega_C = \frac{c}{R_C}, \quad (5)$$

или

$$R_{M \text{ пл}} = \frac{R_{\text{пл}}}{R_C} \cdot \frac{c}{\omega_{AP}},$$

где ω_C – основная частота Солнца, $R_{\text{пл}}$, R_C , $R_{M \text{ пл}}$ – радиусы планеты, Солнца и монополя планеты соответственно.

Поскольку размер монополя Солнца точно не известен, расчет радиуса монополя осуществляется исходя из параметров монополя Земли по формуле

$$R_{MC} = 2\pi L_{3-Л} \frac{R_C^2}{R_3^2}, \quad (6)$$

$$R_{MЗем} = L_{3-Л},$$

где R_{MC} , R_3 , $R_{MЗем}$ – радиусы монополя Солнца, Земли и монополя Земли соответственно, $L_{3Л}$ – расстояние от Земли до Луны.

Коэффициент искривления пространства монополя планеты определяется, исходя из структуры монополя [4, 6], по формуле

$$k_{\text{пл}} = \frac{R_{M\text{пл}}}{R_{\text{пл}}}. \quad (7)$$

Рассчитаем основные параметры монополей Земли и Солнца.

Основная частота монополя Земли, исходя из (4): $\omega_{зем} = 48$ Гц.

Радиус монополя Земли равен расстоянию от Земли до Луны: $R_{MЗем} = 3,8 \cdot 10^8$ м.

Коэффициент искривления пространства монополя Земли в соответствии с (7): $k_{зем} \approx 60$.

Основная частота монополя Солнца, исходя из (5): $\omega_C = 0,43$ Гц.

Радиус монополя Солнца, исходя из (6): $R_{MC} = 2,8 \cdot 10^{13}$ м.

Коэффициент искривления пространства монополя Солнца по аналогии с (7): $k_C \approx 4,09 \cdot 10^4$.

Частота антирезонанса в земных условиях в соответствии с (2) равна $\omega_{AP} \approx 0,0072$ Гц.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующее заключение: величина частоты антирезонанса в герцах равна постоянной тонкой структуры α и не зависит от характера монополя

$$\omega_{AP} = k_{\text{согл}} \alpha,$$

где $k_{\text{согл}}$ – коэффициент согласования размерности ($k_{\text{согл}} = 1/c$).

Аналогично частота резонанса постоянна для всех доминирующих монополей в системе создания нового монополя. Для принятых в статье обозначений доминирующим монополем является монополь M2.

Для определения значения частоты резонанса первоначально необходимо выполнить расчет параметров объекта в точке туннелирования, которые связаны с параметрами монополя ядерного реактора.

Параметры объекта в точке туннелирования монополей Земли и Солнца

Предположим, что первоначально реактор находится в подкритическом состоянии. Под действием электромагнитного излучения на частоте ядерного магнитного резонанса и одновременном воздействии лазера, работающего в терагерцовом частотном диапазоне, осуществляет переход реактора в состояние мгновенной критичности. Такой переход сопровождается жестким гамма-излучением. Для того чтобы затормозить процесс деления ядерного топлива, необходимо чтобы энергия исходящего от реактора потока ионизированного воздуха (газа) перетекала на другой объект. Для того чтобы объект не был разрушен, необходимо помимо основного реактора наличие дополнительного реактора малой массы (или ядерного топлива U^{235}), находящегося в состоянии останова. Это позволит осуществить двухэтапную схему тормозящего жесткого гамма-излучения:

- 1) получение мягкого гамма-излучения малой мощности с дополнительного реактора (ядерного топлива);
- 2) создание вокруг объекта аккреционного диска, который порождает жесткое гамма-излучение.

Представляется, что объект должен иметь рентгеновское излучение, частота ω_{PO} которого совпадает с частотой мягкого гамма-излучения дополнительного реактора. Образуется отрицательная обратная связь между основным реактором и объектом, которая определяет постоянство коэффициента усиления реактора. Получить частоту излучения ω_{PO} объект может только в области туннелирования монополей Солнца и Земли, то есть

$$\omega_{PO} = \omega_{PM} k_{M2} k_{M3}. \quad (8)$$

Максимальный коэффициент усиления K_{max} основного реактора без обратной связи, при котором еще не происходит взрыв, соответствует скорости света, т.е. $K_{\text{max}} = 3 \cdot 10^8$. Коэффициент обратной связи k_{OC} является коэффициентом усиления объекта и приближается к минимальному возможному для ядерного реактора. Коэффициент усиления реактора, охваченного обратной связью, определяется соотношением

$$K = \frac{K_{\max}}{1 + k_{\text{OC}} K_{\max}}. \quad (9)$$

Нижняя граница значений коэффициента усиления реактора, определяющая возможность искривлений, равна

$$K_{\min} = \frac{K_{\max}}{\sqrt{2}} \equiv K_{\max} \cos \frac{\pi}{4}. \quad (10)$$

На основе геометрии расположения объекта, реактора и центра Земли формула (10) преобразуется к виду

$$K = K_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right), \quad (11)$$

$$\text{tg} \theta = \frac{L}{R_3}, \quad (12)$$

$$L = k \frac{c}{\omega_{\text{MP}}},$$

где L – расстояние между реактором и объектом; R_3 – радиус Земли; k – коэффициент искривления пространства; ω_{MP} – частота ядерного магнитного резонанса для реактора.

Формула для расчета коэффициента искривления пространства приведена в [4]. Ниже представлен конечный результат вывода

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{k_1(1 + 10F\beta'\omega'_0)} \right)^2}}, \quad (13)$$

$$k_1 \approx \frac{T_{\text{HK}} + \Delta T_{\text{HK}}}{T_{\text{HK}}},$$

$$\left(\frac{\Delta T_{\text{HK}}}{T_{\text{HK}}} \right)_{\max} = \frac{\alpha}{4},$$

$$F = \frac{1}{\omega_{\text{MP}}} \cdot \frac{\beta_6}{\beta} \omega_2,$$

$$\omega_2 = k_{\text{пр}} \cdot \frac{c}{\ln(c^2)},$$

$$\omega'_0 = k_{\text{пр}} \cdot \frac{\alpha^3}{2\pi \ln(c^2)} \cdot \frac{c}{2\pi \ln(c^2)},$$

где ω_{MP} – частота ядерного магнитного резонанса; β и β_6 – доля соответственно всех запаздывающих нейтронов и нейтронов 6-й группы по отношению к полному числу нейтронов для ^{235}U ; β' – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{239}Pu ; F – частотный коэффициент ядерного магнитного резонанса; k_1 – температурный коэффициент усиления, задающий исходное состояние реактора в момент внешнего электромагнитного воз-

действия; T_{HK} , ΔT_{HK} – температура начала поверхностного кипения теплоносителя и ее изменение; α – постоянная тонкой структуры; $k_{\text{пр}}$ – константа, необходимая для согласования размерности.

Для расчета в формуле (13) примем $k_1 = 1,0018$, $F = 1,1$, значение нулевой гармоники энерговыделения реактора $\omega'_0 \approx 0,48$ Гц. В [4] показано, что значение коэффициент искривления пространства кантовано, $k = 2\pi n$ ($n = 1, 2, \dots, n$). Приравнявая левые части формул (9) и (11), можно рассчитать коэффициент обратной связи k_{OC}

$$k_{\text{OC}} = \left(\cos^{-1}\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) - 1 \right) / K_{\max} \quad (14)$$

Минимальное значение $k_{\text{OC min}} \approx 1,4 \cdot 10^{-9}$.

Коэффициент обратной связи определяется отношением энергии фотонов на частоте терагерцового диапазона на выходе объекта к энергии гамма-квантов на его входе

$$k_{\text{OC}} = \frac{h\nu_{\phi}}{h\nu_{\gamma}} = \frac{\nu_{\phi}}{\nu_{\gamma}}, \quad (15)$$

где h – постоянная Планка; ν_{ϕ} , ν_{γ} – частота фотона на выходе объекта (излучение в терагерцовом диапазоне как результат ионизации воздуха гамма-квантами аккреционного диска) и частота гамма-кванта на входе (жесткое гамма-излучение аккреционного диска) соответственно.

На основании (14-15), при $k_{\text{OC min}} \approx 1,4 \cdot 10^{-9}$ и $\nu_{\gamma} = 3 \cdot 10^{21}$ Гц частота терагерцового излучения составит $\nu_{\phi} = 4,2 \cdot 10^{12}$ Гц.

Частота резонанса в евклидовом пространстве равна частоте фотонов на выходе объекта $\omega_{\text{PM}} = \nu_{\phi} = 4,2 \cdot 10^{12}$ Гц.

В искривленном пространстве для объекта резонансная частота ω_{PMO} в соответствии с (8) имеет значение $\omega_{\text{PMO}} = \omega_{\text{PO}} \approx 10^{19}$ Гц, что соответствует диапазону частот мягкого гамма-излучения.

Частота антирезонанса ω_{APO} для объекта в искривленном пространстве в соответствии с (1) определяется формулой

$$\omega_{\text{APO}} = \omega_{\text{AP}} k_{\text{M3}} \equiv \omega_{\text{M2}} \approx 0,43 \text{ Гц},$$

то есть для человека частота пульса в области туннелирования должна соответствовать основной частоте Солнца.

При таком значении частот объект «заключается» в электромагнитный кокон, позволяющий ему перемещаться в искривленных пространствах.

Схема туннелирования монополей представлена на рис. 1. Пунктирной линией показано перетекание энергии ядерного реактора на

Землю при отсутствии в спектре объекта частоты резонанса.

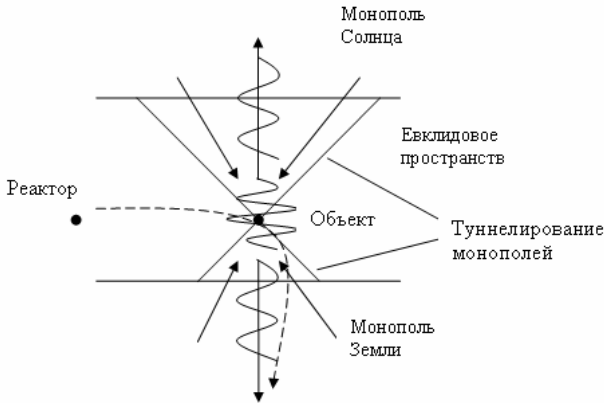


Рис. 1. Схема туннелирования монополей

Параметры элементов в схеме создания монополя ядерного реактора

Элементами в схеме создания монополя ядерного реактора являются: основной реактор, дополнительный реактор, радиоизлучатель с частотой ядерного магнитного резонанса, запускающий лазер, объект. Дополним множество параметров основного реактора, которое приведено выше, параметрами других элементов, необходимых для создания монополя реактора относительно евклидового пространства.

Коэффициент обратной связи может быть определен через резонансную частоту объекта ω_0 и частоту внешнего электромагнитного излучения реактора ω_{BH}

$$k_{OC} = \frac{\omega_0}{\omega_{BH}}, \quad (16)$$

$$\omega_0 = \frac{c}{L} \equiv \frac{\omega_{MP}}{k}. \quad (17)$$

Подставляя (17) в (16), получаем

$$k_{OC} = \frac{\omega_{MP}}{k\omega_{BH}}. \quad (18)$$

Частота ядерного магнитного резонанса (ЯМР) реактора является базовой для расчета исходного коэффициента усиления реактора и частоты лазера, осуществляющего воздействие на реактор. Рассчитав по (14) $k_{OC} = f_1(\omega_{MP})$ и из (13) $k = f_2(\omega_{MP})$, можно определить частоту внешнего электромагнитного воздействия

$$\omega_{BH} = \frac{\omega_{MP}}{kk_{OC}}. \quad (19)$$

При $\omega_{MP} = 3 \cdot 10^5$ Гц, $k = 6,28$, $k_{OC} = 1,4 \cdot 10^{-9}$ величина частоты внешнего воздействия составит $\omega_{BH} = 3,3 \cdot 10^{13}$ Гц.

Основываясь на формуле расчета коэффициентов усиления в области относительно высоких частот для реактора нулевой мощности [11] $K = (\omega l)^{-1}$, определим коэффициент усиления реактора, охваченного отрицательной обратной связью, следующим образом

$$K = \left(\frac{\omega_{MP}}{k} \cdot \frac{1}{K_H \omega_{BH}} \right)^{-1} \equiv \frac{K_H}{k_{OC}}. \quad (20)$$

Используя (9) и (20), можно определить исходный коэффициент усиления реактора

$$K_H = k_{OC} K \equiv \frac{k_{OC} K_{max}}{1 + k_{OC} K_{max}}. \quad (21)$$

В соответствии с (21) при $k_{OC} = 1,4 \cdot 10^{-9}$ и $K_{max} = 3 \cdot 10^8$ исходная величина коэффициент усиления составит $K_H = 0,3$.

Энергетическое равновесие между реактором и объектом определяет схему их пространственного положения. Высота расположения реактора над плоскостью расположения объекта (без учета кривизны Земли) определяется соотношением

$$H = \frac{c}{k^2 \omega_{MP}}.$$

Формирование пространственно-временного монополя становится возможным, т.к. для реактора центр тяжести Земли смещается, поскольку в области объекта появляется новый, дополнительный центр тяжести, который вызывает искривление пространства. Гравитационное взаимодействие реактора с центром Земли и с объектом определяет следующее соотношение

$$\gamma \frac{M_p M_3}{R_3^2} = \gamma \frac{M_p m K_{max}^2}{L^2},$$

где M_p – масса реактора; m – масса объекта; L – расстояние между реактором и объектом; R_3 – радиус Земли; γ – постоянная гравитации.

Масса объекта во взаимодействии увеличивается за счет аккреционного диска в K_{max}^2 раз, причем собственная масса объекта остается неизменной

$$m K_{max}^2 = \frac{M_3 L^2}{R_3^2}.$$

При $k = 6,28$ расстояние равно $L = 6,28$ км, масса объекта составит $m = 64,8$ кг.

Дополнительный реактор должен находится:

- 1) в плоскости объекта,
- 2) на проекции линии соединения основного реактора и объекта,
- 3) на расстоянии длины волны радиоизлучателя от основного реактора.

Соотношение масс реакторов определяется отношением их исходных коэффициентов усиления

$$\frac{M_p}{M_{\text{доп}}} = \frac{K_H}{K_{\text{доп}}}.$$

Ядро монополя включает два реактора, представляющие собой двойную систему.

Схема первоначального расположения элементов монополя представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема расположения элементов монополя

Время существования монополя реактора определяется коэффициентом усиления реактора, охваченного отрицательной обратной связью, и частотой ЯМР

$$T = \frac{LK}{c} \equiv \frac{kK}{\omega_{\text{МР}}}.$$

При $k = 2\pi$, $K = 2,1 \cdot 10^8$, $\omega_{\text{МР}} = 3 \cdot 10^5$ Гц величина $T = 1,22$ ч.

Время распада монополя реактора равно времени его существования, поэтому общее время процесса искривления пространства определяется формулой

$$T_M = \frac{2kK}{\omega_{\text{МР}}}.$$

Распад монополя происходит естественным путем в связи с рассеиванием энергии фотонов.

Заключение

Выдвинуты гипотезы, описывающие возможность создания монополя ядерного реактора в земных условиях на основе существующих естественных пространственно-временных монополей. Показано, что образование монополя типа «скрытая сингулярность» в евклидовом пространстве возможно при туннелировании двух монополей типа «голая сингулярность» для объекта, находящегося на границе создаваемого монополя. Туннелирование монополей осуществляется на частотах антирезонанса и резонанса.

Точка туннелирования («прокола») пространств должна лежать в области расширения всех трех монополей. В этом контексте Земля и Солнце рассматриваются как голая сингулярность, а ядерный реактор в схеме использования естественных ядерного (Земли) и термоядерного (Солнца) реакторов как скрытая сингулярность.

Найдены условия взаимодействия естественных монополей, участвующих в создании монополя реактора, и их основные параметры. Определены параметры объекта, при которых возможно туннелирование монополей Земли и Солнца. Рассмотрены параметры элементов монополя ядерного реактора.

Результаты работы определяют новые возможности для развития атомной энергетики, систем энергетической и военной безопасности ядерных и иных стратегических объектов, способствуют расширения космических исследований и могут рассматриваться как теоретическая предпосылка для становления и развития квантовой теории тяготения.

Список литературы

1. Хокинг С. Природа пространства и времени / С. Хокинг, Р. Пенроуз. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 160 с.
2. Блохинцев Д.Н. Пространство и время в микромире / Д.Н. Блохинцев. – М.: Наука, 1982. – 176 с.
3. Новиков И.Д. Физика черных дыр / И.Д. Новиков, В.П. Фролов. – М.: Наука, 1986. – 328 с.
4. Качур С.А. На грани ядерного взрыва: электромагнитное управление ядерными реакторами и искривление пространства / С.А. Качур. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – 100 с.
5. Black Holes, Naked Singularities and Cosmic Censorship. Stuart L. Shapiro and Saul A. Teukolsky in American Scientist. – Vol. 79. – No. 4, pages 330 – 343; July/August 1991.
6. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности / С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 18 – 26.
7. Качур С.А. Энтропийный анализ безопасности управления ядерным реактором посредством электромагнитного излучения / С.А. Качур // Пром. теплотехника, 2013. – Т. 35. – Вып. 4. – С. 18 – 22.
8. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реактором вблизи мгновенной критичности / С.А. Качур // Пром. теплотехника, 2013. – Т. 35. – Вып. 5. – С. 27 – 32.
9. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства / С.А.

Качур // Радиоэлектроника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С. 22 - 26.

10. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов/ С.А. Качур // 36.наук.пр. СТУЯЭтаП. – Севастополь: СТУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С. 13 - 26.
11. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. / И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов, – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.

References

1. Hawking S., Penrose R. *Priroda prostranstva i vremeni* [The Nature of Space and Time]. Izevsk, NICH «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2000, 160 p.
2. Blokhinshev D.N. *Prostranstvo i vremya v mikromire* [Space and time in microcosm]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 176 p.
3. Novikov I.D., Frolov V.P. *Fizika chyornix dir* [Physics of black holes]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 328 p.
4. Kachur S.A. *On verge of nuclear explosion: electromagnetic management by nuclear reactors and curvature of space*. Sevastopol, NPTh «EKOSI-Gidrofizika», 2014, 100 p.
5. Black Holes, Naked Singularities and Cosmic Censorship. Stuart L. Shapiro and Saul A. Teukolsky in *American Scientist*, July/August 1991. – Vol. 79, No. 4., pp. 330–343.
6. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Anergeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp.18-26.
7. Kachur S.A. Entropic analysis of safety of management by a nuclear reactor by means of electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 18-22.
8. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
9. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. *Radioelektronika i informatika*, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
10. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. *Sb. nauch. tr. SNUYaE ta P*, Sevastopol, SNUYaE ta P, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.
11. Emelyanov I.Y., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Scientific and technical government bases by nuclear reactors*. Moskva, Energoatomizdat, 1981, 360 p.

УДК 62-52.019:621.311.25

Анализ и расчет структурной надежности и оборудования АСУ ТП АЭС

Н.И. Кузнецова¹, Н.В. Серова-Нашева²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹nika100452@gmail.com, ²greydar@mail.ru

Статья поступила 22.03.2016 г.; после доработки 24.03.2016 г.

Аннотация

Выполнен анализ эксплуатационной надежности системы и ее элементов. Определены показатели надежности, на основании которых можно сделать вывод о надежности АСУ ТП. Проведено практическое исследование работы АСУ ТП на блоках АЭС. Предложенный метод расчета количественных показателей надежности при различных способах структурного резервирования элементов системы позволит разработать рекомендации по улучшению схемотехнических решений, направленных на повышение эксплуатационной надежности и работоспособности АЭС, поскольку АСУ ТП относится к управляющей системе безопасности.

Ключевые слова: надежность системы, структурное резервирование.

Analysis and Calculation of Structural Reliability and Equipment of an ACS for Technological Process of NPP

N.I. Kuznetsova¹, N.V. Serova-Nasheva²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹nika100452@gmail.com, ²greydar@mail.ru

Received 22.03.2016 y.; received in final form 24.03.2016 y.

Abstract

The analysis of operational reliability of system and its elements is made. Reliability indicators on the basis of which it is possible to draw a conclusion on reliability of industrial control system are defined. Practical research of work of industrial control system on blocks of the NPP is carried out. The offered method of calculation of quantitative indices of reliability at various ways of structural reservation of elements of system will allow to develop recommendations about improvement of the circuitry decisions directed to increase of operational reliability and operability of the NPP as the industrial control system treats the operating security system.

Keywords: reliability of system, structural reservation.

Введение

В связи с постоянным ростом роли атомной энергетики в экономике нашей страны проблема надежности производства все чаще требует пристального внимания, как со стороны рядового персонала, так и со стороны руководства. Ведь любое предприятие атомной энергетики (особенно это касается АЭС) представляет собой опасный объект, любая нештатная ситуация на котором может нанести непоправимый ущерб не

только персоналу, но и остальному населению региона, а также окружающей среде. Вопрос обеспечения надежности АЭС и других предприятий атомной энергетики является в наше время чрезвычайно актуальным.

Одной из основных проблем при проектировании, производстве и эксплуатации автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) является проблема обеспечения надежности [1,2]. Как и многие технические системы, АСУ ТП имеют в своем

составе сложные комплексы технических средств.

Надежность АСУТП является одним из главных направлений при обеспечении надежности всего предприятия. Это связано с тем, что на АСУТП возложено огромное количество функций, выполнять которые человек, каким бы он подготовленным не был, просто не в состоянии. Сбой или отказ любого компонента АСУТП неизбежно приведет к нарушению работы всего предприятия. Особенностью АСУ ТП является также то, что не все отказы ее элементов проявляются явно и могут быть обнаружены визуально. Чтобы обнаруживать отказы в системе, создают специальные средства контроля и диагностирования. От их характеристик зависят и доля своевременно и достоверно обнаруживаемых отказов, и, как следствие, уровень надежности и его количественные оценки.

Особое внимание уделено изложению общих принципов и методик анализа надежности систем, а также общих свойств основных методов ее повышения. Поскольку для повышения надежности АСУ ТП используются различные способы резервирования, поэтому подробно излагаются методы и технические приемы традиционного структурного резервирования. Схемотехнические вопросы реализации методов повышения надежности имеют здесь основное значение, так как они чаще применяются как при проектировании систем, так и при их эксплуатации на предприятиях.

В работе предложено повысить эксплуатационную надежность и работоспособность АЭС за счет анализа и исследования АСУ ТП и ее элементов, заключающиеся в определении количественных показателей надежности, что позволило разработать рекомендации по улучшению схемотехнических решений АСУ ТП АЭС.

Представленная разработка не имеет аналогов ни в разработке, ни в печати.

Постановка цели и задачи научного исследования

Целью данной научной работы является исследование и анализ эксплуатационной надежности системы и ее элементов, который заключается в определении тех показателей надежности, на основании которых можно сделать вывод о надежности системы, так как АСУ ТП относится к управляющей системе безопасности.

Особый интерес в выполняемом исследовании представляют как характер изменения основных технологических параметров АСУ ТП и

входящих в нее элементов, так и оценка конкретных численных значений количественных показателей надежности системы.

Следует подчеркнуть, что исследование касается именно реальной системы АЭС с ВВЭР-1000, а не некоего гипотетического ядерного реактора.

Ценность расчетных результатов исследования и их практическая значимость во многом зависит от степени детализации описания объекта и использованного при этом того или иного набора исходных допущений.

Для достижения поставленной цели необходимо на примере конкретной технической задачи выполнить анализ эксплуатационной надежности системы и ее элементов, разработать методику расчета структурной надежности блоков и оборудования АСУ ТП АЭС.

Отметим, что подобная задача является типичной для широкого спектра предприятий энергетического комплекса.

Решение поставленной задачи

Решение поставленной задачи необходимо начинать с анализа объекта исследования, которым, в данном случае, является панель силового управления системой СУЗ.

Система управления и защиты ядерного реактора обеспечивает функции управления и аварийной защиты. Панель силового управления (ПСУ) предназначена для питания магнитов двух приводов шагового электромагнита (ШЭМ) системы СУЗ реактора ВВЭР-1000.

ПСУ обеспечивает:

- питание фиксирующего магнита (ФМ) выпрямленным током в режиме удержания органа регулирования (ОР);
- изменение токов магнитов по заданным программам в режиме перемещения ОР;
- подключение запирающего магнита (ЗМ) и ФМ к аккумуляторной батарее при недопустимом снижении токов ЗМ и ФМ;
- обесточивание магнитов по сигналу АЗ.

Для анализа работоспособности системы рассмотрим ее структурную схему, представленную на рис.1.

В данной схеме переменное напряжение 250 В, 50 Гц при помощи БСВ преобразуется в токи питания магнитов I_1 , I_2 , I_3 . Временные диаграммы токов определяются режимом работы задатчика тока. Задатчик тока управляется от внешних команд.

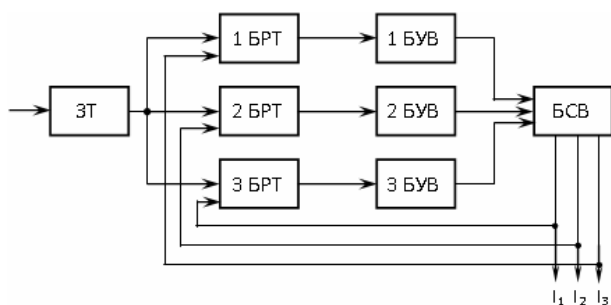


Рис. 1. Структурная схема панели силового управления СУЗ: ЗТ - задатчик тока; БРТ - блок регулятора тока; БУВ - блок управления вентилями; БСВ - блок силовых вентилялей

В БРТ сигналы задания тока сравниваются с действительными значениями токов. Разностные сигналы усиливаются и поступают на входы БУВ. При изменении сигналов на управляющих входах БУВ меняются углы открытия тириستоров БСВ и, как следствие, токи I_1 , I_2 , I_3 .

Питание магнитов осуществляется от трех управляемых выпрямителей блока силовых вентилялей (БСВ).

Характерные режимы работы выпрямителя:

- режим стабилизации тока;
- режим ввода тока;
- режим вывода тока.

Данная схема имеет в своем составе один канал, который является основным, хотя на первый взгляд кажется, что схема состоит из трех идентичных каналов (БРТ и БУВ). Однако выход из строя любого узла неминуемо повлечет за собой отказ всей системы, так как схема обеспечивает работу трех электромагнитов: тянущего (ТМ), запирающего и фиксирующего, каждый из которых выполняет определенную функцию. Таким образом, условием работоспособности системы является безотказная работа всех ее элементов.

Показатели надежности – это количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность системы.

Для данной системы будут определены следующие показатели надежности:

- вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов.

- частота отказов

$$a(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $Q(t)$ – вероятность отказа.

- интенсивность отказов

$$l(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \quad (3)$$

- средняя наработка до первого отказа

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (4)$$

где λ – интенсивность отказов.

С целью упрощения расчета необходимо разработать функционально-логическую схему устройства. Для построения функционально-логической схемы устройства преобразуем исходную схему, объединив три блока БРТ в один блок БРТ_{общ} и три блока БУВ в один блок БУВ_{общ} с учетом интенсивности отказов каждого блока.

Полученная функционально-логическая схема устройства представлена на рис. 2.



Рис. 2. Функционально-логическая схема панели силового управления СУЗ:

ЗТ - задатчик тока; БРТ - блок регулятора тока; БУВ - блок управления вентилями; БСВ - блок силовых вентилялей

Значения интенсивности отказов элементов и блоков системы выбраны из ТО и ЭИ или для расчета могут быть использованы справочные данные.

Значения $\lambda_{общ}$ для блоков БРТ_{общ} и БУВ_{общ} следует определить с учетом количества блоков, имеющих одинаковые значения l

$$\lambda_{общ} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \text{ 1/час}, \quad (5)$$

Необходимо осуществить выбор времени работы элементов системы с учетом технологического процесса на АЭС.

Так как, например, время кампании энергоблока составляет 3 года, выберем для расчета общее время работы элементов системы в часах, равное

$$T_{общ} = 3 \cdot 365 \cdot 24 = 25280 \text{ (ч)},$$

где 3 года – время кампании энергоблока,

365 – количество дней в году,

24 – протяженность одних суток в часах.

Для получения наглядных характеристик разобьем $T_{общ}$ на три равных участка (по 1 году). Дальнейшие расчеты следует производить, опираясь на эти значения времени.

Определение количественных показателей надежности начнем с расчета вероятности безотказной работы основного канала системы с учетом выбранного времени

Для расчета вероятности безотказной работы (ВБР) элементов основного канала системы воспользуемся формулой (1) для

$$P(t) = e^{-\lambda_i t},$$

где λ_i – интенсивность отказов элемента.

Для различных значений интервалов времени t_1, t_2, t_3 определим значения $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$.

Вероятность безотказной работы основного канала определим по формуле

$$P_{\text{осн.к.}}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t). \quad (6)$$

Расчет вероятности безотказной работы системы с учетом резервирования можно выполнить для различных способов.

Для резервирования системы применим *общее постоянное резервирование с целой кратностью*. Схема данного резервирования представлена на рис. 3.

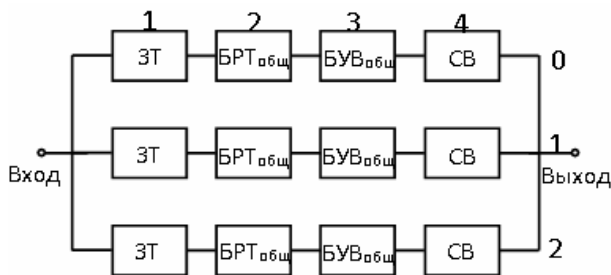


Рис. 3. Схема расчета надежности системы при общем постоянном резервировании с целой кратностью

Расчет вероятности безотказной работы системы в зависимости от кратности резервирования и промежутка времени производится по формуле

$$P_c(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]^{m+1}, \quad (7)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы элемента;

N – число элементов;

m – кратность резервирования.

Кратность резервирования характеризует степень избыточности и оценивается отношением числа резервных изделий к числу резервируемых (основных).

$$m = \frac{l - h}{h}, \quad (8)$$

где $l - h$ – число резервных элементов;

l – общее число элементов расчета резервируемого соединения;

h – число элементов, необходимое для нормальной работы соединения.

В соответствии со схемой, представленной на рис. 3, число элементов равно четырём, а кратность резервирования $m = 0, 1, 2$.

Произведения вероятностей безотказной работы элементов основного канала рассчитываются в соответствии с формулой (6).

Для расчета *раздельного постоянного резервирования с целой кратностью* выберем отдельный элемент системы, который имеет наибольшую интенсивность отказов и, следовательно, менее надежен. В данном случае этим элементом является блок управления вентилями БУВ_{общ}. Для его резервирования будем использовать раздельное постоянное резервирование с целой кратностью.

Схема расчета надежности системы при таком резервировании показана на рис. 4.

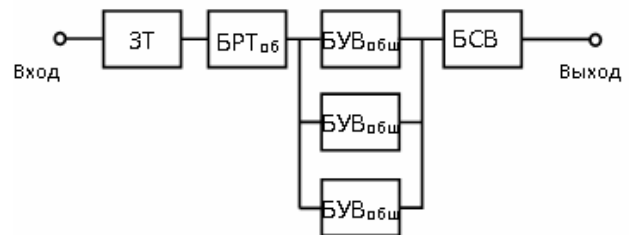


Рис. 4. Схема расчета надежности системы при раздельном постоянном резервировании с целой кратностью

При этом вероятность безотказной работы резервированного элемента определим по формуле (8)

$$P_l(t) = \prod_{i=1}^N (1 - [1 - P_3(t)]^{m+1}) \quad (9)$$

В данном случае $N = 1$, а $m = 0, 1, 2$.

Тогда вероятность безотказной работы всей системы определяется по формуле (5).

Одной из важнейших количественных характеристик надежности любой системы является интенсивность отказов. Интенсивность отказов основного канала определяется по формуле (5).

Интенсивность отказов для канала с резервированием при различных значениях интервала времени и кратности определяется по формуле

$$l_c(t) = \frac{l_0(m+1) \cdot e^{-l_0 t} \cdot (1 - e^{-l_0 t})^m}{1 - (1 - e^{-l_0 t})^m} \quad (10)$$

Среднее время безотказной работы системы определим с учетом интенсивности отказов основного канала и кратности резервирования по формуле

$$T_{\text{сист}} = \frac{1}{\lambda_0} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} \quad (11)$$

Для определения зависимости вероятности безотказной работы от $\lambda_0 t$ при различных значениях m рассчитывается значение λ_0 , значения определяются на трех интервалах времени t_1, t_2, t_3 .

На основании этих рассуждений и расчетов необходимо построить графическую зависимость вероятности безотказной работы от $\lambda_0 t$ при различных значениях m и сделать анализ полученных результатов, который позволит выполнить оценку точности расчета, а также сделать выводы и соответствующие рекомендации.

Таким образом, применение предложенного анализа и расчета позволяет не только увеличить эксплуатационную надежность, за счет разработанной структурной надежности, но и повысить работоспособность и безопасность эксплуатации оборудования на АЭС.

Заключение

1. В ходе работы сделан анализ объекта исследования. Проанализированы условия работоспособности системы. Проанализированы условия работоспособности системы, составлена функционально-логическая схема устройства, предложен способ выбора времени работы элементов системы.

2. Приведена методика определения показателей надежности панели СУЗ ВВЭР-1000, при условии, что система резервирована следующими способами:

- общее постоянное резервирование с целой кратностью;
- раздельное постоянное резервирование с целой кратностью.

3. Предложенный метод расчета позволяет определить показатели надежности и выполнить сравнительный анализ количественных характеристик для различных способов резервирования. Очевидно, технологически и экономически резервирование всей системы значительно дороже, чем резервирование отдельных элементов. Этот фактор также необходимо учитывать при выборе способа резервирования.

4. Преимущества предложенного анализа и расчета очевидны, так как позволяют определить количественные характеристики надежности на любом этапе жизненного цикла любого изделия.

5. Еще одним из немаловажных аспектов этого расчета, в дополнение к техническим преимуществам, является доступность и ценовая политика, направленная на потребителя, благодаря его простоте и при этом достаточной глубине анализа, направленного на повышение работоспособности оборудования АСУ ТП и безопасности работы АЭС.

Список литературы

1. Аникевич К.П. Системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000: учеб. пособие /К.П. Аникевич. – Севастополь: СКУЭЭиП, 2006, 208 с.: ил.
2. Кузнецова Н.И. Надежность и диагностирование Сборник расчетно-графических работ: учеб. пособие / Н.И. Кузнецова. – Севастополь: СКУЭЭиП, 2012, 68 с.: ил.
3. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко. – М.: Наука, 2004 г., 448 с.: ил.
4. Сборник задач по теории надежности; под. ред. А.М. Половко, И.М. Маликова. – М.: Изд-во «Советское радио», 2002, 408 с., ил.

References

1. Anikevich K.P. *Sistemy upravleniya i zashhity reaktora VVJeR-1000* [Control systems and protection of the VVER-1000 reactor]: Studies. grant. Sevastopol, SNUPE&P, 2006, 208 p., silt
2. Kuznetsova N. I. *Nadezhnost' i diagnostirovanie* [Reliability and diagnosing] Collection of settlement and graphic works. Studies. Grant, Sevastopol, SNUPE&P, 2012, 68 p., silt.
3. Polovko A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Bases of the theory of reliability]. Moskow, Science, 2004, 448 p., silt.
4. *Sbornik zadach po teorii nadezhnosti* [Collection of tasks of the theory of reliability] Under. Edition of A.M. Polovko and I.M. Malikov. Moskow, Soviet Radio Publishing house, 2002, 408 pages, silt.

УДК 539.3:536.46

К расчету рабочих лопаток диагональных турбомашин

В.А. Пухлий¹, А.А. Журавлев²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹pu1611@rambler.ru

Статья поступила 16.02.2016 г.; после доработки 19.02.2016 г.

Аннотация

Рассматривается напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток диагональных турбомашин (насосы, компрессоры, нагнетатели) в поле действия сил инерции собственной массы лопаток. Двумерная краевая задача на основе метода интегральных соотношений приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, решение которой в дальнейшем осуществляется модифицированным методом последовательных приближений [1].

Ключевые слова: диагональные турбомашин, рабочие лопатки, прочность, двумерная краевая задача, модифицированный метод последовательных приближений.

To Calculation of Working Shovels of Diagonal Turbomachines

V.A. Pukhly¹, A.A. Zhuravlev²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹pu1611@rambler.ru

Received 16.02.2016 y.; received in final form 19.02.2016 y.

Abstract

The intense deformed condition of working shovels of diagonal turbomachines (pumps, compressors, superchargers) in an action field of forces of inertia of own mass of shovels is considered. The two-dimensional regional task on the basis of a method of integrated ratios is given to system of the ordinary differential equations with variable coefficients which decision is carried out further by the modified method of consecutive approximations [1].

Keywords: diagonal turbomachines, working shovels, durability, a two-dimensional regional task, the modified method of consecutive approximations.

Введение

В современном турбомашиностроении находят применение так называемые диагональные нагнетатели (радиально-осевые), у которых рабочая среда перемещается в колесе по диагонали между радиальным и осевым направлением. Широко используются в турбомашиностроении диагональные гидротурбины, насосы, нагнетатели.

В настоящей работе рассматривается расчет напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток диагональных турбомашин в поле действия центробежных сил инерции собственных масс лопаток. В качестве исходной системы

уравнений используются известные уравнения Маргерра [2].

Постановка цели и задач научного исследования

Целью научной работы является разработка метода расчета на прочность рабочих лопаток диагональных (радиально-осевых) турбомашин. Решены следующие подзадачи: построена математическая модель, при которой напряженно-деформированное состояние (НДС) лопатки описывается системой уравнений теории оболочек в частных производных Маргерра. В даль-

нейшем решение краевой задачи основано на использовании метода интегральных соотношений Дородницына [4] и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф. В.А. Пухлий [1,7,8].

Формулировка задачи

На рис. 1 представлена принципиальная схема диагонального нагнетателя.

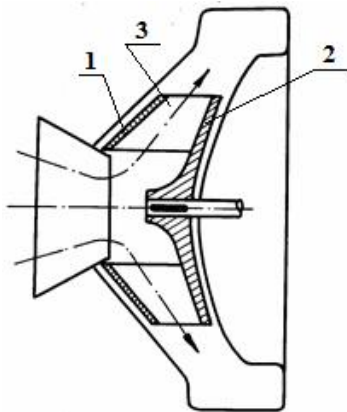


Рис. 1. Конструктивная схема диагонального нагнетателя: 1 – передний диск; 2 – задний диск; 3 – рабочая лопатка

На рис. 2. приведена геометрия и система координат лопатки диагонального нагнетателя. Лопатка такого нагнетателя представляет собой трапецевидную пологую оболочку, защемленную по двум непараллельным краям, прилегающим к дискам и свободную по двум другим краям.

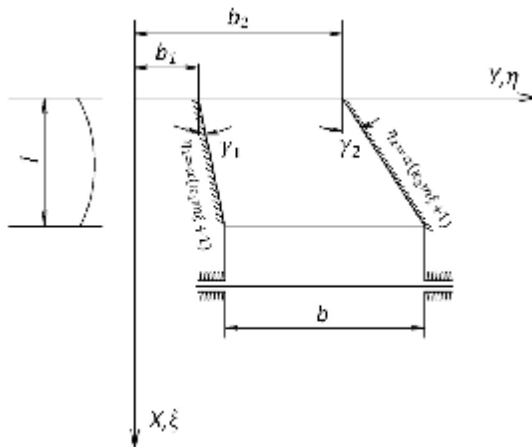


Рис.2. Геометрия и система координат лопатки диагонального нагнетателя

Напряженное состояние лопатки описывается линейными уравнениями теории пологих оболочек смешанного типа относительно нор-

мального перемещения $W(x, y)$ и функции напряжений $F(x, y)$ Маргерра [2]:

$$\left. \begin{aligned} D\nabla^2 \nabla^2 W - \frac{h}{R} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= q - p_x \frac{\partial W}{\partial x}; \\ \nabla^2 \nabla^2 F + \frac{E}{R} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} &= -(1-\nu) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь R и h – радиус срединной поверхности и толщина лопатки; E и D – модуль упругости и цилиндрическая жесткость лопатки; ∇^2 – оператор Лапласа; q и $p_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$ – нормальная и тангенциальная компоненты центробежной силы элемента лопатки, отнесенные к единице площади срединной поверхности:

$$q = \frac{\gamma \omega^2}{g} \rho h \sin \beta; \quad p_x = \frac{\gamma \omega^2}{g} \rho h \cos \beta. \quad (2)$$

Для тангенциальной нагрузки p_x запишем потенциал:

$$U = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} \omega^2 h (R_2 \sin \beta_2 - x)^2, \quad (3)$$

где γ – объемный вес материала лопатки; g – гравитационное ускорение; ρ – расстояние от оси вращения ротора до центра тяжести элемента лопатки; $\omega = \pi n / 30$ – угловая скорость вращения ротора; h – толщина лопатки; β – угол между направлением центробежной силы и поверхностью лопатки; β_1 и β_2 – углы входа и выхода потока; R_2 – радиус колеса.

Лопатка по краям $y_1 = k_1 x + b_1 = r$ и $y_2 = k_2 x + b_2 = \alpha r$ свободно защемлена (допускается смещение кромок в плоскости лопатки). При этом $k_1 = \operatorname{tg} \gamma_1$, $k_2 = \operatorname{tg} \gamma_2$, $\alpha = -\frac{k_2}{k_1} = -\frac{b_2}{b_1}$ – геометрические параметры лопатки.

Граничные условия для прогиба $W(x, y)$ будут:

$$W = \frac{\partial W}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия для функций напряжений при отсутствии объемных сил и нагрузки на контуре записываются аналогично [3]:

$$F = \frac{\partial F}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

Для свободных краев $x = 0$, $x = 1$ граничные условия имеют вид:

– для функций прогиба $W(x, y)$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} &= 0; \\ \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial y^2} &= 0;\end{aligned}\quad (6)$$

– для функции напряжений $F(x, y)$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = 0. \quad (7)$$

Введем безразмерные координаты

$$\xi = \frac{x}{l}, \quad \eta = \frac{y}{b_1}.$$

Тогда уравнения (1) переписутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \nabla_m^4 \bar{W} - sm^2 \frac{l^2 E p}{D} \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \eta^2} &= 1 - \frac{p_x l^3}{D} \frac{\partial \bar{W}}{\partial \xi}; \\ \nabla_m^4 \bar{F} + m^2 \frac{l^2}{p R} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \eta^2} &= -\frac{(1-\nu) l^2}{p^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь

$$s = \frac{h}{R}, \quad m = \frac{1}{b_1} \quad \text{– геометрические параметры}$$

лопатки;

$$p = \frac{q l^4}{D} \quad \text{– параметр нагрузки;}$$

$$\bar{W} = \frac{W}{p}, \quad \bar{F} = \frac{F}{p^2 E} \quad \text{– безразмерные величины}$$

функции прогибов и
функции напряжений.

Линейный дифференциальный оператор ∇_m^4 будет:

$$\nabla_m^4 = \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + 2m^2 \frac{\partial^4}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + m^4 \frac{\partial^4}{\partial \eta^4}.$$

Граничные условия (6) примут вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \eta^2} &= 0; \\ \frac{\partial^3 \bar{W}}{\partial \xi^3} + (2-\nu) m^2 \frac{\partial^3 \bar{W}}{\partial \xi \partial \eta^2} &= 0,\end{aligned}\quad (9)$$

а граничные условия (7) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \eta^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \xi \partial \eta} = 0. \quad (10)$$

Решение краевой задачи

К решению системы уравнений (8) применяется метод интегральных соотношений Дородницына. В соответствии с методом предста-

вим исходную систему уравнений в дивергентной форме:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \eta} + \bar{L} = 0, \quad (11)$$

где векторы $\bar{X}$, $\bar{Y}$ и $\bar{L}$ запишутся следующим образом:

$$\bar{X} = \{X_i\} = \{w, z_1, z_2, z_3, F, z_4, z_5, z_6\};$$

$$\bar{Y} = B_0 \bar{X} + B_1 \frac{\partial \bar{X}}{\partial \eta} + B_2 \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial \eta^2} + B_3 \frac{\partial^3 \bar{X}}{\partial \eta^3};$$

$$\bar{L} = B \bar{X} + \bar{b}.$$

При этом элементы матриц $B_r = \{b_{mn}^r\}$ и $B = \{b_{mn}\}$ ($r = 0, 1, 2, 3$; $m, n = 1, 2, \dots, 8$) принимают следующие значения:

$$b_{14}^3 = b_{58}^3 = m^4; \quad b_{18}^1 = -\frac{sm^2 l^2}{p};$$

$$b_{34}^1 = b_{78}^1 = 2m^2;$$

$$b_{54}^1 = \frac{m^2 E l^2 p^2}{R D};$$

$$b_{24} = \frac{p l^3}{D}; \quad b_{34} = -\frac{U l^2}{D};$$

$$b_{21} = b_{32} = b_{43} = b_{65} = b_{76} = b_{87} = -1.$$

Остальные элементы равны нулю. Компоненты вектора $\bar{b}$ равны:

$$b_4 = -1 + \frac{U l^4}{p R D}; \quad b_8 = \frac{(1-\nu) l^2}{p^3 E} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2};$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = b_5 = b_6 = b_7 = 0.$$

В соответствии с методом интегральных соотношений Дородницына представим решение системы уравнений в частных производных (8) следующим образом:

$$X_i(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^n X_{ij}(\xi) P_j(\xi, \eta) \quad (12)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 8),$$

где $P_j(\xi, \eta)$ – система аппроксимирующих функций, удовлетворяющих граничным условиям (4) и (5); $X_{ij}(\xi)$ – искомые функции.

Ограничиваясь двухчленным приближением, представим аппроксимирующие функции в виде степенных полиномов Якоби [5,6]:

$$P_j(\xi, \eta) = P_1(\xi, \eta) \sum_{r=1}^n \left[\eta - \frac{(1+\alpha)r}{2} \right]^{j-1};$$

$$P_1(\xi, \eta) = \eta^4 - 2(1 + \alpha)r\eta^3 + (1 + 4\alpha + \alpha^2)r^2\eta^2 - 2\alpha(1 + \alpha)r^3\eta + \alpha^2r^4. \quad (13)$$

Здесь $r = 1 + k_1 m \xi$ – уравнение наклонной стороны лопатки. Полиномы Якоби $P_j(\xi, \eta)$ ортогональны на отрезке $[h_1, h_2]$ и, образуя систему линейно независимых функций, удовлетворяют граничным условиям на косых краях лопатки.

Выбирая в качестве весовых функций также полиномы $P_j(\xi, \eta)$, после применения процедуры метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений дивергентного типа (11), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений порядка $8n$ с переменными коэффициентами неэйлеровского вида, которая ниже представлена в нормальной форме Коши:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^{m^*} A_{m,v} X_v + f_m \quad (m = 1, 2, \dots, m^*), \quad (14)$$

где v – номер неизвестной функции; m – номер уравнения ($m^* = 16$), $A_{m,v}$ – переменные коэффициенты; f_m – свободные члены.

Подчеркнем, что в общем случае точное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами неизвестно. Здесь к интегрированию системы уравнений (14) применяется модифицированный метод последовательных приближений, позволяющий в линейных задачах получить точное решение задачи.

Применение модифицированного метода последовательных приближений к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами

В соответствии с методом [7, 8] переменные коэффициенты $A_{m,v}$ и свободные члены f_m представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной:

$$A_{m,v} = \sum_{k=0}^q a_{m,v,k} \xi^k; \quad f_m = \sum_{k=0}^q f_{m,k} \frac{\xi^k}{k!}. \quad (15)$$

Общее решение системы дифференциальных уравнений (14) запишется следующим образом:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{m^*} C_\mu \left[\frac{\xi^{\mu m}}{(\mu - m)!} \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] + \sum_{j=0}^q b_{m,j,o} \frac{\xi^{j+1}}{(j+1)!} + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n} \quad (16)$$

$$(m = 1, 2, \dots, m^*),$$

где $b_{m,j,o} = f_{m,k}$ при $j = k$; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования. В решении (16) $\delta = 1$, если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ .

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,\mu,n,j} \frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!};$$

$$X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,n,j} \frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!},$$

где

$$\beta = (q + 3) - 2. \quad (17)$$

Коэффициенты $b_{m,\mu,n,j}$ и $b_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$b_{m,\mu,n,j} = \sum_{v=1}^{m^*} \sum_{k=0}^q a_{v,m,k} b_{v,\mu,n-1,j-k} \times b_{m,n,j} =$$

$$= \sum_{v=1}^{m^*} \sum_{k=0}^q a_{v,m,k} b_{v,n-1,j-k} \frac{1}{(n+j)} \prod_{\gamma=0}^k (n+j-\gamma) \times$$

$$\times \frac{1}{(n+j-1)} \prod_{\gamma=0}^k (n+j-1-\gamma) \quad (18)$$

Постоянные C_μ , входящие в общее решение системы уравнений (16), находятся из граничных условий на двух других краях лопатки.

В соответствии с методом интегральных соотношений запишем граничные условия по входной ($\xi = 1$) и выходной ($\xi = 0$) кромкам для определения констант интегрирования C_μ в решении (16):

$$X_5 - 12 \frac{vm^2}{r^2(1-\alpha)^2} X_1 = 0;$$

$$X_6 - 44 \frac{vm^2}{r^2(1-\alpha)^2} X_2 = 0;$$

$$X_7 - 12 \frac{(2-v)m^2}{r^2(1-\alpha)^2} X_3 = 0;$$

$$X_8 - 44 \frac{(2-v)m^2}{r^2(1-\alpha)^2} X_4 = 0;$$

$$X_9 = \frac{7}{4} \frac{1}{m^2 r^2 (1-\alpha)^2} \frac{U l^2}{p^3 E};$$

$$X_{10} = X_{11} = X_{12} = 0. \quad (19)$$

Запишем выражения для напряжений:

$$\sigma_\xi = \frac{\sigma_x l^2}{E h p} = \frac{m^2 p^2}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \eta^2} - \frac{1}{2(1-\nu^2)} \times$$

$$\times \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \gamma m^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} \right) + \frac{U l^2}{E p h^2};$$

$$\sigma_\eta = \frac{\sigma_y l^2}{E h p} = \frac{p^2}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \xi^2} - \frac{1}{2(1-\nu^2)} \times$$

$$\times \left(m^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right);$$

$$\sigma_{\xi\eta} = \frac{\sigma_{xy} l^2}{E h p} = -\frac{m p^2}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \xi \partial \eta} - \frac{m}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \eta}. \quad (20)$$

На рис. 3 представлены эпюры напряжений в лопатке диагонального нагнетателя.

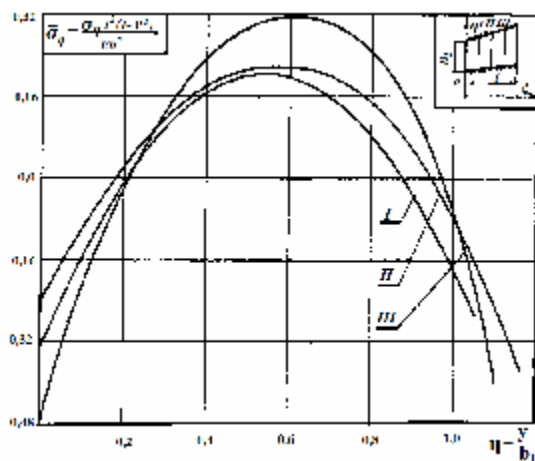


Рис.3. Распределение напряжений $\bar{\sigma}_h$ по лопатке диагонального нагнетателя

Пример расчета

В соответствии с изложенным выше аналитическим решением задачи разработана программа численной реализации полученного решения применительно к ЭВМ. В качестве приложения применим предложенный подход к исследованию напряженного состояния лопатки диагонального нагнетателя.

Исходные данные для расчета. Для колеса: $R_k = 40$ см; $\beta_2 = 45^\circ$; $z = 8$ – количество лопаток; $n = 1500$ об/мин. Для лопатки: $l = 20$ см; $m = 1$; $\gamma_1 = 10^\circ$; $\alpha = 2$. Материал лопатки – Сталь-20.

Заключение

Разработана математическая модель расчета НДС рабочих лопаток диагональных турбомашин (радиально-осевых) на основе теории полых оболочек Маргерра.

Для сведения двумерной краевой задачи, описываемой системой дифференциальных уравнений в частных производных, к системе обыкновенных дифференциальных уравнений в общем случае с переменными коэффициентами, используется метод интегральных соотношений Дородницына. В дальнейшем, интегрирование полученной системы уравнений осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф. В.А. Пухлий [1, 7, 8].

Список литературы

1. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений / В.А. Пухлий // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2015. – Т. 22. – Вып. 4. – С. 493 - 495.
2. Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. – Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrtforschung, Bd1, 1939, pp. 413 - 418.
3. Григолюк Э.И. Изгиб цилиндрической панели с трапециевидным контуром / Э.И. Григолюк, В.Е. Попович, В.А. Пухлий // Теория оболочек и пластин. – М.: Наука, 1973. – С. 660 - 664.
4. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэродинамики / А.А. Дородницын // Труды 3-го Всесоюзного математического съезда. – М.: Наука, 1958. – Т. III. – С. 447 - 453.
5. Lantosh K. Practical methods of the applied analysis. – М.: Fizmatgiz, 1961, - 524 p.
6. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximations. – New-York-London: Academic Press Inc., 1975. – 608 p.
7. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений / В.А. Пухлий // Журн. вычислит. математ. и матем. физики, 1978. – Т. 18. – № 5. – С. 1275 - 1282.
8. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики / В.А. Пухлий // Дифференциальные уравнения, 1979. – Т. 15. – № 11. – С. 2039 - 2043.

References

1. Puhly V.A. The solution of initial and regional problems of mathematical physics by the modified method of consecutive approximations. *Obozrenije prikladnoj i promyshlennoj matematiki*, - Review of

- applied and industrial mathematics 2015. V. 22, No. 4, pp. 493 - 495.
2. Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. - Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrtforschung, Bd1, 1939, pp. 413 - 418.
 3. Grigolyuk E.I., Popovic V.E., Izgib V.A. Is chub-bier than the cylindrical panel with a trapezoid contour. - In book: *Teorija obolochek i plastin. Theory of covers and plates*. Moskow, Nauka, 1973, pp. 660 - 664.
 4. Dorodnitsyn A.A. About one method of the numerical solution of some nonlinear problems of aero hydrodynamics. *Trudy tret'ego vsesojuznogo matematicheskogo s'ezda* [Proceedings of the 3rd All-union Mathematical congress]. - Moskow, Nauka, 1958, Vol. 3, pp. 447 - 453.
 5. Lantsosh K. Practical methods of the applied analysis. - M.: Fizmatgiz, 1961. - 524 pages.
 6. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximations. New-York-London: Academic Press Inc., 1975. - 608 p.
 7. Puhly V.A. Method of the analytical solution of two-dimensional regional problems for systems of the elliptic equations. *Zhurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1978, Vol. 18, No. 5, pp. 1275 - 1282.
 8. Puhly V.A. About one approach to the solution of regional problems of mathematical physics. *Differentsialnyye uravneniya* [Differential equations], 1979, V. 15, No. 11, pp. 2039 - 2043.

УДК 621.175

Математическая модель определения нормативных значений давления пара и температурного напора в конденсаторе К-12150

И.Ю. Софийский¹, С.Т. Мирошниченко², Коваль В.А.³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹ttdev@yandex.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com, ³V.A.Koval@sevsu.ru

Статья поступила 14.03.2016 г.; после доработки 17.03.2016 г.

Аннотация

Выполнен анализ типовых энергетических характеристик конденсатора К-12150 турбины К-500-65/3000. Разработаны математические модели определения нормативных значений абсолютного давления пара и температурного напора конденсатора в зависимости от расхода пара в конденсатор, температуры и расхода охлаждающей воды. Полученные математические модели позволяют объективно определять в реальном масштабе времени техническое состояние конденсационной установки путем сравнения измеренных характеристик и определенных расчетным путем, а также дают возможность прогнозировать ухудшение эксплуатационных показателей конденсаторов.

Ключевые слова: конденсатор, турбина, характеристика, математическая модель, эксплуатация, прогнозирование.

Mathematical Model of Definition of Standard Values of Pressure of Steam and Temperature Pressure in the Condenser K-12150

I.J.Sofijsky¹, S.T.Miroshnichenko², V.A. Koval

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹ttdev@yandex.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com, ³V.A.Koval@sevsu.ru

Received 14.03.2016 y.; received in final form 17.03.2016 y.

Abstract

In article the analysis of typical power characteristics of condenser K-12150 of turbine K-500-65/3000 is made. Mathematical models of definition of standard values of absolute pressure of steam and a temperature pressure of the condenser depending on steam expense in the condenser, temperature and the expense of cooling water are developed. The received mathematical models allow to define objectively in real time a technical condition of installation by comparison of the measured characteristics and defined settlement by, and also give the chance to predict deterioration of operational indicators of condensers.

Keywords: the condenser, the turbine, the characteristic, mathematical model, operation, forecasting.

Введение

Основными показателями конденсационной установки, характеризующими состояние оборудования при заданной паровой нагрузке конденсатора, расходе и температуре охлаждающей воды, является давление отработавшего пара в конденсаторе и отвечающий этим условиям температурный напор конденсатора [1].

Контроль за работой конденсационной ус-

тановки и состоянием конденсатора осуществляется сопоставлением измеренных в условиях эксплуатации фактических давления пара в конденсаторе и температурного напора с определенными для тех же условий значениями нормативного давления и температурного напора в конденсаторе. Нормативные значения контролируемых параметров определяются по соответствующим графикам Типовой энергетической характеристики конденсаторов [2]. Эти характери-

стики составлены на основе тепловых расчетов конденсаторов и данных испытаний.

Обнаружение изменения работы конденсационной установки путем сравнения данных, полученных путем непосредственного измерения и определенных по соответствующим графикам, во-первых, является субъективным, а во-вторых, не дает возможность прогнозировать ухудшение эксплуатационных показателей конденсаторов.

Постановка цели и задач исследования

Целью данной работы является разработка математической модели определения нормативного значения абсолютного давления и температурного напора в конденсаторе К-12150 в зависимости от расхода пара в конденсатор, температуры и расхода охлаждающей воды.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить анализ графиков Типовой энергетической характеристики конденсатора и определить функциональные зависимости между факторами, влияющими на абсолютное давление и температурный напор в конденсаторе.

Анализ номограмм для определения давления в конденсаторе К-12150

Основной эксплуатационной характеристикой является зависимость давления в конденсаторе p_2 от расхода пара в конденсатор (паровой нагрузки конденсатора) D_2 и температуры охлаждающей воды $t_{1в}$ при данном ее расходе W [3].

Типовые энергетические характеристики построены для сезонного изменения температуры охлаждающей воды от 0 до 33 °С, расходов охлаждающей воды изменяющихся от 0,7 до 1,2 номинального значения и для диапазона паровой нагрузки от 50 до 100 %.

Для конденсатора К-12150 типовые энергетические характеристики представляют собой три номограммы зависимости абсолютного давления пара в конденсаторе от паровой нагрузки в пределах 900...1900 т/ч и температуры охлаждающей воды от 0 до 33 °С при трех расходах охлаждающей воды 66500 м³/ч, 95000 м³/ч и 115000 м³/ч.

Эти характеристики были составлены для конденсаторов с эксплуатационно чистой поверхностью теплообмена (коэффициент чистоты $\alpha = 0,75$) [2].

При построении эксплуатационных характеристик конденсатора расчетным путем давление пара p_2 находилось по температуре насыще-

ния [3]. Из теории расчета поверхностных конденсаторов известно, что температуру пара в конденсаторе можно определить по формуле

$$t_k = t_{1в} + \Delta t + \delta t,$$

где $t_{1в}$ – температура поступающей в конденсатор охлаждающей воды, °С;

Δt – нагрев охлаждающей воды в конденсаторе, К;

δt – температурный напор, К.

Из уравнения теплового баланса следует, что нагрев охлаждающей воды прямо пропорционален паровой нагрузке конденсатора и обратно пропорционален расходу охлаждающей воды.

Температурный напор является при заданных значениях поверхности теплообмена конденсатора и расходе охлаждающей воды функцией среднего коэффициента теплопередачи конденсатора, который относится обычно к средней логарифмической разности температур пара и охлаждающей воды.

Таким образом, можно предположить, что зависимости p_2 и δt от расходов пара и охлаждающей воды должны описываться линейными уравнениями, а зависимости p_2 и δt от температуры охлаждающей воды – экспоненциальными или квадратными уравнениями.

Методами подбора эмпирических формул были проанализированы номограммы [4].

Анализ номограмм показал, что зависимость давления в конденсаторе от расхода пара при $t_{1в} = \text{const}$ и $W = \text{const}$ представляет собой линейную функцию вида

$$p_2 = a + bD_2,$$

а коэффициенты a и b в зависимости от $t_{1в}$ описываются экспоненциальными зависимостями

$$a = c \exp(dt_{1в}), \quad b = f \exp(gt_{1в}). \quad (1)$$

Зависимость давления в конденсаторе от расхода пара и температуры охлаждающей воды при $W = 66500$ м³/ч принимает вид

$$p_2 = 1,00265 \exp(0,0417t_{1в}) + [0,001437 \exp(0,0433t_{1в})]D_2.$$

Результаты выборочных сравнений значений давления в конденсаторе, полученных по номограмме $p_{2н}$ и расчетным путем $p_{2р}$, представлены в таблице 1.

Зависимость давления в конденсаторе от расхода пара и температуры охлаждающей воды при $W = 95000$ м³/ч принимает вид

$$p_2 = 0,457 \exp(0,067t_{1в}) + [0,001 \exp(0,04t_{1в})]D_2$$

Таблица 1. Значения давления в конденсаторе в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и $W = 66500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$							
	4		12		20		25	
	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа
1000	3,0	2,89	4,0	4,07	5,65	5,73	7,05	7,09
1300	3,5	3,41	4,65	4,79	6,55	6,75	8,15	8,36
1600	4,04	3,92	5,4	5,52	7,55	7,77	9,45	9,63
1900	4,7	4,43	6,2	6,24	8,8	8,54	10,9	10,9

Результаты сравнений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения давления в конденсаторе в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и $W = 95000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$							
	4		12		20		25	
	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа
1000	1,77	1,77	2,65	2,64	4,0	3,98	5,25	5,16
1300	2,15	2,12	3,0	3,12	4,68	4,64	6,0	5,98
1600	2,5	2,48	3,5	3,6	5,25	5,3	6,85	6,8
1900	2,95	2,8	4,05	4,09	6,0	5,97	7,8	7,6

Зависимость давления в конденсаторе от расхода пара и температуры охлаждающей воды при $W = 115000 \text{ м}^3/\text{ч}$ принимает вид

$$p_2 = 0,4464 \exp(0,068 t_{1в}) + [0,001021 \exp(0,0397 t_{1в})] D_2.$$

Результаты сравнений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения давления в конденсаторе в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и $W = 115000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$							
	4		12		20		25	
	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа
1000	1,72	1,78	2,65	2,65	4,0	4,0	5,25	5,2
1300	2,1	2,14	3,0	3,15	4,6	4,68	6,0	6,02
1600	2,5	2,5	3,5	3,64	5,25	5,35	6,8	6,85
1900	2,9	2,86	4,1	4,13	6,0	6,03	7,75	7,68

Анализ таблиц 1, 2 и 3 показывает, что понижение расхода охлаждающей воды на 30 % от номинального повышает давление в конденсаторе, а повышение расхода воды на 20 % от номинального практически не влияет на давление. Поэтому было получено два уравнения для определения давления в конденсаторе в зависимости от изменения расхода пара, расхода и температуры охлаждающей воды.

Коэффициенты c , d , f , g из уравнений (1)

описываются линейной функцией в зависимости от расхода охлаждающей воды.

Зависимость давления в конденсаторе от расхода пара и температуры охлаждающей воды при расходе охлаждающей воды от $66500 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $95000 \text{ м}^3/\text{ч}$ имеет вид

$$p_2 = (2,276 - 1,915 \cdot 10^{-5} W) \times \exp(-0,0173 + 8,877 \cdot 10^{-7} W) t_{1в} + \left[(0,00246 - 1,533 \cdot 10^{-8} W) \exp(0,0495 - 9,228 \cdot 10^{-8} W) t_{1в} \right] D_2,$$

а при расходе охлаждающей воды от $95000 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $115000 \text{ м}^3/\text{ч}$

$$p_2 = (0,5074 - 5,3 \cdot 10^{-8} W) \times \exp(0,0623 + 5 \cdot 10^{-8} W) t_{1в} + \left[(0,0009 - 1,05 \cdot 10^{-9} W) \exp(0,0455 - 5 \cdot 10^{-8} W) t_{1в} \right] D_2.$$

Результаты выборочных сравнений значений давления в конденсаторе, полученных по номограммам и расчетным путем, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Значения давления в конденсаторе в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и W .

W , $\text{м}^3/\text{ч}$	D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$					
		12		20		25	
		$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа	$p_{2н}$, кПа	$p_{2р}$, кПа
66500	1000	4,0	4,08	5,65	5,74	7,05	7,1
	1300	4,65	4,8	6,55	6,77	8,15	8,38
	1600	5,4	5,53	7,55	7,8	9,45	9,66
	1900	6,2	6,26	8,63	8,83	10,9	10,94
95000	1000	2,65	2,66	4,0	4,01	5,25	5,22
	1300	3,0	3,15	4,68	4,69	6,0	6,05
	1600	3,5	3,64	5,25	5,37	6,85	6,89
	1900	4,05	4,13	6,0	6,05	7,8	7,72
115000	1000	2,65	2,78	4,0	4,2	5,25	5,5
	1300	3,05	3,27	4,6	4,9	6,0	6,33
	1600	3,5	3,77	5,25	5,57	6,8	7,16
	1900	4,1	4,26	6,0	6,25	7,75	8,0

Анализ номограмм для определения температурного напора конденсатора К-12150

Температурный напор конденсатора определяется как разность между температурой насыщения отработавшего пара и температурой охлаждающей воды на выходе из конденсатора [2].

Зависимости температурного напора конденсатора Δt от расхода пара в конденсатор, температуры и расхода охлаждающей воды, в [2] также представлены на трех номограммах.

Из анализа номограмм установлено, что зависимость температурного напора конденсатора от расхода пара при $t_{1в} = \text{const}$ и $W = \text{const}$ представляет собой линейную функцию вида

$$dt = k + mD_2,$$

При этом коэффициент k в зависимости от $t_{1в}$ описывается экспоненциальной зависимостью

$$k = n \exp(rt_{1в}), \quad (2)$$

а коэффициент m – квадратным уравнением

$$m = q + st_{1в} + zt_{1в}^2. \quad (3)$$

Зависимость температурного напора конденсатора от расхода пара и температуры охлаждающей воды при $W = 66500 \text{ м}^3/\text{ч}$ принимает вид

$$dt = 3,388 \exp(-0,1129t_{1в}) + (0,00309 - 7,948 \cdot 10^{-5}t_{1в} + 1,9886 \cdot 10^{-6}t_{1в}^2)D_2.$$

Результаты выборочных сравнений значений температурного напора конденсатора, полученных по номограмме δt_n и расчетным путем δt_p , представлены в таблице 5.

Таблица 5. Значения температурного напора конденсатора в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и $W = 66500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$							
	4		12		20		25	
	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$
1000	4,9	4,96	3,25	3,3	2,65	2,65	2,55	2,55
1300	5,6	5,8	3,95	4,02	3,3	3,34	3,2	3,25
1600	6,5	6,64	4,72	4,75	4,0	4,03	3,9	3,95
1900	7,5	7,48	5,48	5,48	4,75	4,72	4,57	4,66

Зависимость температурного напора конденсатора от расхода пара и температуры охлаждающей воды при $W = 95000 \text{ м}^3/\text{ч}$ принимает вид

$$dt = 3,3082 \exp(-0,1194t_{1в}) + (0,00376 - 10,8 \cdot 10^{-5}t_{1в} + 1,997 \cdot 10^{-6}t_{1в}^2)D_2.$$

Результаты сравнений представлены в таблице 6.

Таблица 6. Значения температурного напора конденсатора в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и $W = 95000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$							
	4		12		20		25	
	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$
1000	5,35	5,41	3,6	3,54	2,75	2,7	2,57	2,47
1300	6,23	6,42	4,3	4,37	3,45	3,42	3,3	3,17
1600	7,3	7,43	5,15	5,19	4,25	4,14	4,0	3,86
1900	8,4	8,44	6,05	6,02	5,0	4,86	4,65	4,55

Зависимость температурного напора конденсатора от расхода пара и температуры охлаждающей воды при $W = 115000 \text{ м}^3/\text{ч}$ принимает вид

$$\delta t = 3,256 \exp(-0,1165t_{1в}) + (0,00406 - 13,3 \cdot 10^{-5}t_{1в} + 2,516 \cdot 10^{-6}t_{1в}^2)D_2.$$

Результаты сравнений представлены в таблице 7.

Таблица 7. Значения температурного напора конденсатора в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и $W = 115000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$							
	4		12		20		25	
	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$
1000	5,53	5,61	3,7	3,63	2,82	2,72	2,5	2,48
1300	6,45	6,68	4,45	4,48	3,47	3,45	3,22	3,18
1600	7,6	7,75	5,3	5,33	4,27	4,17	3,95	3,87
1900	8,75	8,82	6,25	6,17	5,0	4,89	4,65	4,56

Коэффициенты n , r , q , s , z из уравнений (2) и (3) описываются линейной функцией в зависимости от расхода охлаждающей воды.

Зависимость температурного напора конденсатора от расхода пара и температуры охлаждающей воды при расходе охлаждающей воды от $66500 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $115000 \text{ м}^3/\text{ч}$ имеет вид

$$\delta t = (4,102 - 1,0739 \cdot 10^{-5}W) \times \exp(-0,0978 - 2,274 \cdot 10^{-7}W)t_{1в} + \left[0,00153 + 2,351 \cdot 10^{-8}W - \left(1,2933 \cdot 10^{-5} + 1,0007 \cdot 10^{-9}W \right)t_{1в} + (1,969 + 2,947 \cdot 10^{-7}W) \cdot 10^{-6}t_{1в}^2 \right] D_2.$$

Результаты выборочных сравнений значений температурного напора конденсатора, полученные по номограммам и расчетным путем, представлены в таблице 8.

Таблица 8. Значения температурного напора конденсатора в зависимости от $t_{1в}$, D_2 , и W .

W , $\text{м}^3/\text{ч}$	D_2 , т/ч	$t_{1в}, ^\circ\text{C}$					
		12		20		25	
		δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$	δt_n , $^\circ\text{C}$	δt_p , $^\circ\text{C}$
66500	1000	3,25	3,3	2,65	2,65	2,55	2,55
	1300	3,95	4,02	3,3	3,34	3,2	3,25
	1600	4,72	4,75	4,0	4,03	3,9	3,96
	1900	5,48	5,48	4,75	4,72	4,57	4,66
95000	1000	3,6	3,49	2,75	2,68	2,57	2,46
	1300	4,3	4,31	3,45	3,4	3,3	3,16
	1600	5,15	5,14	4,25	4,12	4,0	3,85
	1900	6,05	5,96	5,0	4,84	4,65	4,54
115000	1000	3,7	3,63	2,82	2,71	2,5	2,41
	1300	4,45	4,53	3,47	3,45	3,22	3,1
	1600	5,3	5,42	4,27	4,19	3,95	3,78
	1900	6,25	6,31	5,0	4,94	4,65	4,47

Адекватность полученных моделей для определения давления и температурного напора в конденсаторе оценивалась отклонением расчетных значений от значений снятых с номограмм.

Для областей с температурой охлаждающей воды больше 7 °С и номинальном или меньшем ее расходе отклонение не превысило 5 %. В других областях оно составляло 6...8 %.

Заключение

Подтверждена возможность создания, с достаточной точностью, математических моделей определения нормативных значений давления пара и температурного напора в конденсаторе К-12150.

Использование разработанных моделей позволяет исключить субъективный (человеческий) фактор в обнаружении изменений в работе конденсационной установки и установления вероятных причин ухудшения эксплуатационных показателей.

Использование математических моделей в системах диагностики конденсационной установки дает возможность прогнозирования ее технического состояния.

Список литературы

1. Зезюлинский Г.С. Основы эксплуатации конденсационных установок турбин АЭС: учеб. пособие / Г.С. Зезюлинский. – Севастополь: СНИЯЭ-иП, 2002. – 148 с.

2. ТХ-34-70-016-85 Типовая энергетическая характеристика конденсаторов К-10120 и К-12150 турбины К-500-65/3000 ПОАТ ХТЗ. – М: Союзтехэнерго, 1987. – 21 с.
3. РД 34-30.104-81 Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций. – М: Союзтехэнерго, 1982. – 106 с.
4. Софийский И.Ю. Теория и практика научных исследований: учеб. пособие / И.Ю. Софийский. – Севастополь: СТУЭиП, 2011. – 400 с.

References

1. Zezjulinsky G.S. *Osnovi ekspluatatsii kondensacionnih ustanovok turbin AES* [Bases of operation of condenser installations of turbines of the atomic power station], Sevastopol, SNIYaEiP, 2002, 148 p.
2. *ТХ-34-70-016-85 Tipovaj energetičeskaj harakteristika kondensatorov K-10120 i K-12150 turbini K-500-65/3000 POAT HTZ* [ТХ-34-70-016-85 The Typical power characteristic of condensers K-10120 and K-12150 turbines K-500-65/3000 POAT HTZ], Moscow, Uniontehenergo, 1987, 21 p.
3. *RD-34-30.104-81 Rukovodjsie ukazaniy po teplovomu raschetu poverhnostnih kondensatorov mosnih turbin teplovih i atomnih elektrostanciy* [RD 34-30.104-81 Guidelines by thermal calculation of superficial condensers of powerful turbines thermal and atomic power stations]. Moskov, Uniontehen-ergo., 1982, 106 p.
4. Sofijsky I.J. *Teorij i prartika nauchnih isslidovaniy* [The theory and practice of scientific researches], Sevastopol, SNUYaEiP, 2011, 400 p.

УДК 621.039.588

Моделирование пространственно-неоднородного потока в верхней камере смешивания реактора ВВЭР-1000 с использованием одномерных кодов

А.А. Чуклин¹, А.В. Чуклина²

¹АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных станций»,
ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия. Chuklin.Aleksey@gmail.com

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, Chuklina-85@yandex.ru

Статья поступила 24.02.2016 г.; после доработки 26.02.2016 г.

Аннотация

Представлена возможность физически корректного моделирования процессов тепло-массопереноса в однофазных средах с помощью одномерных компьютерных кодов. Производится анализ влияния детализации нодализационной схемы верхней камеры смешивания реактора ВВЭР-1000 на физическую корректность результатов расчета, выполненных с использованием кода Melcor.

Ключевые слова: моделирование, расчетные коды, атомная энергетика, реактор, верхняя камера смешивания, безопасность.

Simulation of Spatially Inhomogeneous Flow in the Upper Mixing Chamber of WVER-1000b by Means of One-dimensional Codes

A. Chuklin¹, A. Chuklina²

¹JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation»,
25 Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia, Chuklin.Aleksey@gmail.com

²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, Chuklina-85@yandex.ru

Received 24.02.2016 y.; received in final form 26.02.2016

Abstract

This paper describes the possibility of the physically correct simulation of heat and mass transfer in single-phase flow using the one-dimensional computer code. It's shown the analysis of influence of nodalization schema detail of the WVER-1000 reactor upper plenum on the physical correctness of the calculation results, performed using the computer code MELCOR.

Keywords: simulation, computer codes, nuclear energy, reactor, upper plenum, safety.

Введение

Для анализа динамики переходных процессов, в том числе и аварийных, протекающих в оборудовании ЯЭУ, широко используются расчетные коды. Большинство используемых кодов построены на одномерном по пространственной координате приближенном описании гидродинамики. Для получения корректной информации

о протекании процессов в оборудовании необходимо прибегать к более детальной нодализации моделируемых элементов. Одна из задач, стоящих перед разработчиком компьютерной модели, заключается в выборе оптимального количества элементов нодализационной схемы. В статье рассматривается возможность физически корректного моделирования пространственного потока с помощью кода Melcor [1].

Производится анализ влияния детализации нодализационной схемы верхней камеры смешивания (ВКС) реактора ВВЭР-1000 на физическую корректность результатов расчета.

Наличие корректно работающей модели является необходимым инструментальным средством для решения основной задачи – расчетного обоснования экспресс-методов анализа состояния реакторной установки (РУ) при переходных и, в том числе, аварийных процессах.

Моделирование энергоустановки с помощью кода Melcor является актуальным, так как рассматриваемая программа была принята к использованию для АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в рамках региональных проектов МАГАТЭ RER/9/004 и RER/9/020.

Расчетная программа Melcor разработана в Национальной лаборатории Sandia (США) по заказу US NRC и является интегральным кодом, предназначенным для моделирования всего спектра явлений, сопровождающих протекание тяжелых аварий на АЭС с легководяными реакторами.

Анализ научных публикаций показал, что, несмотря на широкое применение компьютерных кодов для анализа тяжелых аварий АЭС [2, 3], не уделяется достаточного внимания научному обоснованию детализации нодализационных схем энергоустановок и задания их исходных данных.

В элементах энергоустановки, таких как верхняя камера смешивания, могут возникать радиальные неравномерности потока жидкости. В случае ВКС, этот процесс может возникать в результате отключения одного или нескольких главных циркуляционных насосов (ГЦН). При моделировании энергоустановки одномерными кодами необходимо учесть данный фактор [4].

В случае упрощенного моделирования программа может не учесть некоторые физические процессы, в частности:

- конвекцию (например, разогрев недогретого теплоносителя в компенсаторе давления и т.п.);
- перетоки сред между участками моделируемого объекта (например, верхняя камера смешивания реактора, заданная одним контрольным объемом, не позволит учесть перетоки теплоносителя при отключении одного из ГЦН);
- температурные изменения по длине и высоте объекта (например, разбивка трубчатки парогенератора на участки по длине и высоте).

С другой стороны, использование неоправданно детализированной нодализационной схемы приведет как к увеличению расчетного времени, так и к накоплению вычислительной погрешности.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – разработка модели верхней камеры смешивания, корректно отображающей протекающие в ней пространственно неоднородные процессы.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить расчетный эксперимент с использованием созданной математической модели ВКС, описанной системой дифференциальных уравнений;
- провести расчетный эксперимент разработанной трехмерной модели ВКС с использованием программного обеспечения SolidWorks;
- в рамках одномерных расчетных кодов создать идентичные квазитрехмерные модели ВКС, отличающиеся нодализацией верхней камеры смешивания.
- произвести сравнительный анализ экспериментальных и расчетных результатов моделирования ВКС.

Расчетный эксперимент с использованием математической модели

Системой дифференциальных уравнений описывается объем с движущимся теплоносителем. Нижнее основание моделируемого объема является источником жидкости, а верхнее – стоком. Т.е. внутри объема присутствует установившийся поток, направленный снизу вверх. К границе основания объема подводится «трубопровод», который также является источником жидкости. Для создания радиальной неравномерности поля скоростей, движение жидкости из подводящего «трубопровода» имеет более высокую скорость, чем скорость основного потока.

Система дифференциальных уравнений состоит из уравнений Навье-Стокса и из уравнения неразрывности [5]. Уравнение Навье-Стокса (1) является уравнением, описывающим изменение скорости во времени и пространстве, которое в переменных «скорость - давление» имеет вид

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + (w \nabla) w = -\frac{\nabla P}{\rho} + \mu \Delta w, \quad (1)$$

где w – скорость, м/с; τ – время, с; ρ – плотность, кг/м³; P – давление, Па; μ – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; Δ – оператор Лапласа; ∇ – оператор Набла.

Рассматриваемый процесс является стационарным, следовательно,

$$\frac{\partial w}{\partial t} = 0.$$

Для описания моделируемого процесса будет решена трехмерная задача. Исходя из этого, система уравнений будет включать в себя три уравнения Навье-Стокса, описывающих изменение проекций скорости на оси OX, OY и OZ в пространстве

$$\begin{cases} w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + m \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + m \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \\ w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + m \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \end{cases}$$

Уравнение неразрывности представлено в виде

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0.$$

Система дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемую задачу, имеет вид:

$$\begin{cases} w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + m \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + m \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \\ w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + m \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

Полученная система уравнений решена методом конечных элементов при помощи программного пакета Flexpde. Сетка моделируемой установки, полученная с использованием расчетной компьютерной программы Flexpde, представлена на рис. 1.

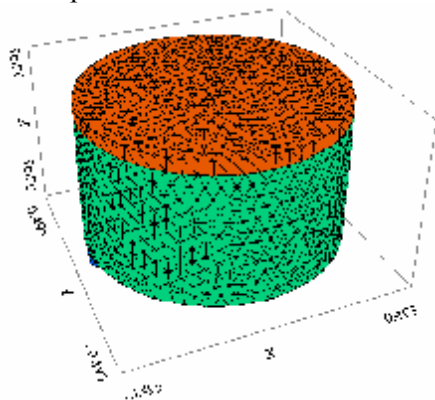


Рис. 1. Сетка моделируемой установки

На рис. 2 представлено поле скоростей при отсутствии «трубопровода».

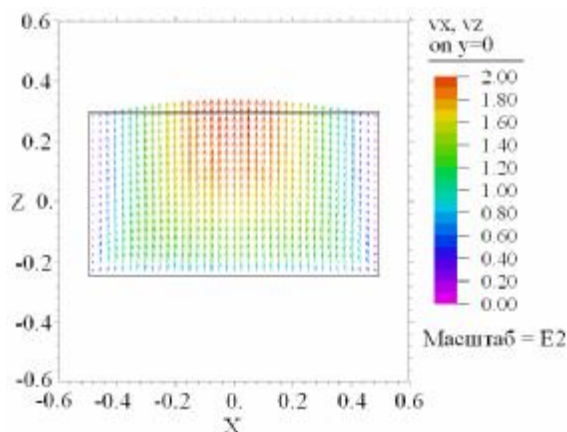


Рис. 2. Поле скоростей установившегося радиально-симметричного потока

При введении в систему радиальной неравномерности путем присоединения «трубопровода», поле скоростей примет вид, представленный на рис. 3.

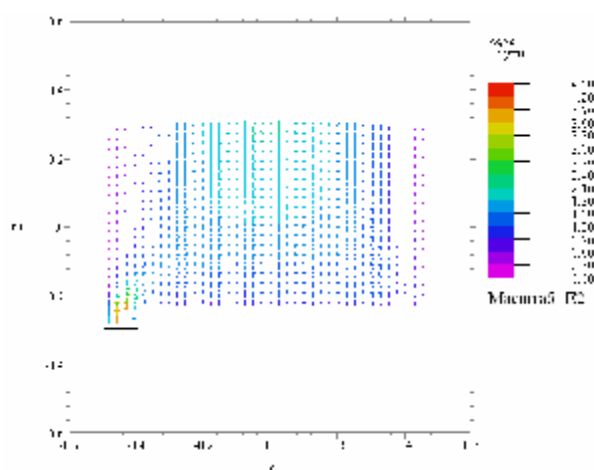


Рис. 3. Поле скоростей радиально неравномерного потока

Рассматриваемая система моделируется (без внесения радиальной неравномерности) с использованием кода Melcor 1.8.5 (рис. 4).

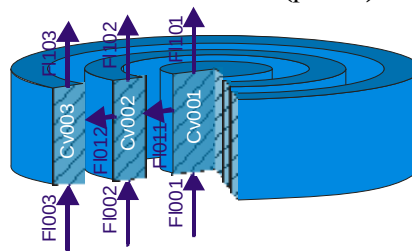


Рис. 4. Нодализация схемы моделируемой установки

Модель состоит из трех контрольных объемов, представляющих три радиальных кольца: внутреннее – Cv001, среднее – Cv002 и внешнее – Cv003; подводящих (FL001, FL002 и FL003) и отводящих (FL101, FL102 и FL103) путей течения. Контрольные объемы соединены между собой путями соединения FL011 и FL012. Расчетные значения скоростей на выходе из смоделированных «кольцевых» объемов представлены на рис. 5.

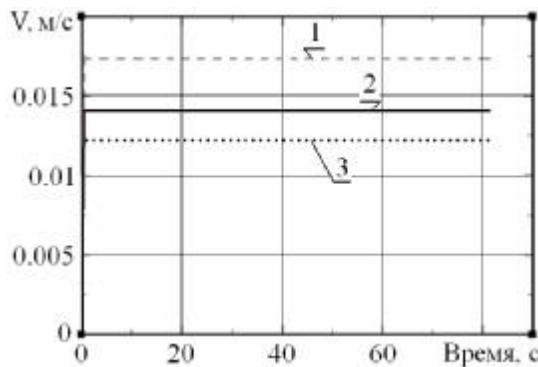


Рис. 5. Скорость течения жидкости в отводящих путях соединений: 1 - FL101, 2 - FL102 и 3 - FL103

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при отсутствии радиальной неравномерности, для моделирования рассматриваемой системы, с использованием одномерных кодов, достаточно ввести радиальную разбивку на контрольные объемы (рис. 4). В зависимости от параметров системы оптимальное количество радиальных сегментов изменяется.

При наличии радиальной неравномерности, для получения физически корректных результатов, необходимо одно или несколько колец (в зависимости от конструкции и параметров моделируемого объекта) разбивать на сегменты. Можно сделать вывод, что для моделирования рассматриваемой системы с использованием кода Melcor достаточно разбить только внешний ринг на сегменты. Но если диаметр дополнительного входного отверстия будет увеличен, либо изменены значения расходов или давлений, то это может привести к необходимости дробления на сегменты не только внешнего кольца.

Расчетный эксперимент с использованием трехмерного моделирования

Верхняя камера смешивания включает такие элементы конструкции как корпус и шахта реактора, блок защитных труб (БЗТ), состоящий из трех плит, соединенных между собой перфорированной и опорной обечайками, защитными

трубами органов регулирования системы управления и защиты реактора (ОР СУЗ) и защитными трубами системы внутриреакторного контроля (СВРК). В связи с этим, было бы некорректно основываться во время создания нодализационной схемы ВКС только на результаты решения системы дифференциальных уравнений, моделирующих достаточно упрощенную установку. Для получения данных о поведении теплоносителя в верхней камере смешивания создана модель с использованием программного обеспечения SolidWorks, которая позволяет не только создать трехмерную визуализацию рассматриваемых элементов, но и получить детализированное поле скоростей и температур.

Созданная модель верхней камеры смешивания состоит из трех элементов: корпус реактора с четырьмя отверстиями для горячих ниток главного циркуляционного контура (ГЦК), шахта реактора и блок защитных труб (рис. 6).

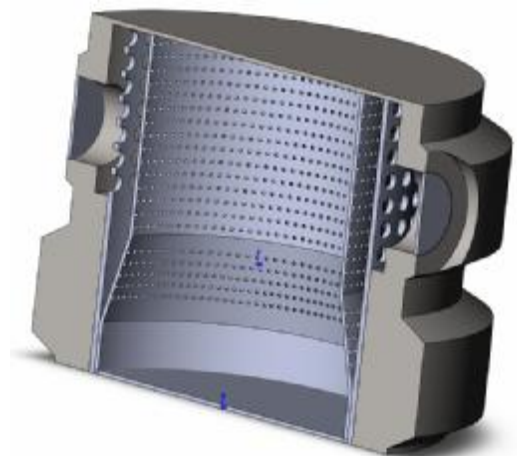


Рис. 6. ВКС реактора, смоделированная с использованием программного средства SolidWorks

Габаритные характеристики созданной модели соответствуют параметрам реального объекта. Для «упрощения» расчетной модели и сокращения расчетного времени, были приняты некоторые допущения:

- не происходит моделирование элементов расположенных под нижней плитой БЗТ;
- принято, что расход теплоносителя, прошедшего через нижнюю плиту БЗТ, является однородным по всей плоскости плиты;
- ввиду относительно небольшого расхода теплоносителя под крышку реактора, не моделируются элементы, расположенные над средней плитой БЗТ;
- не происходит моделирование защитных труб ОР СУЗ и защитных труб системы

внутриреакторного контроля (СВРК), что позволяет утверждать о некотором консерватизме полученных результатов, т.к. рассматриваемые элементы оказывают «тормозящее» воздействие с точки зрения усиления радиальной неравномерности движения теплоносителя через ВКС.

В качестве граничных условий используются данные с реального объекта, а также результаты расчета компьютерной модели, созданной с использованием кода RELAP/SCDAP.

Теплоноситель начинает свое движение от нижней плиты БЗТ с давлением $p = 160,6 \text{ кгс/см}^2$ и температурой $t = 322,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Пройдя через ВКС теплоноситель попадает в одну из горячих ниток ГЦК с давлением $p = 159,07 \text{ кгс/см}^2$ и температурой $t = 319,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7).

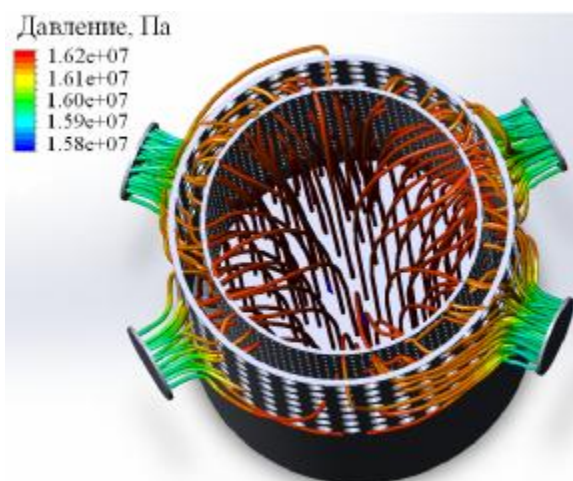


Рис. 7. Схема движения теплоносителя через ВКС при работе 4-х ГЦН

Для рассмотрения режима с радиальной неравномерностью, в качестве граничных условий введены параметры энергоустановки с одним отказавшим ГЦН, и как следствие, с установившимся противотоком в «неисправной» петле. Для этого, в качестве граничных условий, один из патрубков зададим как источник теплоносителя с давлением $p = 159,69 \text{ кгс/см}^2$. Результаты расчета представлены на рис. 8.

Исходя из полученных результатов, можно выдвинуть предположение, что для получения физически корректной информации о поведении теплоносителя в ВКС в различных режимах работы реакторной установки, с использованием одномерных расчетных кодов, следует разбивать ВКС на радиальные элементы (Ring), внешнее из которых дополнительно разбивать на сегменты.

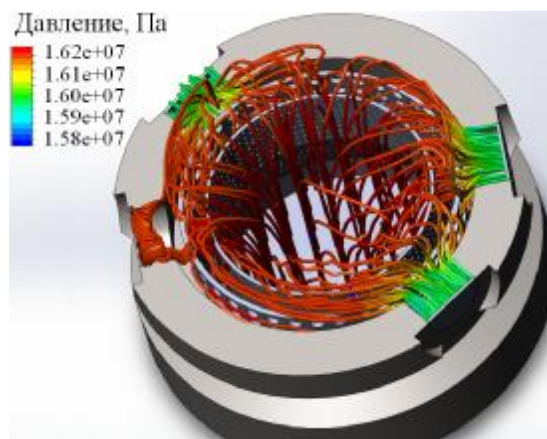
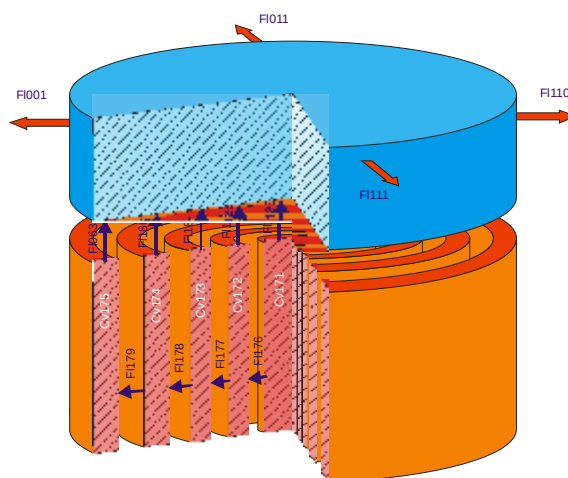


Рис. 8. Распределение давления вдоль линий движения теплоносителя через ВКС

Моделирование ВКС с использованием одномерных кодов. Сравнение результатов расчетов

С целью подтверждения корректности разбивки на элементы ВКС при моделировании энергоустановки ВВЭР-1000 с реактором В-320, с применением одномерных кодов, производится сравнительный анализ результатов расчетов, полученных с использованием идентичных моделей, отличающихся только нодализацией верхней камеры смешивания, заданной:

- одним контрольным объемом (рис. 9);
- пятью радиальными кольцами, без дробления колец на сегменты;
- пятью радиальными кольцами, с дроблением внешнего кольца на сегменты (рис. 10);
- пятью радиальными кольцами, с дроблением двух внешних колец на сегменты.



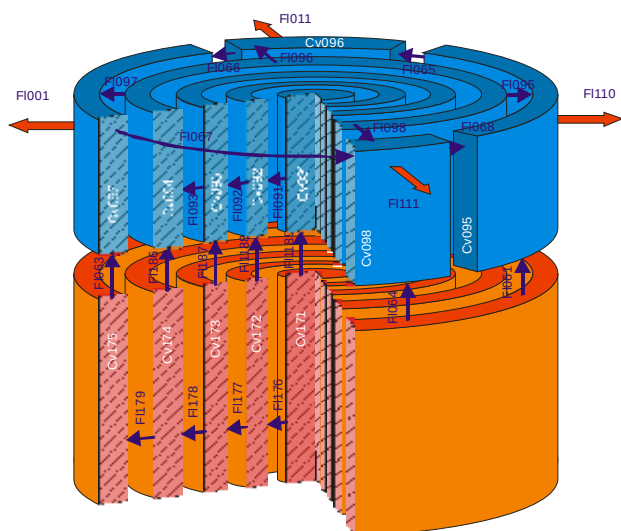


Рис. 10. Нодализационная схема активной зоны и ВКС, моделируемой пятью радиальными кольцами, с дроблением внешнего кольца на сегменты

В качестве исходного события используется «отказ ГЦН» первой циркуляционной петли. Происходит установление обратной циркуляции в петле с отказавшим циркуляционным насосом.

В детализированной модели, ВКС которой задана пятью радиальными кольцами с дроблением внешнего кольца на сегменты, учитывается неполное перемешивание в ВКС теплоносителя, поступающего из активной зоны и из петли с отключенным ГЦН. Температура теплоносителя в горячих нитках петель 1, 2, 3 и 4 детализированной модели ЯЭУ представлена на рис. 11.

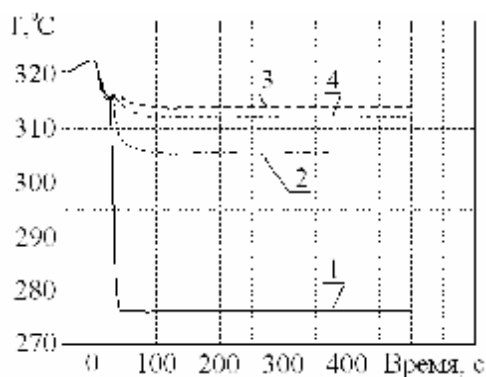


Рис. 11. Зависимость температуры теплоносителя в горячих нитках петель 1, 2, 3 и 4 детализированной модели ЯЭУ от времени

Модель энергоустановки с упрощенной верхней камерой смешивания не имеет возможность учета неравномерности температур по объему ВКС. В контрольном объеме, моделирующем ВКС, происходит усреднение параметров теплоносителя. Исходя из этого, температу-

ры теплоносителя горячих ниток трех циркуляционных петель (№ 2, 3 и 4) эквивалентны друг другу и равны 304,9 °C. Температура горячей петли с отказавшим ГЦН равна 269,5 °C. Полученные результаты совпадают с результатами расчета рассматриваемого события, полученными с использованием Аналитического тренажера 3-го ЭБ Запорожской АЭС. Это обусловлено использованной в аналитическом тренажере одномерной модели верхней камеры смешивания.

Экспериментальные параметры и параметры, полученные с использованием рассматриваемых математических моделей, представлены в таблице.

Таблица. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов моделирования ВКС

Тип данных	Температура теплоносителя горячей полупетли, °C			
	Петля № 1	Петля № 2	Петля № 3	Петля № 4
Эксплуатационные данные 3-го энергоблока Калининской АЭС	276,5	304,1	314,5	312,6
Расчетные данные, полученные с использованием модели ВКС, которая задана:				
- одним контрольным объемом	269,5	304,9	304,9	304,9
- пятью кольцевыми зонами, без дробления колец на сегменты	269,5	304,9	304,9	304,9
- пятью кольцевыми зонами, с дроблением внешнего кольца на сегменты	276,3	305,1	314,2	312,3
- пятью кольцевыми зонами, с дроблением двух внешних колец на сегменты	276,3	305,0	314,3	312,3

Проведя сравнительный анализ полученных с использованием детализированной модели значений с эксплуатационными данными 3-го энергоблока Калининской АЭС можно сделать вывод, что представленная компьютерная модель (рис. 10) с достаточной степенью точности отражает поведение теплоносителя в ВКС реактора. Дальнейшая детализация верхней камеры смешивания не внесла положительный вклад в корректность результатов.

Упрощенная модель, в отличие от детализированной, не позволяет учесть неравномерность температурного поля ВКС и неравномерность температур теплоносителя, находящегося в петлях.

Заключение

Согласно полученным результатам, для корректного описания поведения реальной РУ класса ВВЭР с использованием одномерных расчетных кодов предпочтительным является использование предложенной детализированной модели ВКС, заданной пятью кольцевыми зонами с дроблением внешнего кольца на сегменты.

Использование данной модели позволяет учитывать пространственно неоднородные процессы, протекающие в ВКС, и получать корректные результаты расчетов с использованием одномерных компьютерных кодов, что в свою очередь приводит к созданию правильной эксплуатационной документации.

Список литературы

1. MELCOR Computer Code Manuals. Reference Manuals. Version 1.8.5 October 2000, NUREG/CR-6119, Vol. 1, Rev. 2 SAND2000-2417/1, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-0739
2. Анализ уязвимости энергоблока №1 ЮУАЭС в условиях тяжелых аварий. Описание расчетной модели для кода MELCOR и результатов расчетов для отобранного перечня тяжелых аварий. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок №1. ООО «Энергориск». EP4-2010.200.ОД.1. Киев. – 2011. – 267 с.
3. Разработка и валидация модели RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 для анализа тяжелых аварий энергоблока № 1 ЮУАЭС. Выполнение сравнительных расчетов RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4. НАЭК «Энергоатом». – 2011. – 150 с.
4. Сапожников Ю.А. Учет трехмерных теплогидравлических эффектов в рамках одномерных кодов / Ю.А. Сапожников, Д.В. Шевелев, С.О. Ветчинкин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС, 2003. – Вып. 3. – С. 104 - 108.
5. Ландау Л.Д. Гидродинамика. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – Т. VI, – 736 с.

References

1. MELCOR Computer Code Manuals. Reference Manuals. Version 1.8.5 October 2000, NUREG/CR-6119, Vol. 1, Rev. 2 SAND2000-2417/1, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-0739

2. *Analiz uязvimosti jenergobloka №1 JuUAJeS v uslovijah tязhelyh avarij. Opisaniє raschetnoj modeli dlja koda MELCOR i rezul'tatov raschetov dlja otobranного perechnja tязhelyh avarij.* [Vulnerability analysis of power unit №1 SU NPP in the conditions of severe accidents. Description of the computational model for code MELCOR and results of calculations for the selected list of severe accidents] South-Ukrainian NPP. Unit №1. Ltd. «Energorisk». EP4-2010.200.OD.1. Kiev. 2011, 267 p.
3. *Razrabotka i validacija modeli RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 dlja analiza tязhe-lyh avarij jenergobloka №1 JuUAJeS. Vypolnenie sravnitel'nyh raschetov RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4.* [Development and validation of RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 models for analysis of severe accidents of power unit № 1 SU NPP. Comparative calculations RELAP / SCDAPSIM/MOD3.4. performance] NNEGC “Energoatom”. 2011, 150 p.
4. Sapozhnikov Ju.A., Shevelev D.V., Vetchinkin S.O. Accounting for three-dimensional thermal-hydraulic effects in the framework of one-dimensional codes. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Obespechenie bezopasnosti AJeS.* [Problems of atomic science and technology. Series: ensuring the safety of nuclear power plants] 2003. Publ. 3, pp.104 – 108.
5. Landau L.D., Lifshic E.M. *Gidrodinamika. Teoreticheskaja fizik.* [Hydrodynamics. Theoretical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. U. VI, 736 p.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.2.002.5-6-52

Возможности современных автоматических выключателей

В.В. Колодяжный

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

Статья поступила 25.02.2016 г.; после доработки 29.02.2016 г.

Аннотация

Рассмотрен вопрос определения исходного критерия при выборе автоматических выключателей для обеспечения надежной и безотказной работы электроустановок. Проведены испытания и дан сравнительный анализ заявленных и реальных параметров некоторых аппаратов. Автоматические выключатели нового поколения интегрируют в себе функции коммутации, защиты, коммуникации, электрических измерений и анализа. Сегодня это интегрированные электротехнические устройства управления потоками энергии и информации, поэтому критерии особенности подхода к выбору электрических аппаратов изменились.

Ключевые слова: автоматический выключатель, уставка, коммуникационные возможности

Possibilities of Modern Switchgear

V. Kolodiyajny

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

Received 25.02.2016 y.; received in final form 29.02.2016y.

Abstract

The correct choice of switching devices and protective devices ensures safe and reliable operation of electrical installations. Circuit breakers of a new generation integrated switching function, protection, communications, electrical measurement and analysis. Today, it are devices of control of electrical energy and the information flow and therefore criteria and sensitive approach of selecting electrical devices have changed.

Keywords: snunpwtchgear, breaker, prrotection

Введение

В процессе нормальной эксплуатации электрооборудования необходимо производить коммутации или, так называемые, оперативные переключения в электрических цепях. Нештатные ситуации, различные отказы, повреждения и неисправности требуют своевременного отключения оборудования, поскольку приводят к возникновению ненормальных режимов работы в частности, к перегрузкам и коротким замыканиям (к.з.) в цепях питания электрических установок. Именно поэтому все потребители получают

питание от источников электроэнергии не напрямую, а через соответствующие распределительные устройства, в состав которых обязательно входит коммутационно-защитная аппаратура и (КЗА), выполняющая обе указанные выше функции и определяющая надежность работы не только отдельных механизмов и устройств, но и объектов в целом.

Для обеспечения надежной и безотказной работы электроустановок необходим правильный выбор аппаратов, устанавливаемых в электрических цепях. При сооружении новых и модернизации старых объектов электрические ап-

параты выбираются по каталогам в соответствии с техническими условиями, номинальными параметрами и характерными особенностями работы. Основными требованиями, предъявляемыми к КЗА, являются: быстродействие, надежность, достаточная чувствительность и избирательность (селективность). При этом проектировщики исходят из предположения, что электрические аппараты должны надежно и долговечно выполнять свои функции с неизменностью всех своих характеристик, если они правильно выбраны применительно к конкретным условиям работы и соблюдены следующие условия:

- изоляционные, проводящие и другие материалы для изготовления и комплектации всех элементов и узлов соответствуют конкретным условиям работы;
- правильно выбраны сечения токоведущих частей;
- правильно рассчитана прочность и долговечность всех трущихся, вращающихся и перемещающихся частей, узлов и механизмов.

Если ранее технико-экономическое сравнение вариантов выбора оборудования и аппаратов носило достаточно формальный характер, поскольку технические возможности выбора ограничивались лишь номенклатурой продукции отечественной промышленности, то сегодня они существенно расширились за счет вхождения РФ в международную интеграцию. Разобраться в широко разрекламированной продукции, а главное, правильно выбрать изделие с учетом действительных технико-экономических показателей - задача не из легких.

Постановка цели и задачи научной работы

Целью работы является технико-экономический анализ состояния рынка автоматических выключателей.

Наибольшее применение в электроустановках до 1000 В сегодня нашли автоматические выключатели (АВ) или автоматы и актуальной является задача выбора критерия оценки.

Суть вопроса и полученные результаты

Еще в начале 2000 г. на отечественном рынке была явная нехватка АВ, но уже в конце 2004 г. по оценке ряда маркетинговых служб предложения на рынке автоматов начали превышать спрос, свидетельствуя о насыщении рынка более чем на 100 %. Сегодня возродились такие круп-

ные производители НВА как ОАО «Дивногорский завод низковольтной аппаратуры», г. Дивногорск, ОАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары, ОАО «Электроаппарат», г. Курск, ОАО «Контактор», г. Ульяновск и ряд других.

Номенклатура электрических аппаратов возросла за счет появления новых отечественных производителей, но в большей степени - за счет импорта изделий. Сегодня на рынке оборудования широко представлена электротехническая продукция не только отечественных предприятий, но и ведущих фирм, таких как: ABB, SchneiderElectric, Siemens, LeGrand, Moeller. По данным экспертов этим компаниям принадлежит 60 ÷ 65 % отечественного рынка низковольтной аппаратуры. В большинстве своем продукция аттестована по международному стандарту ISO 9002 и сертифицирована Госстандартом РФ.

В то же время следует отметить, что в последние годы рынок электротехнического оборудования наполнился не только продукцией основных зарубежных производителей, но и их подделками неизвестного происхождения. В основном эти подделки идут из Юго-Восточной Азии и Китая, но и в РФ появились фирмы, производящие трудно отличимые подделки «под ABB» и т.п.

Встречаются подделки даже на южнокитайскую продукцию фирмы ДЭК автоматы ВА-101 и автоматы АП50Б ОАО «Электроаппарат» г. Курск. Ряд фирм активно наполняет российский рынок продукцией стран Юго-Восточной Азии и Китая. Так Владивостокская корпорация «ДЭК» (торговая марка «ДЭК») является одним из главных поставщиков на российский рынок автоматических выключателей и устройств защитного отключения, производимых по специальному заказу на заводах Южного Китая.

Компания «Флабир» (торговая марка «ЭКФ») и группа компаний «Неон» (торговая марка «ЩИТ») заполняют российский рынок автоматами корейского и китайского производства, при этом они работают под своими товарными знаками, что затрудняет определение реального производителя.

Данная продукция с маркой известных фирм существенно проигрывает в качестве, но привлекательна в цене. Это в первую очередь относится к бытовым автоматическим выключателям (до 63 А). Так, например, цены на подделку автомата С45 составляют на рынке около 0,5 \$, когда оригинал фирм ABB или SchneiderElectric стоит не менее 4 \$.

По экспертной оценке руководителей и топ-менеджеров производственных и торговых компаний доля некачественной электротехнической продукции в России составляет до 20 %, т.е. 1/5 всей выпускаемой продукции – это подделки [1]. Использование подобных подделок и «аналогов» значительно увеличивает долю риска при их применении. В большей степени это касается защитных функций АВ, а именно надежности их срабатывания при превышении заданных уставок и стабильности «гарантируемых» параметров. Особенно важно это для защитной функции аппаратуры, отказ в работе которой может привести к возникновению пожаров и к гибели людей. Вот почему появление новых изделий (новых брэндов) на рынке низковольтного аппаратостроения и сомнительные рекламные обещания вызывают пристальное внимание. Поэтому сегодня сформировался качественно иной подход, когда, имея выбор, заказчик хочет получить гарантии заявленных качеств и отдает предпочтение не отечественным производителям, а более дорогому оборудованию таких ведущих фирм: ABB, SchneiderElectric, Simens, LeGrand, Moeller.

Автором проведены натурные испытания нескольких типов автоматических выключателей различных производителей для одного номина-

ла. Экспериментальная оценка соответствия параметров и характеристик, действительных и заявленных производителем, проведенная автором, практически полностью подтвердила выводы i Electro [1,2] о том, что в аппаратах многих фирм, присутствующих на рынке автоматических выключателей, имеют место нестабильность и несоответствие заявленных и реальных параметров и характеристик аппаратов. Если у ведущих фирм это несоответствие проявляется через 1÷3 года эксплуатации, то отечественные изделия нередко требуют замены уже через 1÷6 месяцев эксплуатации. Кроме того, по мере эксплуатации и старения аппаратов это несоответствие увеличивается, поскольку имеет место износ механических узлов и элементов, электроэрозионный износ контактов и разрегулировка. Особенно они проявляются при выборе АВ с паспортными данными, близкими к номинальным, когда в процессе эксплуатации параметры защиты (токи и время срабатывания) не только «плывут», но и просто не соответствуют заданным уставкам. Для сравнения продукции в таблице приведены некоторые технические данные, заявленные изготовителями низковольтной аппаратуры, на примере автоматических выключателей на номинальный ток 800 А.

Таблица. Некоторые технические данные автоматических выключателей

Фирма (производство)	Тип	$I_{ном}, А$	$I_{откл. макс}, кА$	$t_{ср. мин}, с$	Ресурс, тыс. циклов	Заявленный срок эксплуатации, лет
ABB	TMA-T6/800	800	200	0,01	30/50*	30
SchneiderElectric	NS800L	800	150	0,01	30/50*	30
Moeller	IZM-1-N 800	800	143	0,01	30/50*	30
«Электроаппарат», РФ	ВА 74-40	800	110	0,04	15	20
«Промфактор», Украина	AB3006Б	800	70	0,02	10	-
Турция, Китай и др.	—	800	85 - 120	0,1 ÷ 0,04	10/20*	10 - 15

Примечание: * - ресурс в тыс. циклов (Вкл./Откл.) под нагрузкой и без нагрузки, достаточный для обеспечения указанного срока службы.

Как следует из таблицы, автоматические выключатели ведущих западных фирм существенно выигрывают, прежде всего, по отключающей способности аппаратов. При этом, как показывает опыт эксплуатации, они значительно превосходят в износостойкости и надежности работы в течение гарантированного срока эксплуатации.

Основным недостатком многих отечественных и зарубежных не трендовых производителей электротехнического оборудования является низкое качество используемых материалов и комплектующих. Большое переходное сопро-

тивление, как правило, является следствием плохого защитного покрытия контактов и контактных соединений. Недостаточная термостойкость используемых пластмасс приводит к быстрому ухудшению их диэлектрических свойств, теряется механическая прочность и нередко изоляционные перегородки разрушаются и выкрашиваются.

Проведенные испытания показали, отечественные предприятия сегодня не могут и не смогут составить достойную конкуренцию ведущим западным фирмам, пока не будут решены задачи повышения качества нашей продукции (высокий

уровень коммутационной способности и износостойкости, надежность работы в течение гарантированного срока эксплуатации, низкая материалоемкость, модульность и дизайн). Автору не известно о наличии у нас в стране критериев оценки динамики износа. Нет, к сожалению, и единой сертификационной системы электротехнической продукции, а сертификаты часто выдаются на основании непонятно откуда-то взявшихся протоколов и ТЗ и используются как подтверждение рекламной аргументации. В ряде случаев даже не указывается, что аппараты соответствуют не только одноразовой предельной коммутационной способности (ОПКС), но и обязательным нормативным требованиям, таким как ГОСТы [3÷5].

Второй важный фактор нашего отставания в том, что многие выпускаемые типы АВ устарели морально. Ведущие мировые производители сегодня нацелены на комплексное решение различных задач в одном аппарате. Наибольшее применение в электроустановках до 1000В сегодня находят АВ нового поколения, которые интегрируют в себе функции коммутации, защиты, коммуникации, электрических измерений и анализа. Например, автоматические выключатели Compact NS фирмы SchneiderElectric [7], оснащенные новым поколением блоков управления Micrologic, интегрируют в себе не только коммутационно-защитные функции, но и функции коммуникации, электрических измерений и анализа. Это электротехнические устройства управления потоками энергии и информации, способные отображать параметры (потребляемая энергия, ток, напряжение, активная/реактивная мощность, гармоники, частота) в реальном времени с регистрацией в журнале (рис. 1).

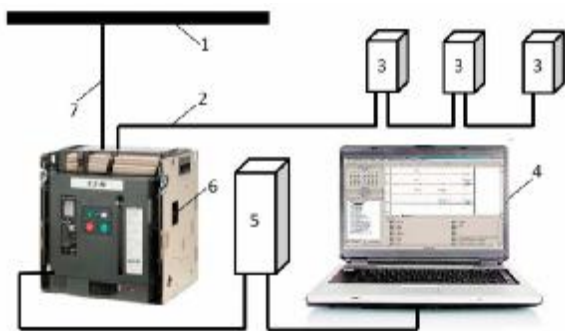


Рис. 1. Автоматический выключатель IZM фирмы EATON Moeller в системе управления электроснабжением

Новые коммуникационные возможности позволяют полностью автоматизировать процесс

производства и распределения электроэнергии, контролировать ее потребление, упрощают обслуживание и улучшают условия работы операторов. Тем самым повышается «прозрачность» и эффективность работы установки, сокращается время реакции на изменения состояния, такие как: перегрузка, несимметрия фаз, повышенное напряжение. Быстрое вмешательство в процесс может, например, предотвратить аварию на установке или инициировать ее профилактическое обслуживание.

Главная особенность состоит в том, что все эти устройства созданы для того, чтобы функционировать совместно, когда обеспечивается механическая и электрическая совместимость, оптимизация взаимодействия, модульность и коммуникации. Каждое изделие отвечает требованиям коммуникационных протоколов (Modbus, Ethernet и т.д.), что облегчает интеграцию в системы управления и мониторинга, простой доступ к информации: можно отслеживать токи, напряжения, историю потребления и т.п. Все это, одновременно, оптимизирует электроустановку по затратам и повышает ее эффективность: улучшается бесперебойность подачи энергии, повышается безопасность оборудования и персонала, облегчается модернизация, обеспечивается эффективный мониторинг и контроль.

Основой системы управления является *коммуникационная сеть 1 PROFIBUS-DP*, обеспечивающая информационный обмен между ее элементами. Непосредственно в автоматическом выключателе установлен *коммуникационный модуль 7*, дающий возможность подключить к обмену данными различные внешние модули расширения через *внутреннюю системную шину 2*. Модуль имеет встроенный в него температурный датчик, который замеряет температуру в распределительном шкафу.

Задание уставок и параметров управления его работой по заданной программе либо без дополнительного программного обеспечения осуществляется через *модуль параметризации 5*. Этот модуль со встроенным в него Web-сервером сохраняет в устройстве данные, сформированные во время коммутации (например, ток отключения с датой и временем отключения) и обеспечивает доступ ко всей информации, необходимой для анализа или параметризации. Он подключается к локальному интерфейсу электронного расцепителя максимального тока и предоставляет данные в формате протокола (HTTP).

Благодаря такому интерфейсу, имея в наличии Web-браузер с виртуальной машиной Java 2,

пользователь получает универсальный доступ к интерфейсу с настольного компьютера, ноутбука, карманного компьютера. Необходимые для этого http-файлы стандартно включены в модуль.

Внешние модули расширения 3 (цифровые или аналоговые) выбираются в зависимости от поставленных задач и конфигурации АСУ СЭЭС. К ним относят.

Модули цифровых выходов с релейными или оптронными выходами могут обеспечить отправку шести наборов двоичных данных о состоянии и причинах срабатывания выключателя, предупреждения на внешние индикаторные устройства (например, сигнальная лампа, сирена) или использования их для коммутации других системных компонентов (например, частотного преобразователя). Они конфигурируются с помощью поворотных потенциометров.

Модуль аналоговых выходов может использоваться совместно с одной из двух измерительных функций для вывода на аналоговые устройства индикации распределительного шкафа измеренных значений различных параметров силового выключателя. Для этого имеются четыре интерфейса (4 + 20 мА/0 + 10 В). Выбор выводимых измеренных значений производится при помощи поворотных потенциометров. Применение модуля аналоговых выходов снимает необходимость в дополнительных измерительных трансформаторах, их традиционной установке и разводке проводами.

Модуль цифровых входов обеспечивает возможность подключения к системе шести входных двоичных сигналов (24 В DC). В качестве альтернативы также быстро и просто реализуется решение с переключением между двумя наборами параметров (например, для режимов работы с трансформатором и генератором).

Модуль зональной селективности обеспечивает полную селективность при максимально коротком времени задержки. Он используется для соединения автоматических выключателей друг с другом. В случае к.з. каждый АВ, через который протекает ток короткого замыкания, опрашивает все непосредственно подчиненные ему автоматические выключатели: произошло ли короткое замыкание на следующих, нижних уровнях. Таким образом, точно определяется место к.з., в результате чего отключается только автоматический выключатель, ближе всего расположенный к месту аварии. Благодаря данному модулю, время срабатывания расположенного непосредственно выше автоматического выключателя может быть уменьшено до 50 мс.

Устройство задания параметров и управ-

ления работой АВ (4) может быть реализовано на базе контролера (при работе по заданной программе) либо на базе ЭВМ (при работе без дополнительного программного обеспечения).

Данные наглядно представляются в структуре дерева, благодаря чему обеспечивается быстрый доступ без дополнительного программного обеспечения. Параметры выключателя могут не только изменяться, но и сохраняться для дальнейшей трансформации в идентичные автоматические выключатели.

Измерительный модуль (6) дает возможность точного анализа распределения электроэнергии. В зависимости от комплектации автоматического выключателя на дисплее могут отображаться значения следующих величин: ток, напряжение, мощность, потребление энергии, cosφ, частота и высшие гармоники, температура.

Отображается также и информация о состоянии автоматического выключателя:

- сообщения о срабатываниях и превышении предельных значений с указанием даты и времени этих событий;
- информация о соблюдении регламента в техническом обслуживании;
- другие статистические данные.

Измерительная функция АВ реализуется в двух версиях:

Измерительная функция «power» определяет значения токов, напряжений, мощности, cosφ, энергетических параметров, частоты, коэффициента гармоник, коэффициента формы и коэффициента амплитуды.

Измерительная функция «harmonic» дополнительно предоставляет две независимые памяти формы волны и обеспечивает частотный анализ вплоть до 29-й гармоники (быстрое преобразование Фурье или FFT), который может быть использован для компенсации высших гармоник.

Все внешние модули имеют штатные разъемы и легко перекомплектуются требуемыми аксессуарами (рис. 2).

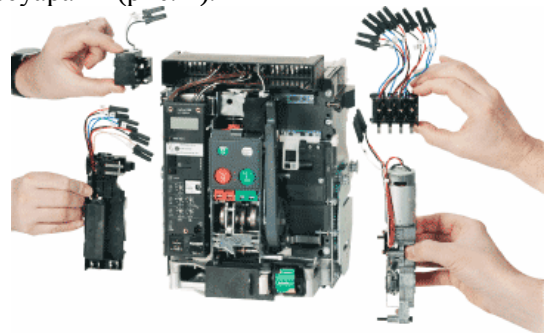


Рис. 2. Автоматический выключатель IZMX с аксессуарами

Своевременно предоставляемая информация о техническом состоянии устройства (например, о длительности отработанного времени или об износе основных контактов) позволяет пользователю избегать непроизводительных потерь. Благодаря сообщениям о превышении пороговых значений определенных параметров, режим работы установки может быть изменен до момента, требующего производить отключение цепи.

Второй важной проблемой отечественного аппаратостроения по-прежнему является отключение больших токов к.з.

Сегодня в АВ ведущих фирм применяется новая *технология ротоактивного размыкания*, которая использует давление, создаваемое энергией электрической дуги. Каждый полюс аппарата заключен в так называемый «*кокон*» - коммутационную камеру из газогенерирующей пластмассы.

При появлении тока к.з. вращающийся подвижный контакт отталкивается под действием электродинамических сил от неподвижных контактов и создает две последовательные электрические дуги. Чем больше ток к.з., тем быстрее отталкиваются контакты и длиннее дуга и, следовательно, выше ее сопротивление. Возникающая дуга за счет своего сопротивления многократно ограничивает ток к.з., а также создает в коммутационной камере повышенное давление.

Под действием теплоты, образуемой в процессе горения дуги, газогенерирующая пластмасса коммутационной камеры начинает выделять газ, который увеличивает избыточное давление внутри аппарата. Это давление, создаваемое энергией дуги, используется пружинно-поршневым механизмом, который после превышения определенного предела (примерно $35I_n$) вызывает сверхбыстрое, «*рефлексное*», отключение аппарата спустя $1\div 2$ мс после начала короткого замыкания, т.е. прежде, чем ток к.з. достигнет своего «пика», поскольку периодическая составляющая I_n тока к.з. при частоте в сети 50 Гц достигнет своего максимума только через 5 мс.

Тем самым электрооборудование и сам аппарат оказываются надежно защищены от чрезмерных тепловых и электродинамических нагрузок. Причем элементы камеры и главные контакты рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить работоспособность выключателя в течение всего срока службы без каких-либо ремонтных или профилактических работ. Ресурс работы АВ Compact NS, например, составляет до 30 тыс. циклов Вкл./Откл.) под нагрузкой и до 50 тыс. циклов без нагрузки и достаточен для обеспечения срока службы не менее 30 лет.

Выводы

В ходе исследования и проведенных испытаний сделаны следующие выводы:

1. При проектировании систем электропитания новых и модернизации старых объектов необходимо учитывать, что реальные уставки и параметры дешевой КЗА неизвестных производителей «плывут» и изменяются в ходе эксплуатации. Причиной несоответствия реальных и заявленных параметров и сроков службы является низкое качество и неправильный выбор используемых материалов и комплектующих при изготовлении низковольтной аппаратуры.

2. Автоматические выключатели нового поколения дают принципиально новые функциональные возможности при автоматизации систем электроснабжения, обеспечивая удобное разделение первичных и вторичных цепей, параметризацию и визуализацию, что может существенно повлиять на критерии выбора электрических аппаратов для проектируемых и модернизируемых объектов.

Список литературы

1. Акимов Е.Г. Состояние рынка электротехники [Электронный ресурс] – Информационная система IELECTRO. Обзор. Аналитика. Экспертиза. – РФ. – Вып. 2, 2010. Режим доступа: <http://www.ielectro.ru/>
2. Колодяжный В.В. Морская электроэнергетика: тенденции и возможности современной коммутационно-защитной аппаратуры /В.В. Колодяжный // Рыбное хозяйство Украины, 2010. – №5(70). – С. 49 - 54
3. ГОСТ 12434-83 "Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия". – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 10 с.
4. ГОСТ IEC 60898-1 Electrical accessories - Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations - Part 1: Circuit-breakers for a. c operation (Аппаратурамалогоабаритная. Выключатели автоматические для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Ч. 1. Автоматические выключатели для переменного тока). – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.
5. ГОСТ IEC 60947-2 Low – voltageswitchgearandcontrolgear - Part 2: Circuit-breakers (Низковольтная коммутационная аппаратура и аппаратура управления. Часть 2. Выключатели автоматические и др.). – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 14 с.
6. Рубин А. Выбор автоматического выключателя. По каким параметрам электрики подбирают "автоматы" [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.4living.ru/items/article/circuit-breaker/>

7. Техническая коллекция «SchneiderElectric», Выпуск № 28. «Комбинация защиты и измерения в сетях низкого напряжения». [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.schneider-electric.ru/>

References

1. Akimov E.G. *Sostoyanie rynka elektrotehniki* [Onlineresource] / Obzor. Analitika. Ekspertiza. IELECTRO V. 2, 2010, Available at: <http://www.ielectro.ru/>
2. Kolodjajny V.V. Ships electrical power: tendencies and possibilities. *Rybnoe hozyaystvo Ukrainy*, № 5 (70), 2010, pp. 49 - 54.
3. GOST 12434-83 Circuit-breakers of bass tention. Technical conditions. Moskow. Izda-vo standartov, 1983, 10 p.
4. GOST IEC 60898-1 P. 1. Circuit-breakers for alternative courant. Moskow, Izda-vo standartov, 1983, 12 p.
5. GOST IEC 60947-2 P. 2. Circuit-breakers for alternative courant. Moskow, Izda-vo standartov, 1983, 14 p.
6. Rubin A. *Vybor avtomaticheskogo vykluchatelya. Po kakim parametram elektriki podbirayut avtomaty* [Conditions of circuit-breaker funktion]. Available at: <http://www.4living.ru/items/article/circuit-breaker/>
7. *Tehnicheskaya kolleksiya «Schneider Electric»*, V. 28. «kombinaciya zashiti izmereniya v setyahnizkogo napryageniya». [Online resource]. Available at: <http://www.schneider-electric.ru/>

УДК 621.311.019.3

Адаптация метода ортогонализации к анализу эффективности функционирования энергосистем

Н.В. Омельченко

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

Статья поступила 29.02.2016 г.; после доработки 03.03.2016 г.

Аннотация

Предлагается адаптация метода ортогонализации через разность конъюнкций для различных комбинаций элементарных конъюнкций. Метод используется в составе логико-вероятностного исчисления для расчета надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем. Вносятся определения разности конъюнкций и закономерности в качестве дополнения к ранее разработанному методу ортогонализации, предназначенные для упрощения расчетов и сокращения количества операций за счет операций с нулевым результатом.

Ключевые слова: ортогонализация, разность конъюнкций, логико-вероятностная теория.

Adaptation of Orthogonalization Method to Analysis of Functioning Power Systems Effectiveness

N. V. Omelchenko

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

Received 29.02.2016 y.; received in final form 03.03.2016 y.

Abstract

The adaptation of the method of orthogonalization through a difference in the conjunctions for different combinations of elementary conjunctions is proposed. Method is used in the composition of logical-probability calculation for calculating of reliability, vitality and safety of structural- complex systems. Are introduced the method of determining the difference of the conjunctions and the regularities as the addition to the previously developed method of the orthogonalization, intended for simplification in calculations and reduction of a quantity of operations due to the operations with the zero result.

Keywords: orthogonalization, a difference in the conjunctions, logical-probability theory.

Введение

Современные электроэнергетические системы являются многофункциональными структурно-сложными объектами. «Структурно-сложными системами» (ССС) считаются такие системы, которые при математическом описании не приводятся к последовательным или параллельным структурам. Элементы такого рода структур связаны между собой в единое целое, причем функциональные и логические связи отличают эти системы от простого набора составляющих. Структурно-сложные системы описы-

ваются разветвленными сценариями с повторностью аргументов при их составлении [1].

Независимо от природы изучаемых сложных электроэнергетических систем при решении вопросов структурной сложности используются одни и те же логико-вероятностные модели. Научные результаты, полученные для СССР, могут использоваться и для систем с простой структурой. Имеет место и обратное влияние результатов, полученных для простых структур, на СССР. СССР представляют собой сложные динамические системы, функциональные зависимости которых описываются дифференциальными урав-

нениями высокого порядка [1].

При определении характеристик таких систем учитывается совокупность изменяющихся факторов, поскольку наличие глубоких внутренних связей не позволяет изменять только один влияющий фактор. Сложные системы, рассматриваемые в целом, обладают иными качествами, несвойственными отдельным ее элементам.

Логические связи, описывающие условия работоспособности ССС, характеризуют их как системы с мостиковой структурой, при которой одни и те же элементы обеспечивают различные варианты функционирования. Однако именно для сложных систем характерна возможность многократных комбинаций событий, вероятность каждого из которых мала, а в сумме таких событий набирается достаточно много.

Усилия, направленные на повышение отказоустойчивости сложных энергосистем, т.е. способности систем выполнять свое функциональное назначение при одновременных отказах нескольких ее элементов необходимы, но недостаточны для их безопасности. Даже специально создаваемые системы контроля и защиты, ориентированные на простой перебор возможных опасных ситуаций, не могут гарантировать защиты систем от произвольных комбинаций отказов, нарушений правил эксплуатации и иных неблагоприятных воздействий [1].

Проектирование и эксплуатация систем такого типа представляет собой сложную задачу, связанную с принятием правильных обоснованных решений в различных штатных и нештатных ситуациях, когда существует риск неоптимального выбора. Поэтому для безаварийной эксплуатации современных электроэнергетических систем необходимо сохранить и поддерживать их работоспособность в течение длительного времени как в нормальных, так и аномальных условиях работы [3].

Среди факторов, трудно поддающихся количественному анализу надежность, живучесть и безопасность, являющиеся основными критериями эффективности функционирования сложных энергосистем, занимают особое место. Надежность является комплексным свойством систем при нормальных условиях эксплуатации. Показатели живучести характеризуют устойчивость систем при наличии форс-мажорных обстоятельств, в том числе поражающих воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации (т.е. при взрывах, пожарах, наводнениях, землетрясениях и пр.). Безопасность систем проявляется при их взаимодействии с другими системами или с обслуживающим

персоналом и окружающей средой [2].

Анализ надежности, живучести и безопасности осуществляется логико-вероятностным методом, основанным на описании структуры систем с помощью средств алгебры логики и количественной оценкой показателей с использованием теории вероятности. Оценка надежности энергосистем в трактовке безотказности обычно производится в виде вероятности безотказной работы $R_c(t)$ (вероятности того, что в пределах заданной наработки отказ системы не возникнет).

Для количественной характеристики совершенства структуры энергосистем применяются понятия:

- вес логической функции работоспособности системы как относительная доля работоспособных состояний среди всех возможных состояний системы;
- обобщенный коэффициент живучести, как вероятность отказа системы при заданной кратности одновременно отказавших элементов.

В качестве исходных данных для расчета указанных выше характеристик используется логическая функция работоспособности системы (ФРС), приведенная к дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) и преобразованная в неповторную или ортогональную дизъюнктивную нормальную форму (ОДНФ). Среди способов преобразования ДНФ в ОДНФ наиболее универсальным является метод ортогонализации через разность конъюнкций [2], являющийся составной частью логико-вероятностного исчисления.

Постановка цели и задачи научной работы

Целью данной научной работы является адаптация метода ортогонализации через разность конъюнкций, позволяющая получить компактный способ преобразования ДНФ в ОДНФ для структуры системы с различными комбинациями элементарных конъюнкций.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- формулируются определения разности конъюнкций на базе основных теорем и законов алгебры логики;
- анализируются операции логического умножения для возможных сочетаний элементарных конъюнкций, позволяющие использовать преобразование ФРС из ДНФ в ОДНФ с сокращением громоздкости математических вычислений.

Некоторые базовые понятия метода ортогонализации

Между теорией множеств и булевой алгеброй существует вполне однозначное соответствие: объединению множеств соответствует дизъюнкция, пересечению множеств – конъюнкция, пустому множеству – ноль и т.д. Под операцией вычитания множеств A и B ($A \setminus B$) понимается совокупность тех элементов из A , которые не содержатся в B . Каждую элементарную конъюнкцию ранга r можно считать множеством, т.к. она содержит 2^{m-r} членов совершенной ДНФ (СДНФ).

Разность конъюнкций $K_j \setminus K_i$ содержит только те члены, которые принадлежат конъюнкции K_j и не принадлежат конъюнкции K_i . Это равносильно произведению отрицания вычитаемой конъюнкции K_i' на конъюнкцию-уменьшаемое K_j , т.е. $K_j \setminus K_i = K_i' K_j$, что позволяет сформулировать лемму 1: ФРС, приведенную к ДНФ, можно представить эквивалентной функцией

$$f(\vec{X}_m) = \bigvee_{l=1}^n K_l = K_1 \vee K_2 \setminus K_1 \vee K_3 \setminus K_1 K_2 \vee \dots \vee K_n \setminus K_1 K_2 \dots K_{n-1}; l \leq 2^m. \quad (1)$$

Все слагаемые в правой части выражения (1) ортогональны между собой, но эквивалентную функцию можно использовать для дальнейших расчетов, если она преобразована в ОДНФ, в этом случае конъюнкции K_l приведены к цепочкам из логических переменных. Для получения ОДНФ необходимо воспользоваться следующей леммой 2, отображающей теорему де Моргана $(a \vee b) = (a' \wedge b')'$ и закон ортогонализации для произвольного числа слагаемых $a' \vee b' \vee c' \vee \dots = a' \vee ab' \vee abc' \vee \dots$

$$K_r' = \left(\bigwedge_{t=1}^{\alpha} X_{nt} \right)' = X_{n1}' \vee X_{n1} X_{n2}' \vee \dots \vee X_{n1} X_{n2} \dots X_{n\alpha}' \quad (2)$$

Сущность адаптации метода к различным комбинациям конъюнкций

Совершенная ДНФ (СДНФ) содержит максимальное число членов и является самой неэкономной формой ОДНФ, поскольку все конъюнкции в СДНФ имеют максимальный ранг, равный числу элементов рассматриваемой системы. Впервые получение ОДНФ с минимальным числом членов было предложено И.А.Рябининым в [4] и названо *методом ортогонализации через отрицание конъюнкций*. Теоретические обоснования такого метода базируются на справедливости закона ортогонализации как для логиче-

ских переменных, так и для логических функций. Сам метод был достаточно громоздким для вычислений. В дальнейшем Ю.М. Парфенов и Э.П. Новиков разработали иной метод ортогонализации, основу которого составляет способ определения разности конъюнкций: разность конъюнкций $K_j \setminus K_i$ есть результат умножения конъюнкции K_j на логическую сумму α -слагаемых, где α – число переменных из K_i , которых нет в K_j , и каждое r -е слагаемое ($r = 1, 2, \dots, \alpha$) состоит из отрицания r -ой переменной и $r-1$ отсутствующих в K_j переменных из K_i , т.е.

$$K_j \setminus K_i = K_j \left(\bigvee_{r=1}^{\alpha} X_{tr}' X_{tr-1} \dots X_{t1} \right);$$

$$X_{nt} \in K_i, X_{nt} \notin K_j$$

В данной работе предлагается более облегченная для использования в практических расчетах формулировка способа определения разности конъюнкций: разность конъюнкций $K_j \setminus K_i$ есть результат умножения конъюнкции K_j на отрицание конъюнкции K_i' , состоящей из α переменных из K_i , отсутствующих в K_j и преобразованной в ОДНФ по лемме 2:

$$K_j \setminus K_i = K_j K_i' = K_j \left(\bigwedge_{t=1}^{\alpha} X_{nt} \right)' = K_j (X_{n1}' \vee X_{n1} X_{n2}' \vee \dots \vee X_{n1} X_{n2} \dots X_{n\alpha}'); \quad (3)$$

где $X_{nt} \in K_i, X_{nt} \notin K_j$.

Анализ расчета характеристик надежности, живучести, безопасности методом ортогонализации через разность конъюнкций позволяет выявить ряд закономерностей, отсутствующих в первоисточнике [2]. Оптимизируя процесс вычисления для различных сочетаний конъюнкций необходимо учитывать:

1. Если конъюнкции уменьшаемого и вычитаемого ортогональны ($K_j \wedge K_i = 0$), результат разности является конъюнкцией уменьшаемого.

2. Если $\alpha = 0$ и конъюнкции уменьшаемого и вычитаемого неортогональны, результат разности равен нулю.

3. Если уменьшаемое K_j состоит из суммы ортогональных конъюнкций, то результатом $K_j \setminus K_i$ является группа слагаемых, полученная в виде разности каждого из слагаемых конъюнкций уменьшаемого с конъюнкцией вычитаемого.

С учетом вышеизложенного, алгоритм ортогонализации через разность конъюнкций, сокращающий трудоемкость расчета можно сформулировать следующим образом:

1. Формируется логическая функция работоспособности в ДНФ с ранжировкой конъюнкций в порядке возрастания их ранга.

2. Функция работоспособности системы, приведенная к ДНФ, представляется в виде эквивалентной функции по выражению (1).

3. Перед определением разности сочетания конъюнкций проверяются в соответствии с установленными выше закономерностями для исключения операций с нулевым результатом.

4. Разность конъюнкций вычисляется по выражению (3).

5. Формируется эквивалентная логическая функция в ОДНФ.

Преобразовав условия работоспособности к ОДНФ, можно приступить к вычислению вероятности безотказной работы системы по формуле суммы вероятностей несовместных событий:

$$P\{Y(\overrightarrow{X_m})=1\}=R_c=\sum_{k=1}^s P(O_k)$$

где O_k – ортогональные члены преобразованной ФРС к ОДНФ:

$$Y(\overrightarrow{X_m})=\bigvee_{l=1}^n K_l=\bigvee_{k=1}^s O_k$$

Алгоритм ортогонализации можно продемонстрировать на примере системы, резервированной по схеме «2 из 4». Критерием отказа такой системы является отказ трех элементов.

Согласно предлагаемого алгоритма:

- ФРС приводится к ДНФ;
- производится нумерация членов ДНФ от 1 до n в порядке возрастания членов в конъюнкциях;
- ФРС в ДНФ представляется эквивалентной функцией по выражению (1).

$$Y(\overrightarrow{X_m})=\begin{vmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X_3 \\ X_1 & X_4 \\ X_2 & X_3 \\ X_2 & X_4 \\ X_3 & X_4 \end{vmatrix}=\begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{vmatrix}=(4)$$

$$=\begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \setminus K_1 \\ K_3 \setminus K_1 \setminus K_2 \\ K_4 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \\ K_5 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4 \\ K_6 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4 \setminus K_5 \end{vmatrix}$$

Перед началом вычислений необходимо сказать, что результаты преобразований каждой строки (4) в ОДНФ по способу определения

разности (3) являются действиями, а расчеты внутри действий считаются шагами.

Первое действие. Руководствуясь определением разности элементарных конъюнкций, производится вычисление с помощью выражения (3): $K_2 \setminus K_1 = K_2 K_1' = X_1 X_3 (X_1 X_2)' = X_1 X_2' X_3$, $\alpha = 1$, $K_r' = X_2'$;

Второе действие. Рассчитывается $K_3 \setminus K_1 \setminus K_2$:

$$K_3 \setminus K_1 = K_3 K_1' = X_1 X_4 (X_1 X_2)' = X_1 X_2' X_4, \alpha = 1, K_r' = X_2';$$

Во втором шаге этого действия уменьшаемое $K_3 \setminus K_1$, а вычитаемое K_2 :

$$K_3 \setminus K_1 \setminus K_2 = X_1 X_2' X_4 (X_1 X_3)' = X_1 X_2' X_3' X_4, \alpha = 1, K_r' = X_3'$$

Третье действие. $K_4 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3$:

$$K_4 \setminus K_1 = X_2 X_3 (X_1 X_2)' = X_1' X_2 X_3, \alpha = 1, K_r' = X_1';$$

Второй и третий шаг в этом действии не влияют на результат первого шага расчета, т.к. конъюнкции уменьшаемого и вычитаемого ортогональны, т.е. $K_4 \setminus K_1$ ортогональна K_2 , а $K_4 \setminus K_1 \setminus K_2$ ортогональна K_3 , следовательно $K_4 \setminus K_1 \setminus K_2 = K_4 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 = X_1' X_2 X_3$

Четвертое действие. $K_5 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4$:

$$K_5 \setminus K_1 = K_5 K_1' = X_2 X_4 (X_1 X_2)' = X_1' X_2 X_4, \alpha = 1, K_r' = X_1';$$

Следующие два шага в этом действии не изменяют полученный результат, т.к. конъюнкции уменьшаемых и вычитаемых ортогональны, поэтому $K_5 \setminus K_1 \setminus K_2 = K_5 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 = X_1' X_2 X_4$;

$$K_5 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4 = X_1' X_2 X_4 (X_2 X_3)' = X_1' X_2 X_3' X_4, \alpha = 1, K_r' = X_3'$$

Пятое действие. $K_6 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4 \setminus K_5$:

$$K_6 \setminus K_1 = X_3 X_4 (X_1 X_2)' = X_3 X_4 \begin{vmatrix} X_1' \\ X_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_2' \\ X_2 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} X_1' & X_3 & X_4 \\ X_1 & X_2' & X_3 & X_4 \end{vmatrix}, \alpha = 2, K_r' = (X_1 X_2)'$$

В следующем шаге последнего действия будет результат разности только первой конъюнкции из уменьшаемого. Вторая конъюнкция из уменьшаемого и конъюнкция вычитаемого неортогональны и $\alpha = 0$, следовательно, их разность даст ноль. Так же в силу ортогональности уменьшаемых и вычитаемых конъюнкций во втором и третьем шагах пятого действия результат разности - конъюнкция уменьшаемого:

$$K_6 \setminus K_1 \setminus K_2 = K_6 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 = X_1' X_3 X_4;$$

$$K_6 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4 = X_1' X_3 X_4 (X_2 X_3)' = X_1' X_2' X_3 X_4, \alpha = 1, K_r' = X_2'$$

Результатом последнего шага будет конъюнкция уменьшаемого, т.е.

$$K_6 \setminus K_1 \setminus K_2 \setminus K_3 \setminus K_4 \setminus K_5 = X_1' X_2' X_3 X_4.$$

В данном примере в процессе вычислений разности конъюнкций из пятнадцати исходных шагов, произведенных в пяти действиях, разность конъюнкций рассчитана только в восьми шагах. В семи оставшихся шагах операции разности сократились в силу первой закономерности. Кроме того, в пятом действии результат первой разности, состоящий из суммы двух ортогональных конъюнкций, в последующем вычислении сокращается до одной конъюнкции в силу второй закономерности. Таким образом, в данном примере оказалось восемь операций с нулевым результатом.

Формируется ФРС в ОДНФ в порядке возрастания ранга в конъюнкциях:

$$Y(\vec{X}_m) = \begin{vmatrix} X_1 & X_2 \\ X_1 & X'_2 & X_3 \\ X'_1 & X_2 & X_3 \\ X_1 & X'_2 & X'_3 & X_4 \\ X'_1 & X'_2 & X_3 & X_4 \\ X'_1 & X_2 & X'_3 & X_4 \end{vmatrix}$$

От полученной логической функции в ортогональной дизъюнктивной нормальной форме легко перейти к вероятностной функции и рассчитать, к примеру, вероятность безотказной работы предложенной системы. Согласно формуле суммы вероятностей несовместных событий вычисляется вероятность безотказной работы системы:

$$P\{Y=1\} = R_1R_2 + R_1Q_2R_3 + Q_1R_2R_3 + R_1Q_2Q_3R_4 + Q_1Q_2R_3R_4 + Q_1R_2Q_3R_4$$

Учитывая, что $Q=1-R$ и при условии равной надежности всех элементов системы ($R_1=R_2=R_3=R_4=R$) вероятность безотказной работы системы примет вид вероятностного полинома:

$$R_C(t) = R^2 + 2R^2(1-R) + 3R^2(1-R)^2 = 3R^4 - 8R^3 + 6R^2.$$

Заключение

1. Метод ортогонализации через разность конъюнкций позволяет получить оптимальное и компактное преобразование ДНФ в ОДНФ по сравнению с методом ортогонализации через отрицание конъюнкций.

2. Применение перечисленных выше определений и закономерностей для операций логического умножения с различными вариантами сочетаний конъюнкций дает возможность сократить процесс преобразований за счет операций с нулевым результатом.

3. Анализ существующих методов преобразований ДНФ в неповторную или ортогональную форму позволяет оценить целесообразность

усовершенствования известных и разработки новых алгоритмов, облегчающих процесс расчета характеристик эффективности функционирования структурно-сложных систем.

Список литературы

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
2. Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть и эффективность корабельных электроэнергетических систем / Ю.М. Парфенов. – Л.: ВМА им. А.А. Гречко, 1989. – 324 с.
3. Анисимов О.Ю. Основы теории и расчета надежности ЭЧЭС: учеб. пособие / О.Ю. Анисимов. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2003. – 112 с.
4. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. – Л.: Судостроение, 1971. – 456 с.

References

1. Ryabinin I.A. *Nadeznost i bezopasnost strukturno-slozhnix sistem* [Reliability and safety of structural-complex systems]. St. Petersburg: Polytechnics, 2000, 248 p.
2. Parthenons Y.U. *Nadeznost, zivuchest i effektivnost korabelnix elektro-energeticheskix system* [Reliability, vitality and the effectiveness of ship electric power systems]. Leningrad, VMA im. A.A. Grechko, 1989, 324 p.
3. Anisimov O.Y. *Osnovi teorii i rascheta nadeznosti ECH ES. Uchebnoe posobie* [Bases of theory and calculation of reliability ECH ES]. Sevastopol, SNUNE&I, 2003, 112 p.
4. Ryabinin I.A. *Osnovi teorii i rascheta nadeznosti sudovix elektro-energeticheskix system* [Bases of theory and calculation of the reliability of shipboard electric power systems]. Leningrad, Shipbuilding, 1974, 456 p.

УДК [621.31.031.016.3: 061.5]. 001.24

Использование маховикового накопителя энергии для сглаживания колебаний активной мощности при резкопеременной нагрузке

А.К. Пронина¹, Ю.А. Майорова²

ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹pronina-a@bk.ru, ²gaika20041983@mail.ru

Статья поступила 17.02.2016 г.; после доработки 19.02.2016 г.

Аннотация

Приводится теоретическое обоснование способа улучшения электроэнергетических показателей системы электроснабжения промышленных предприятий с резкопеременными графиками нагрузки. Предлагается для систем электроснабжения, оборудованных средствами компенсации реактивной мощности в виде синхронных компенсаторов, рассмотреть вопрос о возможности улучшения качества электрической энергии и энергетических показателей за счет навешивания на вал синхронного компенсаторного маховика, как инерционного накопителя энергии. Разработана математическая модель электромеханических переходных процессов в системе с маховиковым накопителем энергии при резких изменениях нагрузки на систему.

Ключевые слова: электроснабжение промышленных предприятий, графики резкопеременных нагрузок, добавочные потери мощности, качество электрической энергии, синхронный компенсатор, маховиковый накопитель энергии.

The Use of the Flywheel Energy Storage Device for Smoothing Fluctuations of Power With Rapidly Changing Load

A.K. Pronina¹, J.A. Mayorova²

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹pronina-a@bk.ru ²gaika20041983@mail.ru

Received 17.02.2016 y.; received in final form 19.02.2016 y.

Abstract

We present a theoretical basis of way to improve electricity performance of electrical power system with rapidly changing load charts. Offered for power supply systems equipped with reactive power compensation means as synchronous condenser, consider the question of improving the quality of electricity and electricity performance due to hanging on the shaft simultaneous compensatory flywheel as the inertial energy storage. Was developed mathematical model of electromechanical transients in a system with flywheel energy storage during sudden load changes on the system.

Keywords: Power supply of industrial enterprises, graphics varying loads, the additional power losses, quality of electrical energy, synchronous compensator, flywheel energy storage device.

Введение

Инерционные маховиковые накопители энергии часто рассматриваются как средство выравнивания графиков нагрузки электрических станций [1], повышения статической и динамической устойчивости энергосистем [2], сглаживания

динамических нагрузок [3], в системах бесперебойного питания [4].

В автономных электроэнергетических системах и в системах электроснабжения промышленных предприятий все больший удельный вес приобретают электропотребители с резкими ко-

лебаниями тока и мощности. Эти вентильные приводы станов холодной прокатки металла, дуговые сталеплавильные печи, крупные сварочные аппараты и сварочные цеха и т.п. Колебания тока в цепях таких потребителей часто называют толчками тока. Толчки тока могут следовать с частотой до нескольких герц, вызывая колебания напряжения и вызывая дополнительные потери энергии и в сетях питания и в потребителях, подключенных к общим шинам нагрузки. Часто крупные узлы нагрузки являются одновременно и потребителями большой реактивной мощности, поэтому оборудуются синхронными компенсаторами (СК).

Предлагается исследовать вопрос об одновременном использовании СК для сглаживания колебаний активной нагрузки. Для этой цели на вал СК предлагается навешивать маховик с определенным моментом инерции, определяемым расчетом.

Постановка цели и задачи научной работы

Цель работы – оценить техническую эффективность предлагаемого способа.

Задача – разработать математическую модель электромеханических переходных процессов в электрической системе с синхронным компенсатором, и навешенной на вал компенсатора маховиковой массой.

Формулировка задачи

На рис. 1, а изображена схема электроснабжения мощной дуговой сталеплавильной печи (ДСП) от общего трансформатора Т: 1 – печной трансформатор; 2 – цеховой трансформатор (спокойная нагрузка); 3 – дуговая сталеплавильная печь, представляющая резкопеременную нагрузку [6].

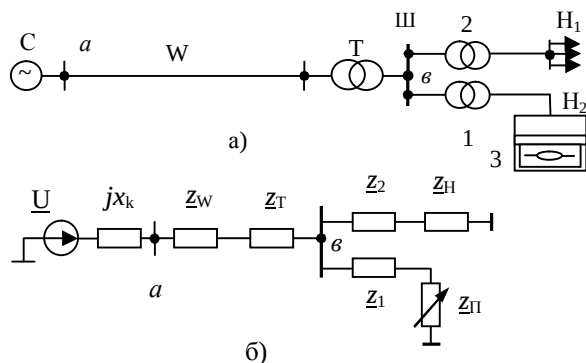


Рис. 1. Схема сети с резкопеременной нагрузкой: а) – в виде ДСП; б) – ее схема замещения

На рис. 1, б представлена схема замещения системы. На активных сопротивлениях элементов сети при резкопеременных токах возникают дополнительные потери мощности, за счет неравномерности графика токовой нагрузки.

Пусть графики имеют вид 1 и 2, как показано на рис. 2.

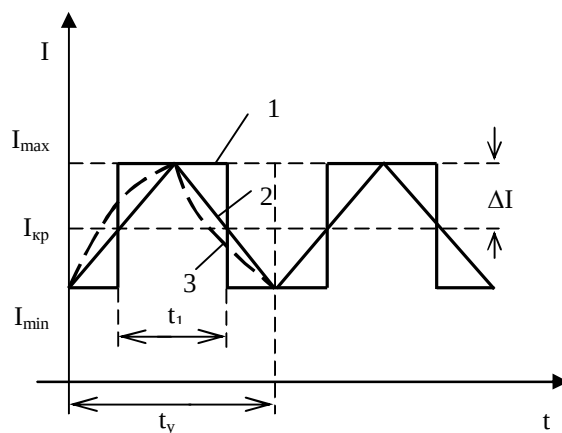


Рис. 2. График нагрузки при изменении тока:

- 1 – по закону прямолинейных импульсов;
2 – по линейному закону

Коэффициент формы кривых $k_f > 1$, численно равен отношению среднеквадратичного значения переменной величины тока к среднему значению.

В случае графика 1 имеем, при $t_1 = t_y/2$:

$$I_{эф1} = \sqrt{\frac{I_{mx}^2 + I_{mn}^2}{2}}.$$

В случае графика 2

$$I_{эф2} = \sqrt{\frac{I_{mx}^2 + I_{mx} \cdot I_{mn} + I_{mn}^2}{3}}.$$

Среднее значение тока в обоих случаях одно и то же

$$I_{cp} = \frac{I_{mx} + I_{mn}}{2}.$$

Учтем, что

$$I_{mx} = I_{cp} + \Delta I, \text{ а } I_{mn} = I_{cp} - \Delta I,$$

тогда для $I_{эф1}$

$$I_{эф1} = \sqrt{I_{cp}^2 + \Delta I^2},$$

$$I_{эф2} = \sqrt{I_{cp}^2 + \frac{1}{3} \Delta I^2}.$$

Коэффициент формы графиков нагрузки принимает вид

$$k_{ф1} = \sqrt{1 + \frac{\Delta I^2}{I_{cp}^2}},$$

$$k_{\phi 2} = \sqrt{1 + \frac{\Delta I^2}{3I_{\text{ср}}^2}}.$$

Пусть $\Delta I = 0,5I_{\text{ср}}$, при этом

$$k_{\phi 1} = \sqrt{1 + \frac{1}{4}} = 1,12,$$

$$k_{\phi 2} = \sqrt{1 + \frac{1}{3 \cdot 4}} = 1,04.$$

Если $\Delta I = 0,7I_{\text{ср}}$, то $k_{\phi 1} = 1,221$ и $k_{\phi 2} = 1,079$.

Дополнительные потери определяются в относительном значении как $k_{\phi} - 1$. При этом видим, что они растут с увеличением размаха колебаний и уменьшаются при сглаживании периодических колебаний по форме.

Схема исследуемой установки

Предлагается комплексное использование синхронного компенсатора, при котором достигается как компенсация реактивной мощности в узле нагрузки, так и «сглаживание» графика нагрузки по току на общих шинах потребления.

На рис. 3 представлена схема сети с резкопеременной нагрузкой, в которой используется синхронный компенсатор с навешенным на вал маховиком с моментом инерции J . Нагрузка, которая создает колебания тока в линии питания W , представлена в виде ступенчатого подключаемого и отключаемого сопротивления нагрузки $R_{\text{нг}}$.

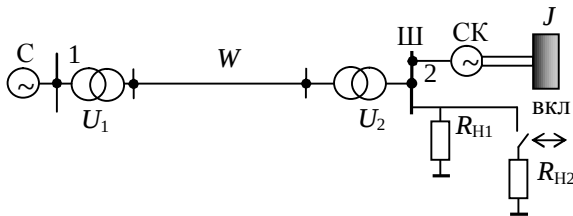


Рис. 3. Схема системы электроснабжения с резкопеременной нагрузкой и синхронным компенсатором с маховиком на валу

Для анализа работы системы используем ее схему замещения, на которой ЭДС синхронного компенсатора обозначим через E , а его внутреннее сопротивление, jx_k . На схеме замещения, рис. 4, сопротивление линии питания W трансформаторов обозначены как jx_c . При этом $\underline{U} = U = \text{const}$.

Исходный режим: сопротивления $r_{\text{н1}}$ определяет начальную нагрузку $P_{\text{нг}}$; синхронный компенсатор не несет активной нагрузки, т.е. $P_{10} = P_{\text{нг}}$, $P_{20} = 0$.

Исходный режим: сопротивления $r_{\text{н1}}$ определяет начальную нагрузку $P_{\text{нг}}$; синхронный

компенсатор не несет активной нагрузки, т.е. $P_{10} = P_{\text{нг}}$, $P_{20} = 0$.

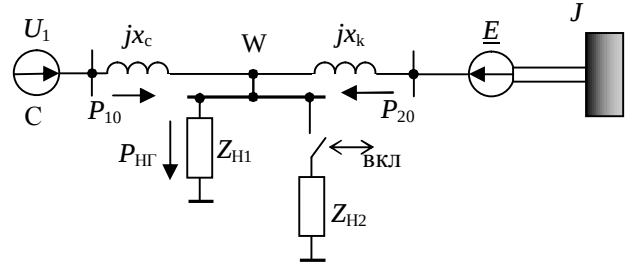


Рис. 4. Схема замещения системы с синхронным компенсатором

На схеме замещения рис. 4 фактически представлена электроэнергетическая система с двумя электростанциями. Основную, мощную станцию представляет сеть C с ЭДС $\underline{U} = \text{const}$, а вторую станцию – синхронная машина с ЭДС $\underline{E}_2 = \underline{E}$.

При подключении дополнительной нагрузки, в виде сопротивления $r_{\text{нг}}$, активная мощность, забираемая из сети в точке «а», скачком возрастет на величину

$$\Delta P_a = \frac{U_a^2}{r_{\text{нг}}}. \quad (1)$$

Напряжение в точке подключения нагрузки U_a несколько изменится, поэтому формула (1) лишь качественно отражает факт скачкообразного увеличения общей активной нагрузки. Дополнительная мощность ΔP_a распределится между источниками U и E в соотношении:

$$\Delta P_{U0} = \Delta P_a \frac{x_k}{x_c + x_k}, \quad (2)$$

$$\Delta P_{E0} = \Delta P_a \frac{x_c}{x_c + x_k}.$$

Здесь принято, что $U \gg E$ по модулю.

Отношение

$$\frac{\Delta P_{U0}}{\Delta P_{E0}} = \frac{x_k}{x_c} \quad (3)$$

показывает, что синхронный компенсатор принимает на себя часть активной нагрузки как генератор.

Приращение нагрузки на синхронную машину обозначим $+ \Delta P_{E0}$, где индекс «0» показывает отношение приращения к начальному моменту времени $t = 0$. На валу машины появляется тормозной электромагнитный момент

$$\Delta M_{E0} = - \frac{\Delta E_0}{\Omega},$$

где W – синхронная скорость (1/с).

Этот момент уравнивается динамическим моментом

$$-\frac{\Delta P_{E0}}{\Omega} = (J_p + J_m) \frac{d\Omega}{dt}, \quad (4)$$

где J_p и J_m – моменты инерции ротора и маховика. Преобразуя уравнение (4) находим

$$-\Delta P_{E0} = J_\Sigma \cdot \Omega \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{J_\Sigma \Omega^2}{2} \right)$$

то есть, мощность $-\Delta P_{E0}$ от СК в режиме генератора покрывается за счет убыли кинетической энергии вращающихся масс с моментом инерции $J_\Sigma = J_p + J_m$. При большом моменте инерции J_Σ снижение скорости ротора будет происходить медленно, и сопровождаться увеличением угла нагрузки d_{12} (угла расхождения роторов синхронного компенсатора с ЭДС E и источника электрической энергии сети с ЭДС U).

С увеличением d_{12} будет происходить переход мощности синхронного компенсатора на сеть. При снижении мощности компенсатора до нуля начнется уменьшение угла d_{12} и компенсатор перейдет из генераторного режима в двигательный. Так как реальной активной нагрузки на компенсаторе нет, то в двигательном режиме, при котором из сети потребляется активная мощность на поддержание вращения ротора, машина будет выдавать реактивную мощность, то есть работать в штатном режиме компенсатора.

Уравнения системы с двумя синхронными машинами и общей нагрузкой

Для количественной характеристики описанного выше процесса используем уравнения системы с двумя электрическими станциями, работающими на общую нагрузку [2].

Общее решение задачи может быть осуществлено с использованием схемы замещения, изображенной на рис. 5.

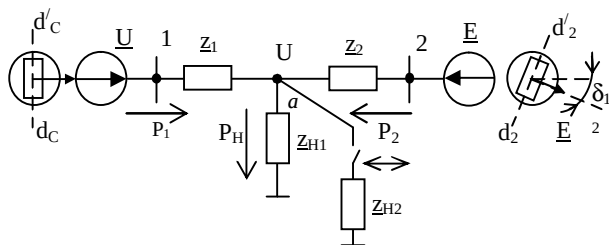


Рис. 5. Схема замещения системы с двухсторонним питанием нагрузки Z_H .

Точка «а» – точка подключения нагрузки Z_H , которая может ступенчато изменяться на большую величину. Распределение мощности между источниками определяется, при заданных пара-

метрах схемы замещения, величиной угла расхождения роторов d_{12} источников:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U^2 y_{11} \cdot \sin a_{11} - UE \cdot y_{12} \cdot \sin(d_{12} + a_{12}); \\ P_2 &= E^2 y_{22} \cdot \sin a_{22} + UE \cdot y_{12} \cdot \sin(d_{12} - a_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Значения проводимости y и углов α определяются сопротивлениями ветвей Z_1, Z_2, Z_H . ЭДС U и E – заранее известные величины (по модулю):

$$\left. \begin{aligned} Z_{11} &= Z_1 + Z_2 \parallel Z_H; \quad Z_{22} = Z_2 + Z_1 \parallel Z_H; \\ Z_{12} &= Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_H}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Соответствующие этим сопротивлениям проводимости y и углы α определяются соотношениями:

$$\underline{z} = r + jx = z < \psi; \quad y = 1/z; \\ \alpha = 90^\circ - \psi.$$

Исходный режим системы определяется спокойной нагрузкой

$$\underline{Z}_{H1} = \frac{U_a^2}{S_{H1}} (\cos j_H + j \sin j_H) \quad (7)$$

Для простоты примем $\underline{Z}_{H1} = r_{H1}$.

В режиме спокойной нагрузки активную мощность синхронного компенсатора можно положить равной нулю, то есть принять $P_2=0$, а $P_1 \gg P_{H1} \gg U_a^2 / r_{H1}$.

Итак, приняв во втором уравнении $P_2=0$, находим значение начального угла расхождения

$$d_{120} = \arcsin \left(\frac{E^2}{E \cdot U} \cdot \frac{y_{220}}{y_{120}} \cdot \sin a_{220} \right) - a_{120} \quad (8)$$

Для оценки порядка значений получаемых величин при расчетах в относительных единицах (о.е.) положим

$$U = 1,0; \quad z_1 = jx_1 = 0,1j; \quad z_2 = jx_2 = 0,05j \\ r_{H1} = 1,0.$$

ЭДС E можно рассчитать по условию $E \approx U_a$, где

$$\underline{U}_a = \frac{U}{r_{H1} + jx_1} \cdot r_{H1}, \quad (9)$$

откуда $\underline{E} = 0,995 < -5,77^\circ$.

При заданных параметрах схемы замещения имеем:

$$y_{11} = 6,67; \quad a_{11} = 0,764^\circ; \quad \sin a_{11} = 0,013;$$

$$y_{22} = 6,71; \quad a_{22} = 3,84^\circ; \quad \sin a_{22} = 0,067;$$

$$y_{12} = 6,67; \quad a_{12} = -1,91^\circ; \quad \sin a_{12} = -0,033.$$

В соответствии с (а) $d_{120} = 5,77^\circ$ (расчет d_{12} по (8) дает $d_{12} = 5,808^\circ$).

После подключения дополнительной нагрузки, включением $r_{H2} = 2r_{H1}$, находим новые

параметры для уравнений (5). Сопротивление нагрузки станет равным

$$r_H = \frac{r_{H1} \cdot r_{H2}}{r_{H1} + r_{H2}} = 0,666.$$

Для этого значения $r_H = 0,666$ (вместо 1,0) находим следующие коэффициенты уравнений (6)

$$y_{11} = 6,68; a_{11} = 1,416^\circ; \sin a_{11} = 0,0247;$$

$$y_{22} = 6,734; a_{22} = 5,668^\circ; \sin a_{22} = 0,00988;$$

$$y_{12} = 6,6578; a_{12} = -2,8624^\circ.$$

Так как угол d_{120} , ввиду большой инерционности ротора синхронного компенсатора, остается неизменным $d_{120} = 5,808^\circ$, то используя уравнение (5) находим

$$P_1 = 1,1640; P_2 = 0,31812.$$

Суммарная нагрузка $P_\Sigma = P_1 + P_2 = 1,482$, как видим, лишь частично воспринята сетью $\Delta p_1 = 0,164$, а большую часть дополнительной нагрузки $\Delta p_2 = 0,318$ принял на себя синхронный компенсатор.

Приведем, далее, результаты изменения мощностей P_1 и P_2 при сбросе нагрузки, если вместо $r_{H1} = 1,0$ в точке «а» подключить $r_{H1} = 1,5$: $P_1 = 0,8903$; $P_2 = -0,233$; $P_\Sigma = 0,6573$.

Общее уменьшение потребляемой мощности составило 0,6573 вместо 1,0. Однако уменьшение мощности сети оказалось меньшим, равным 0,8903. При этом СК перешел в двигательный режим, забрав на себя мощность, равную 0,233.

Сравним теперь размах колебаний мощности без СК и с синхронным компенсатором, в случае колебания сопротивления нагрузки от $r_H = 0,666$ до $r_H = 1,5$:

$$\Delta P_{\max 1} = 1,482 - 0,6573 = 0,825;$$

$$\Delta P_{\max 2} = 1,164 - 0,8903 = 0,274.$$

Как видим, размах колебаний уменьшился практически в три раза.

Таким образом, синхронный компенсатор является «демпфером», или ограничителем колебаний мощности, а следовательно и токовой нагрузки при резком их изменении. Полученные результаты не следует считать как эффективное демпфирование. Все будет зависеть от длительности импульса нагрузки и инерционности ротора. При малой инерционности ротора воспринятая нагрузка будет быстро сбрасываться, не оказывая существенное влияние на результирующее демпфирование.

Электромеханический переходный процесс в системе с двумя источниками ЭДС при внезапном изменении нагрузки

В принятой физической модели такой сис-

темы один из источников ЭДС, а именно – сеть питания с напряжением U , принимается как бесконечно мощная сеть с $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Вторым источником ЭДС E – синхронный компенсатор, может испытывать колебания ротора, в результате которых угол расхождения роторов d_{12} будет изменяться. На ротор компенсатора действует электромагнитный момент демпферной обмотки. Момент активной нагрузки зависит от угла d_{12} , а момент демпферной обмотки – от величин dd_{12}/dt . Уравнения движения ротора при этом можно записать в виде

$$T_j \cdot \frac{d^2 d_{12}}{dt^2} = P_2(d_{12}) + P_a \cdot \frac{dd_{12}}{dt}, \quad (10)$$

где $T_j = J \cdot W_0$ – постоянная инерции, P_a – асинхронная мощность.

В дальнейшем влиянием асинхронной составляющей мощности пренебрегаем. Величину синхронной мощности СК представим, согласно второго уравнения (5), как

$$P_2(d_{12}) = P_{22} - P_{12} \cdot \sin(d_{12} + a_{12}), \quad (11)$$

где все параметры:

$$P_{22} = E^2 y_{22} \cdot \sin a_{22}; P_{12} = E U y_{12},$$

взяты для видов образованного режима при набросе нагрузки. Независимой переменной является угол расхождения d_{12} . В результате уравнение движения (10) принимает вид

$$T_j \cdot \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{22} - P_{12} \cdot \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}). \quad (12)$$

На рис. 6 изображен график $P_2(d)$, полученный по уравнению (11).

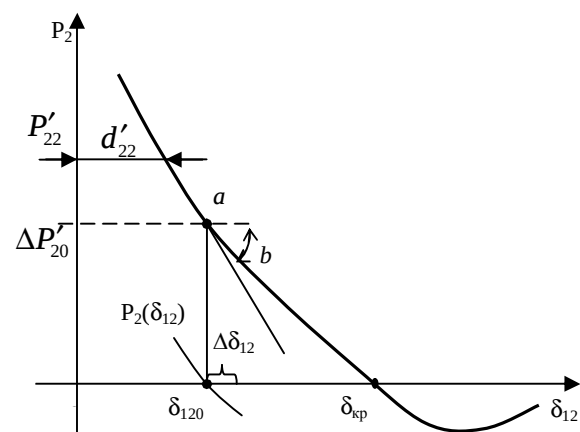


Рис. 6. График зависимости $P_2(\delta)$

На рис. 6 точка «а» определяет начальные значения мощности P_{20} при начальном угле расхождения роторов d_{120} . В дальнейшем угол d_{12} будет расти, а мощность P_{12} будет падать. При $d_{кр}$ мощность упадет до нуля. Суть вопроса – сколько

времени составит изменение угла от d_{120} до $d_{кр}$, для чего необходимо решать уравнения (12).

Разложим функцию мощности в окрестности точки «а» в ряд Тейлора, и возьмем в разложении члены ряда не выше первого порядка, тогда:

$$P_2(d_{12}) = \Delta P_{20} - \frac{dP_2}{dd_{12}} \cdot d_{12}, \quad (13)$$

где производная $\frac{dP_2}{dd_{12}} < 0$.

Выразим δ_{12} как независимую переменную через приращение угла

$$d_{12} = d_{120} + \Delta d_{12},$$

тогда

$$\frac{dP_2}{dd_{12}} = d_{120} \cos(d_{120} + a_{12}) \quad (14)$$

будет постоянным коэффициентом с отрицательным знаком.

Учтем далее, что

$$\frac{d\delta_{12}}{dt} = \frac{d\Delta\delta_{12}}{dt}; \quad \frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = \frac{d^2\Delta\delta_{12}}{dt^2}.$$

Величина, определяемая (14), называется синхронизирующей мощностью [2]. Обозначим ее P_c .

В результате уравнение движения (12) преобразуется к виду

$$T_j \frac{d^2\Delta d_{12}}{dt^2} + P_c \Delta d_{12} = P_{20}, \quad (15)$$

где d_{12} является искомой функцией времени t .

Решение (15) позволяет установить зависимость изменения $d_{12}(t) = d_{120} + \Delta d_{12}(t)$. В результате может быть найдена зависимость $P_2(t)$.

Пусть внешнее возмущение P_{20} имеет вид ступенчатой функции, см. рис. 7, и представляет начальный наброс мощности на синхронный компенсатор.

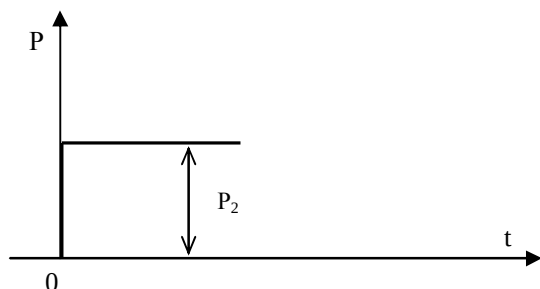


Рис. 7. Ступенчатая функция P_{10}

Дальнейшее изменение этой мощности учитывается вторым слагаемым слева (15).

Решение уравнения вида (15) находим, например, в книге [7]. Представим его в обобщенных координатах q , соответствующих d_{12}

$$a\ddot{q} + cq = Q_F(t), \quad (16)$$

где $a = T_j$; $c = P_c$; $Q_F(t) = \Delta P_{20}$ обобщенная сила (в общем случае – функция времени), в нашем случае – постоянная величина.

Решение (16) при нулевых начальных условиях, $\dot{q}_0 = 0$ и $q_0 = 0$ имеет вид

$$q(t) = \frac{1}{a \cdot k} \int_0^t Q(t) \cdot \sin k(t - t_1) dt_1, \quad (17)$$

где $k = \sqrt{\frac{c}{a}}$ – момент времени приложения к системе обобщенной силы $Q(t)$.

Для рассматриваемого случая $Q(t) = Q_k = \text{const}$ и решение (17) принимает вид

$$q(t) = \frac{Q_F}{a \cdot k^2} (1 - \cos kt). \quad (18)$$

Используем значения коэффициентов рассматриваемого уравнения (15), и запишем

$$k = \sqrt{\frac{P_{12} \cos(\delta_{120} + \alpha_{12})}{J\Omega_0}}; \quad a = J\Omega_0,$$

$$Q_F = \Delta P_{20}.$$

Решение (15) принимает вид

$$\Delta d_{12}(t) = \frac{\Delta P_{20}}{P_{12} \cos(d_{120} + a_{12})} \cdot \left(1 - \cos \sqrt{\frac{P_{12} \cos(d_{120} + a_{12})}{J\Omega_0}} t \right), \quad (19)$$

где выражение под знаком радикала имеет размерность круговой частоты

$$k^2 = \frac{P_{12} \cos(\delta_{120} + \alpha_{12})}{J\Omega_0}. \quad (20)$$

Используя зависимость $\Delta d_{12}(t)$ из (19) можно найти изменение активной мощности во времени, вырабатываемой синхронным компенсатором в режиме генератора:

$$P_2(t) = P_{22} - P_{12} \sin[(\delta_{120} + \Delta\delta_{12}(t)) + \alpha_{12}],$$

При этом в момент $t = 0$ $\Delta d_{12}(0) = 0$.

Рассмотрим распределение мощности между сетью и компенсатором после внезапного подключения нагрузки. Эту дополнительную мощность представим в виде прямоугольного импульса величиной ΔP_H и длительностью t , рис. 8.

Будем исходить из условия, что суммарная энергия потребления в течение импульса нагрузки $\Delta P_H \cdot t$. Тогда

$$\Delta P_H \cdot t = \int_0^t [P_1(t) + P_2(t)] dt, \quad (21)$$

отношение

$$k_u = \frac{\int_0^t P_2(t) dt}{\Delta P_H \cdot t} \quad (22)$$

можно охарактеризовать как коэффициент сглаживания или заполнения импульса нагрузки за счет компенсатора. Из рассмотрения графика видно, что чем больше момент инерции J , тем больше коэффициент $k_{\text{и}}$ и, значит, тем эффективнее сглаживание ($J_1 < J_2 < J_3 < J_4$).

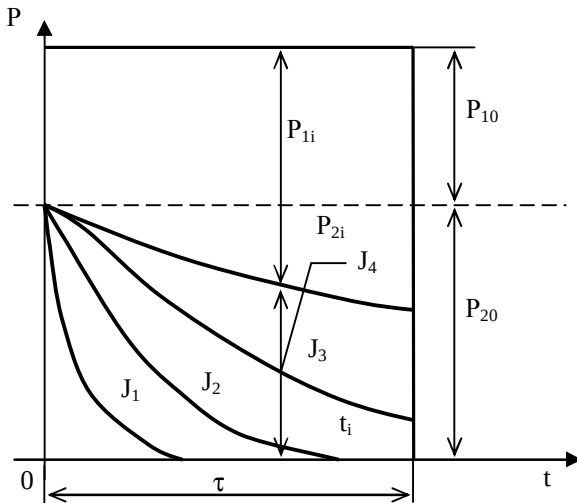


Рис. 8. Изменение мощности нагрузок на сеть (P_1) и компенсатор (P_2) на интервале времени импульса τ

Дальнейшие расчеты по определению необходимого момента инерции J , или постоянно инерции $T_j = J \cdot \Omega_0$, связаны со сложными вычислениями. Эти вычисления могут быть выполнены на ЭВМ в соответствии с разработанной математической моделью. При этом нужно учитывать особенности самого графика резкопеременной нагрузки – размах колебаний, форму импульсов и среднее время импульсов. Возможно решение задачи для среднестатистического графика, если он носит случайный характер, то есть имеет вид нестационарных колебаний.

Заключение

Разработанная математическая модель ограничения колебаний тока или активной мощности может быть использована для решения задачи оптимального выбора величины маховикового накопителя энергии, навешиваемого на вал синхронного компенсатора. При выборе момента инерции маховика определяющим фактором является размах и средняя частота колебаний мощности, целесообразность их ограничения до заданной величины. После технико-экономического обоснования об использовании маховикового накопителя энергии могут рассматриваться далее различные конструктивные решения для реализации предлагаемого способа.

Список литературы

1. Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергетических ВУЗов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.: Высшая школа; 1989. – 159 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
3. Харизоменов И.В. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин: учебник для ВУЗов / И.В. Харизоменов. – М.: Высшая школа, 1970. – 185 с.
4. Куско А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон. – М.: Додека – XXI, 2008 – 336 с.
5. Пронина А.К. Моделирование дизель-генераторной установки в режимах резких изменений нагрузок / А.К. Пронина, А.М. Олейников // Сб. науч. тр. СТУЭИП. – Севастополь: СТУЭИП, 2014. – Вып. 2(50). – С. 176 – 185.
6. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
7. Яблонский А.А., Нореико С.С. Курс теории колебаний. Учебное пособие для студентов ВТУЗов, изд. 3-е, испр. и доп. М., «Высшая школа», 1975 – 248 с.

References

1. Astakhov Yu.N. i dr. *Nakopiteli energii v elektricheskikh sistemakh* [The manual for High Schools electricity Energy Storage in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 159 p.
2. Zhdanov P.S., Zhukova L.A. *Voprosy ustoichivosti elektricheskikh system* [Questions of stability of electrical systems]. Moscow, Energiya, 1979, 456 p.
3. Kharizomenov I.V. *Elektrooborudovanie kuznechno-shtampovochnykh mashin* [Electrical forging and stamping machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1970, 185 p.
4. Kusko A., Tompson M. *Kachestvo energii v elektricheskikh setyakh* [Power quality in electrical networks]. Moscow: Dodeka – XXI, 2008, 336 p.
5. Pronina A.K., Oleynikov A.M. Modeling of diesel generator set in the modes of sudden load changes. *Sbornik nauchnykh trudov SNUYaEIP*, Sevastopol', *SNUNE&I*, 2014, No. 2(50), pp. 176 – 185.
6. Zhezhelenko I.V. *Quality parameters of power and control of industrial plants* [Pokazатели kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh]. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 168 p.
7. Yablonskii A.A., Noreiko S.S. *The course of the theory of vibrations* [Kurs teorii kolebaniy]. Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 248 p.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.9:33

Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², Д.А. Чванова³

ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²little@mail.ru, ³1darina1.93@mail.ru

Статья поступила 02.03.2016 г.; после доработки 04.03.2016 г.

Аннотация

Проведены исследования режимов работы фотоэлектрических модулей, используемых для зарядки аккумуляторных батарей в солнечных установках. Вся система предназначена для электрообеспечения автономных потребителей. Для увеличения мощностных характеристик установки предлагается использование солнечных концентраторов.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, электрообеспечения автономных потребителей, двухсторонние модули.

The Photovoltaic Installation to Ensure Smooth Operation of Autonomous Consumers

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakyshina², E.G. Kakyshina²

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

¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²little@mail.ru, ³1darina1.93@mail.ru

Received 02.03.2016 y.; received in final form 04.03.2016 y.

Abstract

Describes the study of modes of operation of the PV modules used for battery charging in solar installations, the entire system is designed to supply Autonomous consumers. To increase the power characteristics of the installation proposes the use of solar concentrators.

Keywords: photovoltaic module, the electrical supply of Autonomous consumers, double-sided modules.

Введение

В условиях нынешнего положения в сфере электроснабжения Крыма настала пора в срочном порядке устанавливать дополнительные мощности по выработке электрической энергии, как для промышленных объектов, так и для индивидуальных потребителей [1]. В частности многие жилые дома уже обеспечены бензиновыми и дизельными генераторами небольшой мощности от 1 до 5 кВт и более. Однако все эти

меры не предусматривают того, что для эффективной работы этих систем необходимо постоянное энергообеспечение полуострова традиционными энергоресурсами (углеводородами) в размерах значительно превышающих их плановые поставки. В условиях не только энергетической, но и транспортной блокады полуострова эти поставки становятся не только дорогостоящими, но и проблематичными. С учетом всего выше сказанного развитие альтернативных (вет-

ровых и солнечных) энергоустановок в Крыму является одной из приоритетных задач.

Имеющиеся в Крыму солнечные фотоэлектрические станции передают выработанную электроэнергию непосредственно в общую энергосистему [1]. Однако непостоянство потока солнечной энергии приводит к неравномерной выработке энергии этими станциями, и как следствие оказывает негативное воздействие на электрические сети и подстанции. Также эти электростанции не решают задачу надёжного поставщика электрической энергии для Крыма.

Из-за постоянных перебоев с электроснабжением многие потребители в Крыму установили аккумуляторные системы для бесперебойного электроснабжения. При оснащении аккумуляторных систем жилых домов фотоэлектрическими модулями можно значительно снизить электропотребление в масштабах Крыма, а также обеспечить автономное электроснабжение индивидуальных потребителей.

Постановка задачи исследования

Главной проблемой использования солнечных установок является невысокая плотность и непостоянство потока солнечной радиации [2]. Коэффициент преобразования солнечной радиации в электрическую энергию кремниевыми фотоэлектрическими модулями составляет 15...20 %, что также недостаточно для их эффективного использования. Чтобы изучить возможность использования фотоэлектрических систем с концентраторами и аккумуляторной станцией для обеспечения потребителей необходимо провести исследования в натурных условиях при использовании заводского оборудования.

Задачами исследования ставились изучение вольт-амперных и мощностных характеристик модулей и аккумуляторов при повышенной интенсивности светового потока за счет использования концентраторов. Для решения выше описанных задач авторами предлагается использовать двухсторонние фотоэлектрические модули [3], которые могут более эффективно работать с концентраторами, которые также представляют специальную конструкцию, при этом эффективность всей системы увеличивается, а время зарядки аккумуляторной станции значительно сокращается.

Исследование режимов работы фотоэлектрических модулей

С целью получения характеристик для эффективной работы фотоэлектрического модуля

проводились эксперименты по определению различных режимов работы серийного заводского модуля российского производства RS 250 (рис. 1).



Рис. 1. Фотоэлектрический модуль RS 250

Исследования характеристик фотоэлектрического модуля проводились при различных температурных показателях, различной солнечной освещенности (ясная погода, переменная облачность, пасмурно), в различное время года, эти данные сравнивались со значениями заводской вольт-амперной характеристики модуля.

Значения вольт-амперной характеристики модуля полученные при освещенности 960 Вт/м^2 представлены на рис. 2.

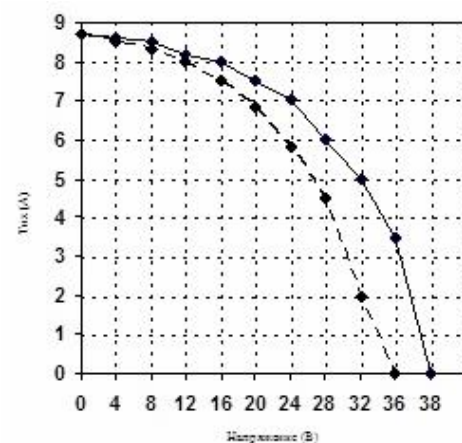


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика модуля RS 250 (пунктир) в сравнении с заводской BAX (сплошная)

Все эксперименты проводились на территории кафедры «Возобновляемые источники энер-

гии» Севастопольского государственного университета, института ядерной энергии и промышленности в сходных условиях, а именно при постоянной солнечной освещенности во время проведения эксперимента, с одними и теми же измерительными приборами.

При проведении исследований использовался метод прямых измерений по току и напряжению фотопреобразователя при переменном нагрузочном сопротивлении. Эксперименты проводились в натурных условиях на открытой площадке, при естественном солнечном освещении.

По вольт-амперным характеристикам можно говорить о качестве работы модуля (рис. 3). По мощностным характеристикам можно говорить, о том какую выработку электрической энергии мы получим в данное время года, суток, при данных климатических факторах. Эти результаты необходимы при расчетах систем солнечного электрообеспечения, при проектировании фотоэлектрических станций.

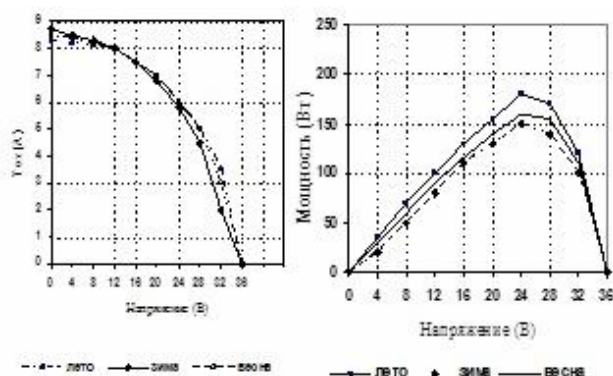


Рис. 3. Вольт-амперная и мощностная характеристики модуля RS 250 (данные получены при освещенности 800 Вт/м^2)

В натурных условиях изменения угла падения лучей на приемную поверхность фотоэлектрического модуля на определенный градус приводят к изменению освещенности рабочей поверхности модуля $E_{\text{бат}}$ на определенную величину [4], что, в свою очередь, влияет на работу фотоэлектрического модуля. Смоделировать ситуацию изменения освещенности рабочей поверхности при движении Солнца по горизонту можно, изменяя в течение короткого времени положение угла установки фотоэлектрического модуля к горизонту и, проводя при этом прямые измерения тока и напряжения модуля при изменении нагрузочного сопротивления. При увеличении освещенности солнечной батареи ток, вырабатываемый ею, увеличивается в прямой зависимости.

Для расчетов вырабатываемой мощности солнечной фотоэлектрической батареи ($P_{\text{бат}}$) использовалась формула [5]:

$$P_{\text{бат}} = E_0 \eta_{\text{эл}} S_{\text{бат}} \cos(K \cdot \alpha_0),$$

где $\eta_{\text{эл}}$ – КПД элементов, E_0 – солнечная освещенность, $S_{\text{бат}}$ – площадь солнечной батареи, K – суммарный коэффициент ослабления светового потока, зависящий от конкретной конструкции и количества защитных покрытий модуля, α_0 – угол между нормалью к плоскости модуля и солнечными лучами.

На рис. 4 приведены теоретические и экспериментальные значения различных параметров фотоэлектрических модулей в зависимости от угла установки.

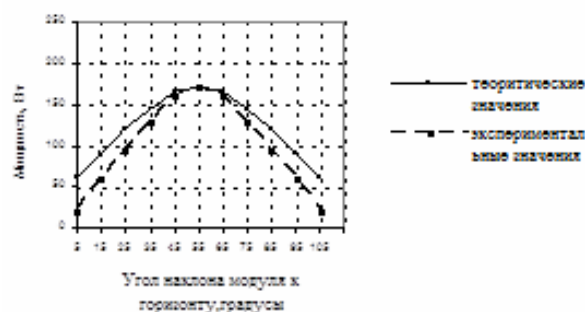


Рис. 4. Зависимость изменения выходной мощности фотоэлектрического модуля RS 250 при изменении угла наклона модуля к горизонту

Работа модуля с аккумулятором

Чтобы изучить возможность использования фотоэлектрических систем с концентраторами и аккумуляторной станцией для обеспечения потребителей необходимо провести исследования в натурных условиях при использовании заводского оборудования.

При проведении экспериментов была получена зависимость зарядной емкости аккумулятора в зависимости от времени зарядки (рис. 5).

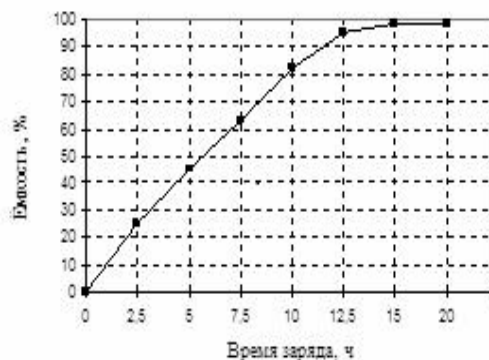


Рис. 5. Зависимость относительной ёмкости заряда аккумулятора от времени заряда, при освещенности 850 Вт/м^2

Зависимость относительной емкости выражается как функция: $c = f(t)$, при постоянной освещенности $E = 850 \text{ Вт/м}^2$.

При измерении потока солнечной радиации, можно определить зависимость тока заряда от солнечной освещенности: $I = f(E)$ (рис. 6). Как видно из графика эта зависимость, является нелинейной.

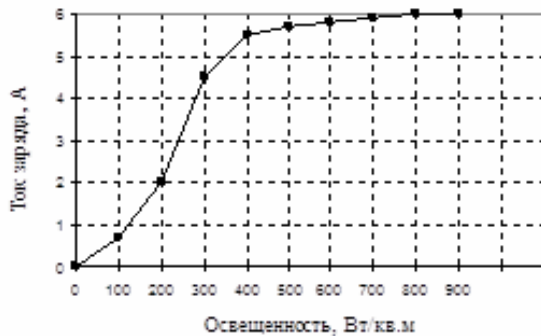


Рис. 6. Зависимость тока заряда от солнечной освещенности

Установка для обеспечения индивидуального потребителя с двух сторонними модулями

Для обеспечения индивидуального потребителя нами была предложена установка, состоящая из двух фотоэлектрических модулей (рис. 7).



Рис. 7. Установка для обеспечения жилого дома

Установка состоит из двух модулей двух сторонней конструкции производства фирмы «Квазар» (рис. 8), т.е. кремниевые фотоэлементы расположены с лицевой и тыльной стороны. Лицевая сторона имеет максимальную мощность 110 Вт, на ней расположено 721 элемента. Тыльная сторона имеет мощность 55 Вт и на ней также расположено 72 элемента (рис. 8). Следовательно, суммарная мощность одного модуля 160 Вт, а всей установки 320 Вт. Этой мощности хватает для обеспечения заряда трех аккумуляторов, распо-

ложенных на чердачном помещении здания, где также находится система управления (рис. 9)



Рис. 8. Двух сторонние фотоэлектрические модули («Квазар») (суммарная мощность 160 Вт)



Рис. 9. Соединение аккумуляторов

Мощность каждого из 72 солнечных элементов лицевой стороны приблизительно составляет 1,52 Вт при к.п.д. 15 %. На лицевой стороне мощность одного элемента составляет 0,76 Вт, эти элементы рассчитаны на работу при отраженной солнечной радиации небольшой интенсивности (рис. 10).

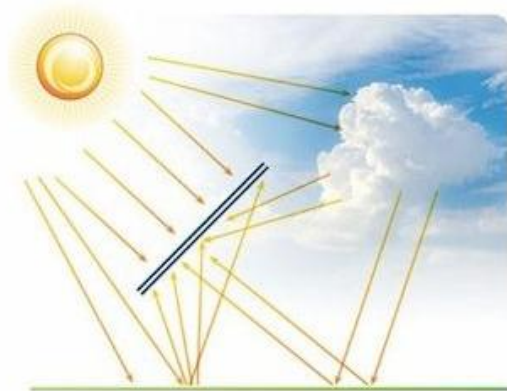


Рис. 10. Работа двух сторонних фотоэлектрических модулей (схема заводской системы)

Работа этих модулей рассчитана на прямое и отраженное солнечное излучение (рис. 10), отражение происходит от светлой поверхности расположенной на Земле. Как видно для увеличения мощности отраженной солнечной радиации необходимо использовать покрытия с высоким коэффициентом отражения. При этом площади необходимые на установку фотоэлектрической системы сокращаются на половину. Т.к. мощность тыльной стороны составляет 50 % от мощности лицевой стороны.

Размеры солнечных элементов на обеих сторонах модуля одинаковые. Площадь одного фотопреобразователя составляет 10 x 10 см. Геометрические размеры каждого модуля: длина 130 см, ширина 66 см.

Для работы тыльной стороны и увеличения мощностных характеристик лицевой стороны фотоэлектрического модуля нужно использовать солнечные концентраторы. Важное условие сконцентрированного солнечного излучения, это равномерное распределение светового потока по всей площади рабочей поверхности солнечной фотоэлектрической установки. Т.к. электрические параметры элементов одинаковы и рассчитаны на одинаковую освещенность, то при нарушении этого правила работа некоторых мало освещенных элементов модуля будет вредить работе остальных, а мощностные характеристики всей электрической системы будут падать.

Используя выше описанное условие можно утверждать, что для работы фотоэлектрической установки необходимо использовать плоские солнечные концентраторы с равномерным освещением рабочей поверхности.

Конструкция концентратора должна соответствовать и заводской системе изображенной схематично на рис. 10.

Примерная конструкция такого концентратора показана на рис. 11.

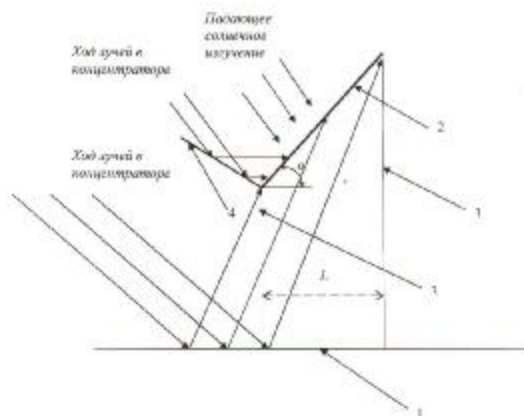


Рис. 11. Плоский концентратор для фотоэлектрического модуля

На рис. 11 следующие обозначения: 1 – отражающая поверхность большой площади; 2 – фотоэлектрический модуль (103 x 66 см); 3 – стойки модуля; 4 – отражающая боковая поверхность концентратора; L – расстояние между стойками; α – угол установки модуля (по отношению к отражающей поверхности 1); β – угол установки модуля (по отношению к отражающей поверхности 4).

Как видно из рис. 11 в качестве концентратора применены две отражающие конструкции (поверхности). Одна большой площади 1 (её размеры много больше размеров модуля по длине и ширине) она отражает свет на тыльную сторону, вторая 4 имеет одинаковые размеры с модулем и отражает поток солнечной радиации на лицевую сторону.

Боковые отражающие поверхности представляют собой конструкции с ровной поверхностью. Материалом для отражающих поверхностей предполагается выбрать светоотражающую фольгу. Такой концентратор представляет простую дешевую конструкцию, при этом отражающие характеристики фольги необходимые для увеличения рабочих характеристик модуля не уступают дорогим зеркальным отражателям.

Концентраторы плоской конструкции с отражающей фольгой были собраны в институте ядерной энергии и промышленности на кафедре Возобновляемых источников и электрических системы и сетей. После разработки и изготовления всей конструкции были проведены исследования в натурных условиях электрических характеристик промышленного фотоэлектрического модуля RS 250 с концентратором. Исследования проводились в ясные дни при максимальной освещенности, значения повышенной плотности солнечного потока при использовании концентратора достигало 1500 Вт/м². При проведении исследований использовался метод прямых измерений тока и напряжения модуля, при заданных нагрузочных характеристиках. Результаты исследований приведены на рис. 12.

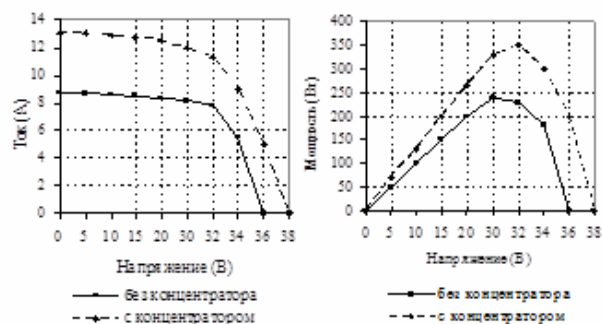


Рис. 12. Вольт-амперные и мощностные характеристики фотоэлектрического модуля RS 250

Как видно из графиков, представленных на рисунке 12, значения мощности вырабатываемой фотоэлектрическим модулем увеличивается более чем на 40 %. При этом видно, что значения тока не превышают заводских предельных характеристик, составляющих 13 А.

Вольт-амперные и мощностные характеристики соответствуют нормальной работе модуля, следовательно, отраженный поток солнечной радиации равномерно распределен по рабочей поверхности.

Мы видим, что падения к.п.д. солнечных элементов не наблюдается, следовательно, нет перегрева рабочей поверхности модуля.

При работе в натуральных условиях такого концентратора его небольшие габаритные размеры (рисунок 11) и расположение под углами отражателей удовлетворяют ветровым нагрузкам.

Выводы

1. Использование фотоэлектрических систем с аккумуляторными станциями позволяет экономно распределять нагрузку в течении суток и экономить энергетические ресурсы.

2. Предложенный концентратор, используемый для фотоэлектрической системы представляет простую и дешёвую конструкцию, повышающую мощностные характеристики модуля на 40 %, что может составлять значительную экономию стоимости всей установки за ватт вырабатываемой мощности.

3. Использование двухсторонних модулей позволяет экономить площади для установки фотоэлектрических систем до 50 %.

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Перспективы развития солнечной энергетики в Крыму / В.В. Кувшинов // Сб. науч. работ СКУЭЭиП. – Севастополь: СКУЭЭиП, 2013. – Вып. 1 (45). – С. 182 - 189.
2. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун // – М.: Наука, 1985. – 300 с.
3. Вейси Ф. Расчет тепловых режимов двухстороннего приемника излучения в статическом солнечном концентраторе / Ф.Вейси, Сергиевский Э.Д., Тюхов И.И. // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции, 12-13 мая 2004 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004. – Ч. 4. – С. 114 - 120.
4. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
5. Кувшинов В.В. Использование солнечных концентраторов для повышения мощностных харак-

теристик сетевых фотоэлектрических станций / В.В. Кувшинов // Сб. науч. работ СКУЭЭиП. – Севастополь: СКУЭЭиП, 2014. – Вып. 1 (49). – С. 144 - 149.

References

1. Kuvshinov V.V. The prospects of development of solar energy in Crimea. *Sbornik nauchnykh trudov SNUNE&I*. Sevastopol, SNUNE&I, 2013, No. 1 (45). pp. 182 - 189.
2. Koltun M.M. *Optika i metrologia solnechnih elementov* [Optics and Metrology of solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 300 p.
3. Veisi F. Thermal modes of two-way radiation receiver in a static solar concentrator. *Materialy 4-oi Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of 4-th International scientific-technical conference], Moscow, GNU VIES, Publ., 2004. pp. 114 - 120.
4. Rauschenbach G. *Spravochnik po proektirovaniu colnechnix batarei* [Guide for the design of solar panels], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 397 p.
5. Kuvshinov V.V. The use of solar concentrators to increase the power characteristics of the network of photovoltaic plants. *Sbornik nauchnykh trudov SNUNE&I*. Sevastopol, SNUNE&I, 2014. No. 1 (49). pp. 144 – 149.

УДК 620.92

Сравнительный анализ эффективности двух схем маятниковых преобразователей энергии волн

В.В. Чебоксаров

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская -33,
г. Севастополь, 299053, Россия, vchebox@gmail.com

Статья поступила 16.02.2016 г.; после доработки 18.02.2016 г.

Аннотация

Показано, что использование резонансных технологий, в особенности маятниковых, является наиболее перспективным для установок большой мощности. Также рассмотрены две схемы маятниковых преобразователей малой мощности, для которых составлены расчетные модели в среде Matlab. Результаты проведенного цифрового моделирования показывают, что двухзвенный маятниковый преобразователь обеспечивает несколько большую энергетическую эффективность, но его работа характеризуется нежелательными динамическими явлениями.

Ключевые слова: волновая энергетика, эффективность, маятник, колебания, моделирование, MatLab, SimDriveline.

Comparative Analysis of Two Schematics of Pendulum-Type Wave Energy Converters

V.V. Cheboxarov

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia; vchebox@gmail.com

Received 16.02.2016 y.; received in final form 18.02.2016 y.

Abstract

It is shown that resonance technologies and, in particular, pendulum-based ones will have good future for large-scale power generation. Two schematics for a small size pendulum-type converter are also considered. Matlab models are developed. Results of numerical simulation show that a 2-link pendulum converter has slightly better power efficiency. However it also suffers from undesirable dynamic disturbances.

Keywords: wave energy, efficiency, pendulum, oscillations, simulation, MatLab, SimDriveline.

Введение

Использование энергии волн является одним из многочисленных видов возобновляемой энергетики. Гравитационные волны представляют собой эллиптические движения частичек воды в приповерхностном слое водоема, гребни и подошвы которых распространяются в некотором горизонтальном направлении. Волны образуются в результате продолжительного по времени движения приводного слоя воздушных масс, в свою очередь возникающего из-за разности температур участков поверхности. Таким образом, энергия волн является лишь одним из

этапов преобразования солнечной энергии, поглощаемой планетой Земля, а конкретно, непосредственного преобразования ветровой энергии. При этом, волновая энергетика имеет важное преимущество перед ветровой, основывающееся на увеличенной примерно в 820 раз плотности текучей среды, в результате чего размеры водяных энергетических установок уменьшаются по сравнению с ветровыми аналогичной мощности. Другим важным преимуществом волновой энергетики является относительно высокая стабильность волнового климата во многих прибрежных океанских зонах. Потенциал развития

волновой энергетики поистине огромен. Согласно некоторым оценкам, см., например [1,2], суммарная мощность волновых процессов на глубокой воде достигает 1 - 10 ТВт, а у берегов экономически эффективно извлекаемые ресурсы волн достигают 800 ГВт [3].

Первый известный патент по использованию энергии волн датируется 1799 годом. Впервые устройство, питаемое от энергии волн, было создано во Франции более 100 лет назад. Интенсивные научные исследования в области волновой энергетики проводятся в ряде стран, в основном Европейских, уже в течение десятилетий. Однако достаточно мощные энергетические устройства в этой области были созданы лишь недавно. Первый коммерческий проект волновой энергетики, Pelamis Wave Power, был развернут у берегов Португалии только в 2008 году [4]. Объяснением этому является главным образом относительно высокая трудность эффективной утилизации волновой энергии из-за сложного характера движения частиц воды и большой ширины волнового спектра.

Данная работа посвящена анализу места резонансных технологий в волновой энергетике, а также сравнительному исследованию энергетической эффективности двух перспективных схем маятниковых преобразователей энергии волн.

Обзор основных технологий волновых энергетических установок

В отличие от ветроэнергетических установок, в волновой энергетике наблюдается очень большое разнообразие технологий, отличающихся методами утилизации энергии волн, а также глубиной и местом расположения преобразователя. Соответственно можно провести их классификацию, например, по расположению и размеру первичного преобразователя. Однако наибольший научный интерес представляет прежде всего классификация по методу преобразования. Рис. 1 показывает общепринятую классификацию, отображающую основные технологии, где для каждого блока существует на сегодня хотя бы один проект, достигший по меньшей мере стадии прототипа.

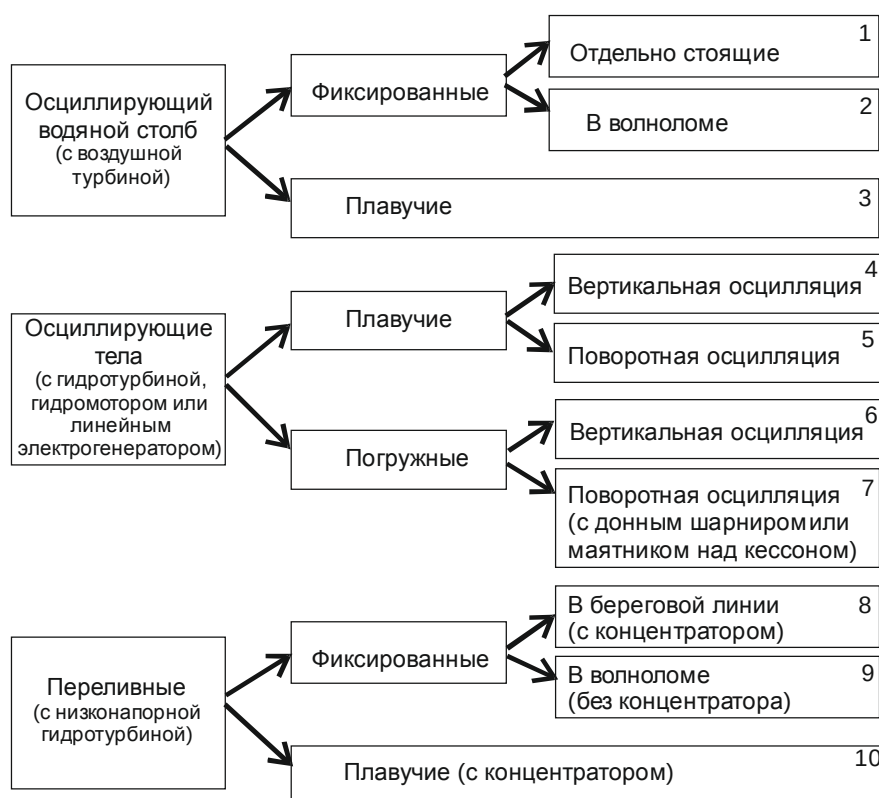


Рис. 1. Классификация технологий волновых преобразователей энергии

Краткие описания всех перечисленных технологий, а также проектов по созданию энергокомплексов, основанных на их использовании, легко могут быть найдены в уже многочислен-

ной технической литературе или на интернет-ресурсах (см., например [3, 5]). При их анализе выясняется, что группа методов с извлечением энергии из бассейна выше уровня моря, запол-

няемого волнами (блоки 8 – 10 на рис.1), получают в настоящее время наименьшее распространение. Этому можно найти следующие объяснения:

- в схемах с заполнением резервуаров на берегу или в волноломах (блоки 8 и 9), волны, прошедшие через мелководную зону, имеют существенно меньшую энергию, чем на глубоководном участке, до подхода к берегу,
- для сглаживания пульсаций потока воды, поступающей в бассейн, его расчетная площадь должна превышать десять тысяч кв. метров, что делает неэкономичным схему с плавучим резервуаром (блок 10),
- движение молекул воды при морском волнении происходит по сложным пространственным траекториям, а, следовательно, при преобразовании его кинетической энергии сначала в потенциальную энергию воды в бассейне неизбежны существенные потери.

Таким образом, обращает на себя внимание тот факт, что абсолютное большинство проектов и соответствующих им технологий (блоки 1 – 7) включают непосредственную передачу энергии волн некоторой промежуточной колебательной системе. В технологиях с осциллирующим водяным столбом (блоки 1 – 3) такую систему образует упругость воздуха, запираемого водой в замкнутом объеме. В донном кессоне (блок 7) сначала возникают колебания воды вследствие отражения волны от стенки кессона. В остальных случаях присутствует колебания плавучего (погруженного) тела, на которое непосредственно воздействуют переменные гидростатические и гидродинамические силы. Данное тело или поток воздуха в осциллирующем водяном столбе и взаимодействует с полезной нагрузкой, поглощающей энергию морских волн.

В этой связи встает вопрос об условиях максимально эффективной передачи энергии от волн в колебательную систему. В работе [6] на примере системы «масса плавучего тела на пружине» показано, что таким условием является совпадение частоты регулярной волны (максимума энергетического спектра нерегулярного волнения) с резонансной частотой системы. В частности, для указанной системы резонансная частота рассчитывается с учетом присоединенных масс воды. На практике соблюдение данного условия встречает следующие проблемы:

- сверхнизкая частота волн может привести к труднодостижимому сочетанию параметров элементов колебательной системы,
- непостоянство характеристик волнения приводит к снижению эффективности из-за уxo-

да пика спектра от резонанса. Причем, при низком коэффициенте рассеяния зависимость снижения эффективности от рассогласования частот существенно увеличивается [6].

Оценим возможности преодоления указанных проблем для основных типов механических колебательных систем. Период собственных колебаний T_0 в системе «масса на пружине» и для маятника может быть определен по известным формулам (1) и (2) соответственно:

$$T_0 = \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{C}}, \quad (1)$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L_{\text{пр}}}{g}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса осциллирующего тела (столба воды), C – жесткость крепления упругого тела, $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина физического маятника, g – ускорение свободного падения.

Задав $T_0 = 10$ с (типичная величина периода волн в океане) и максимальным реалистичным значением приведенной массы $m_{\text{пр}} = 10^5$ кг, из формулы (1) получаем $C = 10^3$ Н/м. Такое экстремально низкое значение жесткости невозможно получить с каким-либо твердотельным упругим элементом, но оно вполне может быть обеспечено сжимаемостью газа в большом замкнутом объеме. Следовательно, популярность технологии осциллирующего водяного столба (блоки 1 – 3) объективно обоснована потенциально более высокой эффективностью при работе в резонансном режиме. В то же время, вторая из упомянутых выше проблем с данной технологией решена быть не может, т.к. не представляется возможным кратно изменять объем сжимаемого водяного столба. Поэтому существенно положительный резонансный эффект у технологии осциллирующего водяного столба достигим лишь в районах с максимально стабильным волновым климатом. Еще одним ограничением данной технологии является наличие промежуточного преобразования энергии волны – воздух, т.к. эффективность следующей ступени преобразования с турбиной Уэллса имеет известные теоретические пределы.

При $T_0 = 10$ с из формулы (2) получаем $L_{\text{пр}} = 25$ м, что ориентировочно соответствует длине реального физического маятника $L = 35 - 40$ м. Изготовление плавучих установок с маятником такого масштаба не представляет большой сложности. Привод электрогенератора с отбором мощности с колеблющегося маятника может быть реализован посредством механических передач с минимальными потерями без преобразования вида

энергии. При этом, из технической и патентной литературы известны несколько технических решений по изменению приведенной длины маятника $L_{пр}$ в необходимом диапазоне (см., например [7]). Таким образом, по мнению автора, технология преобразования энергии волн с маятниковым механизмом на плавучей глубоководной платформе (относится к блоку 5 на рис. 1) является наиболее перспективной, потенциально способной резко увеличить выработку на установках волновой энергетики большой мощности.

В плавучих волновых преобразователях средней (до 1 МВт) и малой мощности (в герметичных буюх) полноценный резонансный режим невозможен, однако и для них применение маятниковых механизмов получает в последнее время всё большую популярность, например, по схеме SEAREV [8]. Во многих таких устройствах гармонические колебания маятника заменяются нелинейным суб-оптимальным фазовым управлением (управлением с фиксацией) [9], повышающим эффективность преобразования для маятников с более коротким периодом собственных колебаний, чем у возбуждающей их волны.

Постановка задачи

Одним из видов нелинейных колебательных систем, потенциально пригодных для маломощных источников энергии, например, в навигационных буюх, является предложенный малой инновационной компанией Thrust Cycle (США) маятниковый механизм, в котором в концевой блок (груз) на подвесе интегрированы все остальные обязательные элементы преобразователя: обгонная муфта, маховик и электрогенератор [10]. Упрощенная схема этого устройства приведена на рис. 2. Здесь предполагается использование многополюсного генератора на постоянных магнитах с компактным мультипликатором, например, планетарным (условно не показан).

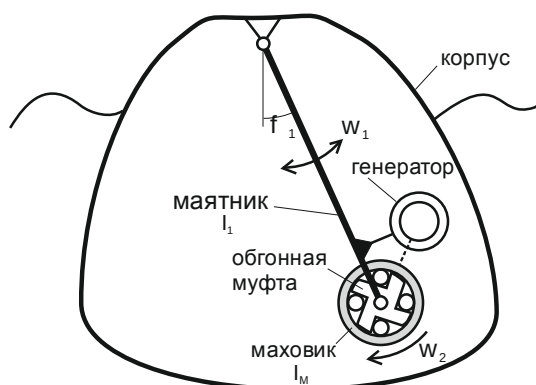


Рис. 2. Схема маятникового преобразователя с интегрированным в концевой блок электрогенератором

Вариантом исполнения устройства является составной (двухзвенный) маятник с односторонним упором в промежуточном шарнире, как показано на рис. 3. Здесь на некоторой части периода колебаний корневой части маятника (звено 1) удаленная от оси часть (звено 2) встает на упор, а значит массо-инерционные характеристики маятника и, соответственно, параметры движения в целом не отличаются от аналогичных для схемы с единым маятником, показанной на рис. 2. Однако на оставшейся части периода в механизме проявляется дополнительная степень свободы. Груз как бы перемещается на более короткий маятник - звено 2. Можно ожидать, что это приведет к расширению частотного диапазона вынужденных колебаний, при которых механизм работает в квазирезонансном режиме и, следовательно, к повышению эффективности преобразования энергии.

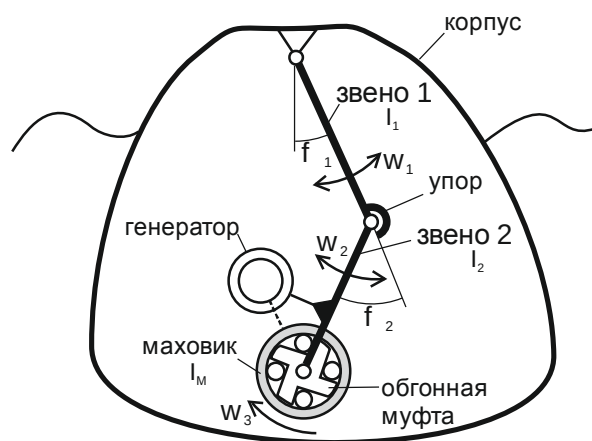


Рис. 3. Схема двухзвенного маятникового преобразователя с интегрированным в концевой блок электрогенератором

Оставив в стороне вопросы токоотвода с подвижного электрогенератора, на предпроектном этапе по заказу вышеназванной компании в данной работе поставлена и решается задача сравнительного анализа энергетической эффективности двух указанных вариантов маятникового преобразователя.

Моделирование маятниковых преобразователей

Наличие в механизмах нелинейных элементов (обгонная муфта, односторонний упор) делает систему уравнений динамики многовариантной, что значительно осложняет получение для нее аналитического решения. Поэтому методом исследования для данной работы выбирается численное моделирование динамических про-

цессов в механизмах преобразователя во временной области для прогнозируемого сочетания конструктивных параметров.

В качестве программной среды для осуществления моделирования выбираем Matlab/Simulink [11], как один из наиболее развитых и популярных инструментов решения самых разнообразных динамических задач. В последних версиях Matlab/Simulink значительно обогатился новым средством моделирования – библиотекой инструментов SimMechanics, позволяющей формулировать и решать уравнения движения для разнообразных 3D-механизмов, составленных из стандартных звеньев с реальными геометрическими параметрами. Причем, это может осуществляться в связке с компонентами другой физической природы (электрических, гидравлических и т.д.) и даже, через среду Simulink, возможно исследовать работу механизма в замкнутой системе с устройством управления его движением.

К сожалению, библиотека инструментов SimMechanics пока не включает блока для моделирования одного из ключевых элементов преобразователей, исследуемых в данной работе, – обгонной муфты. Реализация обгонной муфты как подсистемы, составленной из других стан-

дартных блоков SimMechanics, представляет серьезную самостоятельную задачу. По данной причине для решения поставленной задачи выбирается не совместимая с SimMechanics библиотека SimDriveline, которая представляет инструменты динамического исследования одномерных механических систем, в особенности, трансмиссий. Библиотека содержит блоки для моделирования различных типов муфт, включая Unidirectional Clutch – обгонную муфту.

Рис. 4 представляет расчетную модель преобразователя по схеме на рис. 2. Так как возбуждение колебаний маятника происходит в результате килевой или продольной качки корпуса (точки подвеса), то в качестве источника входного сигнала в схеме указан генератор синусоидальных колебаний, включенный через сумматор в цепь угла отклонения маятника от вертикали ϕ . Полезная нагрузка (электрогенератор) моделируется в виде вязкого ротационного трения. Момент инерции генератора приводится к маховику. Поскольку целью данной работы является только сравнительная оценка преобразователей, то поиск их оптимальных параметров и оптимальной нагрузки не проводится.

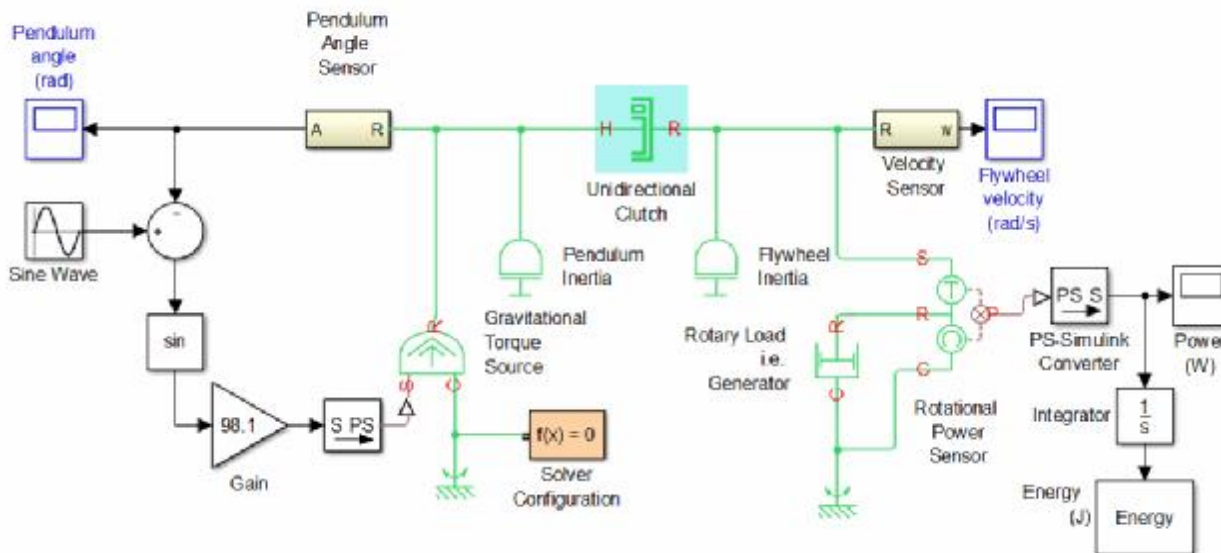


Рис. 4. Расчетная модель маятникового преобразователя с электрогенератором, интегрированным в конечной блок

Принимаем следующие параметры механизма и нагрузки:

Приведенная длина маятника $L_{пр} = 1$ м (соответствует периоду собственных колебаний $T_0 = 2$ с), приведенная масса концевого блока $m_{пр} = 10$ кг, момент инерции маятника $I_1 = 10$ кг·м², приведенный момент инерции маховика $I_M = 1$ кг·м², коэффициент сопротивления полезной нагрузки

$\beta = 2$ Н·м/рад/с.

Амплитуда входного сигнала $A = 0,25$ рад. Период колебаний входного сигнала T изменяется в диапазоне 1...12 с. Расчет проводится путем численного интегрирования уравнений динамики, полученных после компиляции расчетной модели. Физическое время интегрирования – 25 с.

Разработанная расчетная модель преобразователя энергии волн с двухзвенным маятником приведена на рис. 5. В отличие от модели преобразователя с единым маятником (рис. 4), здесь присутствуют два блока формирования гравитационного момента на звеньях, а также два участ-

ка, формирующие инерцию звеньев, связанные через блок «Жесткий упор» (Rotational Hard Stop). Для расчета параметров блоков данной модели принимаются следующие параметры механизма и нагрузки:

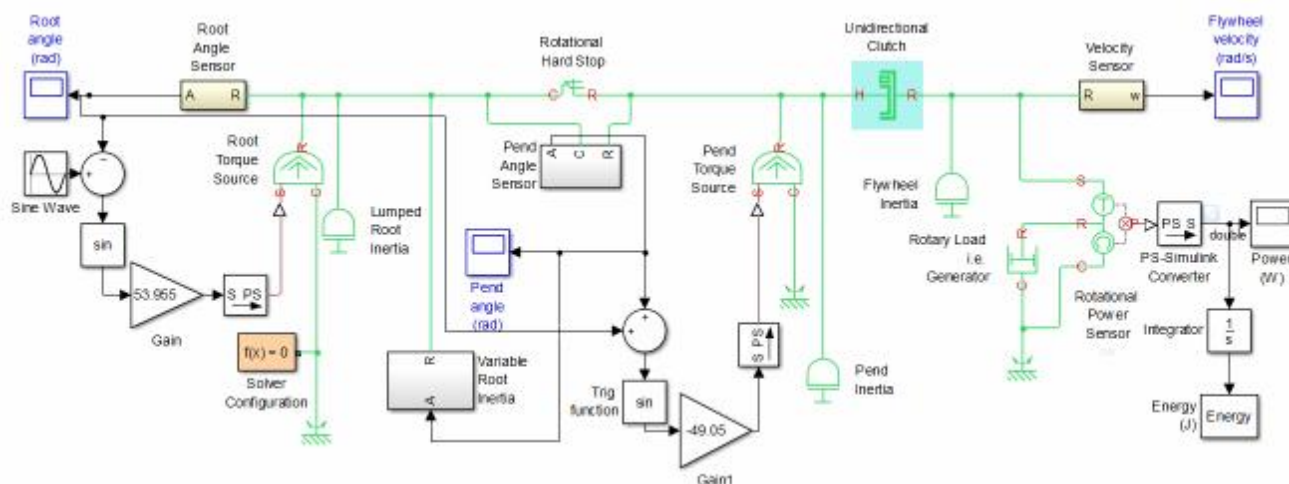


Рис. 5. Расчетная модель двухзвенного маятникового преобразователя с электрогенератором, интегрированным в конечный блок

Длины звеньев $L_1 = L_2 = L_{np}/2 = 0,5$ м, приведенная масса конечного блока первого звена $m_1 = 1$ кг, приведенная масса конечного блока второго звена $m_{np} = 10$ кг, приведенный момент инерции маховика $I_M = 1$ кг·м², коэффициент сопротивления полезной нагрузки $\beta = 2$ Н·м/рад/с.

Момент инерции второго звена

$$I_2 = m_{np} \cdot L_2^2 = 2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

В отличие от второго звена, приведенный момент инерции первого звена I_1 зависит от конфигурации механизма, т.е. является переменным. Рассматривая угол φ_2 как смежный для равнобедренного треугольника, образованного первым и вторым звеньями, получаем:

$$I_2 = m_1 \cdot L_1^2 + m_{np} \cdot (2L_1 \cdot \cos(\varphi_2/2))^2 = 0,25 + 10 \cdot \cos^2(\varphi_2/2). \quad (3)$$

Выражение (3) реализовано в модели (рис.5) посредством блоков Lumped Root Inertia и Variable Root Inertia.

Момент силы тяжести в шарнире второго звена M_2 определяется выражением

$$M_2 = -m_{np} g L_2 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) = -49,05 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2).$$

Углы φ_1 и φ_2 в модели (рис.5) формируются на выходах блока Root Angle Sensor и блока Pend Angle Sensor соответственно.

Если $\varphi_2 < 0$, то момент силы тяжести в шар-

нире первого звена M_1 определяется по выражению

$$M_1 = -(m_1 + m_{np}) g L_1 \cdot \sin \varphi_1 = -53,955 \cdot \sin \varphi_1.$$

Если $\varphi_2 = 0$, то к нему добавляется момент

M_2 :

$$M_1 = -(m_1 + m_{np}) g L_1 \cdot \sin \varphi_1 + M_2 = -53,955 \cdot \sin \varphi_1 - 49,05 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2).$$

В модели (рис.5) этот добавочный момент передается через блок Rotational Hard Stop.

Результаты расчета

В ходе цифрового моделирования для обеих исследуемых схем получены временные диаграммы преобразователя получены временные диаграммы изменения углов звеньев, угловой скорости вращения маховика, а также мгновенной мощности полезной нагрузки при возбуждении колебаний маятника волнами различного периода. Для примера на рис. 6 приведена диаграмма изменения углов звеньев у двухзвенного маятникового преобразователя при возбуждении колебаний с периодом $T = 5$ с.

Кривые на рис. 6 отражают существенное влияние положения звена 2 на движение звена 1. На некоторой части периода звено 1 движется почти в противофазе с возбуждающими колебаниями.

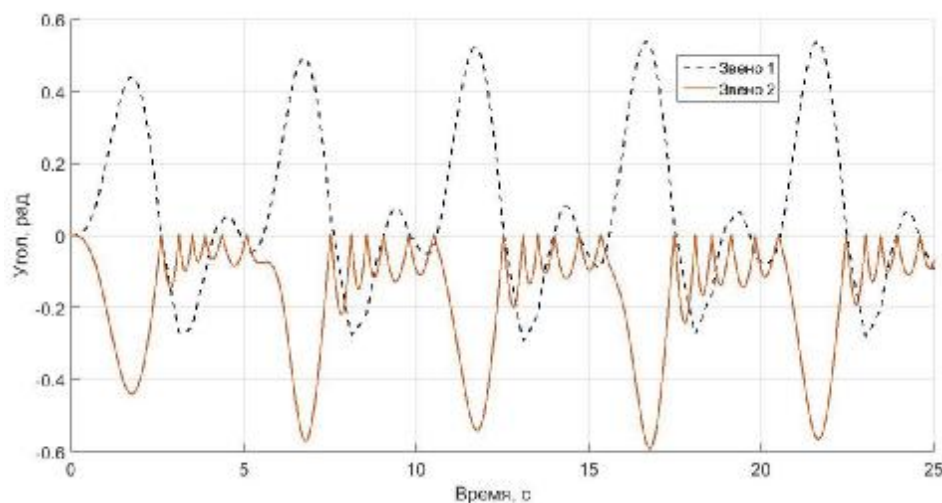


Рис. 6. Временная диаграмма изменения углов поворота звеньев φ_1 и φ_2 двухзвенного маятникового преобразователя при возбуждении колебаний с периодом $T = 5$ с.

Другой особенностью, характерной для преобразователя с двухзвенным маятником, является повышенная колебательность звена 2 при подходе к жесткому упору (в зоне $\varphi_2 = 0$ на половине периода возбуждающих колебаний). Она хорошо заметна на рис. 6. Фактически здесь происходят частые удары звена об упор, что яв-

ляется нежелательным.

Значения энергии выделившейся на полезной нагрузке за 25 с, полученные в результате численного интегрирования обеих моделей, сведены в таблицу 1 и представлены в логарифмическом масштабе на графике на рис. 7.

Таблица 1. Полезная энергия, Дж, полученная за время колебаний 25 с на преобразователе с единым маятником (сх. 1) и на преобразователе с двухзвенным маятником (сх. 2).

Период, с	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Энергия (сх. 1), Дж	5,34	15,90	128,9	209,2	18,00	8,56	3,920	3,736	2,593	2,045	1,678	1,266
Энергия (сх. 2), Дж	7,49	3,98	31,63	238,2	25,93	18,32	7,945	7,160	9,723	2,993	2,565	2,229

Таблица 1 (продолжение)

Период, с	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
Энергия (сх. 1), Дж	1,112	0,990	0,872	0,665	0,577	0,532	0,497	0,461	0,432	0,402	0,354
Энергия (сх. 2), Дж	1,685	1,083	0,418	0,428	0,528	0,501	0,685	0,608	0,396	0,508	0,504

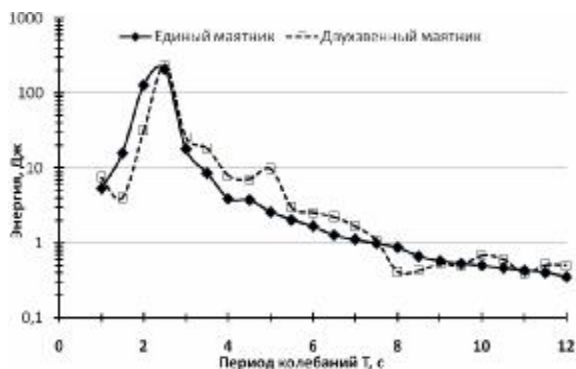


Рис. 7. Энергия на полезной нагрузке маятниковых преобразователей, полученная за 25 с

Выводы и заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Как преобразователь с единым маятником, так и преобразователь с двухзвенным маятником имеют ярко выраженный максимум характеристики средней выходной мощности при возбуждении колебаниями с периодом, близким к периоду собственных колебаний единого маятника ($T_0 = 2$ с), но с небольшим сдвигом в низкочастотную область.

Двухзвенный маятниковый преобразователь

обеспечивает существенно больший выход энергии в сравнении с первой схемой при его возбуждении колебаниями с периодом, находящимся в диапазоне 3...7 с, т.е. в ближней зарезонансной зоне. Важно, что в данный диапазон попадают характеристики преобладающего волнения во многих прибрежных участках моря.

Частотная энергетическая характеристика преобразователя с единым маятником вне зоны резонанса является относительно гладкой. В отличие от нее, у частотной энергетической характеристики преобразователя с двухзвенным маятником заметны существенные всплески и провалы, которые можно связать с появлением дополнительных резонансов и антирезонансов.

Повышенную колебательность звена 2 при подходе к жесткому упору желательно погасить для повышения надежности работы преобразователя. Однако дополнительное демпфирование может несколько снизить выход энергии, т.к. именно на этом участке временной диаграммы мгновенная мощность достигает своего пика.

В заключение отметим, что среди разнообразных технологий преобразования энергии волн наибольшее распространение получают технологии, основанные на использовании механических резонансов. При этом, с учетом повышенной энергетической эффективности в широком диапазоне параметров волн для установок большой мощности наиболее перспективными являются маятниковые преобразователи.

Результаты проведенного цифрового моделирования двух схем маятниковых преобразователей показывали, что двухзвенный маятниковый преобразователь обеспечивает на 20-30% большую энергетическую эффективность, чем преобразователь с единым маятником, но его работа характеризуется нежелательными динамическими явлениями. Эффективность такого преобразователя с дополнительным демпфированием должна стать предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Panicker N.N. Power Resource Potential of Ocean Surface Waves// Proc. Wave and Salinity Gradient Workshop, Newark, Delaware, USA, 1976, pp. J1-J48.
2. да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: уч. пос. Пер. с англ. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект»; М.: Изд. дом МЭИ; 2010. – 704 с.
3. Thorpe T. Wave Energy // 2010 Survey of Energy Resources, World Energy Council, 2010, pp. 562-587
4. Yemm R. Pelamis. / Cruz J, editor// Ocean wave energy. Berlin, Springer; 2008, pp. 304- 321.
5. Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M.N. A review of wave energy converter technology // Proc. IMechE Vol. 223, 2009. Part A: J. Power and Energy, pp. 887 – 902.
6. Falnes J. Ocean waves and oscillating systems: Linear interactions including wave-energy extraction. Cambridge University Press, 2nd ed., 2002, 275 p.
7. Gregory B., Dynamically tuned wave energy converter, US Patent No. 8713928, 2014.
8. Ruellan M., et al. Design Methodology for a SEAREV Wave Energy Converter // Proc. IEEE IEMDC, Antalya, Turkey. 2007. pp.1384-1389.
9. Budal K. and Falnes J. Interacting point absorbers with controlled motion / Count B., editor // Power From Sea Waves, London, Academic Press, 1980. pp. 381-399.
10. 1st demo video for Flywheel Pendulum [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://youtu.be/LR0qkzlytGA>. (Доступ от 25.02.2016).
11. В.П. Дьяконов. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.

References

1. Panicker N.N. Power Resource Potential of Ocean Surface Waves// Proc. Wave and Salinity Gradient Workshop, Newark, Delaware, USA, 1976, pp. J1-J48.
2. da Rosa A.V. *Vosobnovlyaemye istochniki energii* [Fundamentals of renewable energy processes] Dolgoprudnyi, Intellect Publ., MEI Publ., 2010. 704 p.
3. Thorpe T. Wave Energy // 2010 Survey of Energy Resources, World Energy Council, 2010, pp. 562-587.
4. Yemm R. Pelamis. / Cruz J, editor// Ocean wave energy. Berlin, Springer; 2008, pp 304- 321.
5. Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M.N. A review of wave energy converter technology // Proc. IMechE Vol. 223, 2009. Part A: J. Power and Energy, pp. 887 – 902.
6. Falnes J. Ocean waves and oscillating systems: Linear interactions including wave-energy extraction. Cambridge University Press, 2nd ed., 2002, 275 p.
7. Gregory B., Dynamically tuned wave energy converter, US Patent No. 8713928, 2014.
8. Ruellan M., et al. Design Methodology for a SEAREV Wave Energy Converter // Proc. IEEE IEMDC, Antalya, Turkey. 2007. pp.1384-1389.
9. Budal K. and Falnes J. Interacting point absorbers with controlled motion / Count B., editor // Power From Sea Waves, London, Academic Press, 1980. pp. 381-399.
10. 1st demo video for Flywheel Pendulum - Access by <https://youtu.be/LR0qkzlytGA>. (accessed 25.02.2016)
11. D'yakonov V.P. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Osnovy primeneniya. Moscow, SOLON-Press Publ., 2005. 800 p. (in Russian)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 634.0УДК 631.8:504.062

Разработка экологически безопасной технологии переработки органических отходов

В.М. Гавриш¹, Г.А. Баранов², Н.М. Дербасова³, П.В. Матюхина⁴
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹5brachman5@gmail.com, ³Derbmaks@mail.ru, ⁴trezvyy.vzglyad@mail.ru.

Статья поступила 16.03.2016 г.; после доработки 18.03.2016 г.

Аннотация

Рассматривается альтернативная технология получения гуминовых удобрений на основе твердых бытовых отходов органического происхождения, а также результаты испытания данных удобрений на сельскохозяйственных культурах. Показаны преимущества технологии и эффективность применения предлагаемого удобрения.

Ключевые слова: органическое удобрение, биотехнологии, гуминовые кислоты, вермикюльтура, твердые бытовые отходы органического происхождения.

The Development of Environmentally Friendly Technologies for Processing Organic Waste

V.M. Gavrish¹, G.A. Baranov², N.M. Derbasova³, P.V. Matyuhina⁴
Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹5brachman5@gmail.com, ³Derbmaks@mail.ru, ⁴trezvyy.vzglyad@mail.ru.

Received 16.03.2016 y.; received in final form 18.03.2016 y.

Abstract

Consider alternative technology for producing humic fertilizer on the basis of solid domestic wastes of organic origin, and the results of the test data on fertilizer for Agricultural cultures. The advantages of the technology and the effectiveness of the proposed fertilizer.

Keywords: organic fertilizer, biotechnology, humic acid, vermiculture, municipal solid waste is organic

Введение

Во всем мире, наблюдается тенденция к уменьшению сельскохозяйственных площадей в виду опустынивания, засоления почв и других негативных процессов. Наряду с этим увеличивается спрос на сельскохозяйственную продукцию, преимущественно экологически чистую. По экспертным оценкам, в 2015 году ее оборот прогнозировался 88 млрд. долларов [1]. Увеличение спроса приводит к увеличению производства, что в свою очередь приводит к накоплению

органических отходов. Исследования, проведенные Институтом энергетической стратегии во всех регионах России, показали, что ежегодный объем органических отходов Агропромышленного комплекса и городов, вывозимых на свалки, составляет: 700 млн. т., в том числе: 350 млн. т. – животноводство; 23 млн. т. – птицеводство; 220 млн. т. – растениеводство; 30 млн. т. – перерабатывающая промышленность; 56 млн. т. – твердые бытовые отходы (ТБО); 12 млн. т. – осадки сточных вод. По расчетам под свалками занято более 250 тыс. га, в том числе пригород-

ных земель [2]. Хранение отходов на полигонах и свалках усиливает загрязнение почв, подземных и поверхностных вод, атмосферы, нарушает функционирование экосистем, наносит ущерб сельскому хозяйству. Альтернативой хранения является использование отходов в качестве ресурса для получения биогаза, этанола, компоста.

Получение биогаза и этанола в виду остаточных отходов полностью не решает проблему, а также никак не влияет на прирост сельскохозяйственной продукции.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данного исследования является разработка экологически безопасной технологии утилизации ТБО с получением на конечном этапе удобрений с их апробацией в реальных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- рассмотреть типы наиболее применяемых органических удобрений;
- разработать технологию утилизации ТБО;
- провести апробацию удобрений в реальных условиях.

Типы наиболее применяемых органических удобрений

Эффективность органических удобрений проверяется в Англии на протяжении 150 лет. Результаты показывают, что ни одно химическое удобрение не стало более эффективным, чем органическое [3]. Растущий интерес к органическим удобрениям связан с тем, что в настоящее время человечество эксплуатирует 1,4 млрд. гектар пашни, а за все время своего существования оно бросило опустыненных и засоленных земель около 2 млрд. гектар, распахивать уже более нечего [4].

В настоящий момент на рынок выходят «чистые продукты» с маркой «organic», выращенные без применения минеральных удобрений. Марка «organic» означает, что продукт свободен от пестицидов, фунгицидов, при его производстве не использовались химические удобрения, химические добавки, гормоны и консерванты. Высокая стоимость и спрос на данный вид продуктов обусловило возрождение применения органических удобрений [5].

Классическое использование навоза в качестве удобрения загрязняет почву и вместе с тем не дает значительных результатов повышения

урожая, не соответствует требованиям современного мира.

Получение из органических отходов компоста и последующая переработка его в биогумус дает хорошие результаты, но связано с большими затратами по логистике и объемам внесения удобрений в почву, что значительно сдерживает повсеместное применение этих удобрений [6].

Впервые промышленное производство органического удобрения с помощью червей было применено в 1959 в Америке. Пользу от таких червей быстро поняли и бизнесмены, и сельхозпроизводители, и правительство [7].

Высокая положительная отзывчивость почв и растений на применение гуминовых удобрений обусловила большой интерес к производству коммерческих гуматов во всем мире. Положительный опыт применения гуматов в сельском хозяйстве, садоводстве и ремедиационных технологиях привёл к тому, что многие промышленные компании стали производить разнообразные гуматы с использованием химических веществ. Большинство промышленных гуматов калия и аммония обнаруживают ростстимулирующий эффект, значительно превышающий их непосредственную питательную ценность. Наиболее сильный эффект проявляется при неблагоприятных условиях окружающей среды: при недостаточной или избыточной влажности, низких температурах, недостаточной освещенности или при загрязнении тяжелыми металлами, радионуклидами или органическими загрязнителями, так как физиологически активные гуминовые вещества повышают устойчивость растений к воздействию неблагоприятных факторов среды [8].

Данные удобрения показывают одни из наилучших результатов по приросту урожая, при этом обладают рядом дополнительных преимуществ.

- Способствуют лучшему усвоению элементов питания почвы сельскохозяйственными культурами, повышают устойчивость их к неблагоприятным условиям произрастания.
- Способны снижать концентрацию тяжелых металлов в почве, быстрее разлагать гербициды и ядохимикаты.
- Связывают радионуклиды, ионы тяжелых металлов, разрушают пестициды по истечении срока их действия, ускоряют процесс детоксикации культурных растений.
- Позволяет растениям легче переносить заморозки, недостаток влаги.
- Повышает сопротивляемость растений к заболеваниям.

- Регулирует метаболизм почвенной микрофлоры [9].

Большинство технологий получения гуминовых удобрений базируются на химических технологиях, получения их из полезных ископаемых: торфа, угля, леонардита, сапропеля, что загрязняет почву, подземные воды и не может обеспечить в конечном итоге получения действительно экологически чистой технологии.

К примеру, гуминовые удобрения получают путем переработки лигносодержащего растительного сырья, которое является отходом целлюлозно-бумажных комбинатов. К такому сырью относятся: лигниносульфаты (продукт получения целлюлозы сульфитным способом) и лигнин (побочный продукт гидролизного производства). Технология предусматривает жидкофазное окисление смеси лигносодержащего сырья со щелочными агентами при температурах 170...200 °С и давлении 0,5...3 МПа с добавлением перекиси водорода и обработкой кислородом воздуха. В результате окисления и частичного синтеза получают темноокрашенный раствор гуминоподобных веществ, по части химических признаков похожих на природные гуминовые кислоты. Достоинства метода в утилизации большого количества отходов, дешевизне сырья. К недостаткам стоит отнести высокое содержание серы и тяжелых металлов, наследуемых из сырья, и меньшую физиологическую активность по отношению к растениям в сравнении с природными гуминовыми препаратами [10].

Технология утилизации ТБО

Для устранения данных недостатков коллективом научно-исследовательской лаборатории биотехнологий и экологического мониторинга предложена 4-х стадийная технология переработки органических отходов в жидкое органическое удобрение, которое по некоторым показателям более эффективное, чем существующие аналоги на основе гуматов. На предложенную технологию получено 3 патента [11,12,13]

Технология заключается в 4-х этапах:

1 этап – используются органические отходы, и производится их измельчение до фракции 1...5 мм. Одновременно подготавливается бактериальная ассоциация.

2 этап – смесь подается на участок компостирования в биореакторы, где в течение 15...20 суток микробиологическим путем получается компост. Смесь периодически подвергается орошению.

3 этап – полученный компост подается на

участок вермикюльтивирования. Производится заселение компоста вермикюльтурой. Продолжительность этапа от 90 до 180 дней. На выходе участка получается биогумус, который уже может быть использован для рекультивации земель, пустынных и песчаных площадей. Кроме того, выходом этапа является продукт (вермикюльтура), который может быть использован для продажи (для производства протеина) или на производство комбикорма.

4 этап – получение жидкого органического удобрения. На данном этапе используется установка диспергирования на основе кавитационных эффектов, для этого биогумус разбавляется водой и подвергается диспергированию. После диспергирования полученное удобрение в случае необходимости корректируют микроэлементами и полезной микрофлорой.

Технологическая схема переработки отходов в удобрение представлена на рис. 1.



Рис.1. Схема переработки

Виду принятых технологических решений, на наш взгляд, получаемый продукт будет обладать высокой конкурентоспособностью в силу: низкой себестоимости, комплексного решения вопросов питания растений, пролонгированного действия, безопасности для людей, животных, что позволяет его применять с помощью различной техники, в том числе распылением авиацией.

Благодаря тому, что сырьем для производства удобрения выступают органические отходы, предлагаемая технология будет обладать сле-

дующими преимуществами по сравнению с аналогичными:

- утилизация органических отходов (обрезков деревьев, опавших листьев, опилок, отходов сахарной, пивоваренной, винодельческой, деревообрабатывающей, целлюлозобумажной промышленности, иловых осадков канализационных очистных сооружений с помощью микробиологических технологий);
- получения жидкого органического удобрения комплексного действия, позволяющего производить рекультивацию земель для сельского хозяйства, создавать плодородный слой почвы на песчаных, пустынных и скалистых грунтах, а также повышать урожайность сельскохозяйственных культур.
- получение экологически чистых стимуляторов прибавки веса для животноводства, птицеводства и рыборазведения.
- решения экологических проблем предприятий имеющих данный вид отходов.

Предварительные экономические расчеты установки производительностью в 1000 т удобрения в год показывают срок окупаемости проекта при консервативном подходе и, с учетом различных рисков, составит менее года.

Апробация удобрений в реальных условиях

Полученное удобрение исследовалось в тепличном хозяйстве для изучения эффективности применения внекорневой подкормки при выращивании томата. Объектом исследования выступал томат (*Solanum lycopersicum*).

Исследование проводилось на территории тепличного комплекса, представляющего собой теплицы закрытого грунта. Фотография теплицы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография теплицы

Площадь теплицы на 100 % была заражена грибными болезнями, корневой галлообразующей нематодой (*Meloidogyne marioni*).

Галловая нематода – полигастальный паразит, поражает более 4000 видов растений, в числе которых практически все овощные и декоративные культуры закрытого грунта. При использовании агротехники высокого уровня, в сильно зараженных теплицах потери урожая могут достигать 50 % и более [14].

На рис. 3. представлены отличия здорового корня от зараженного нематодой.



Рис. 3. Здоровые и заражённые нематодой корни

Помимо усугубляющего действия нематоды, негативное воздействие на количество и качество урожая томата оказывал гальванический завод, построенный вблизи теплицы, путем повышения концентраций химических элементов в почве.

Для проведения исследования в теплице было выделено два участка: опытный участок площадью 996 м² и контрольный 2000 м².

На опытном участке было высажено 760 кустов индетерминантных томатов сортов: «Раиса», «Эматон», «Ньютон», «Чарлистон», «Ягуар», «Профило», «Е-8,2». На контрольном участке сорта «Раиса» и «Мэдисон». Предпосадочное замачивание рассады в разработанном удобрении не проводилось.

С марта по май на опытном участке через каждые 12 дней проводились внекорневые подкормки 1 % раствором разработанного удобрения. Было отмечено укрупнение листьев и утолщение ствола. На контрольном участке в те же сроки проводилась корневая подкормка минеральными удобрениями.

Сбор урожая начался в апреле одновременно на опытном и контрольном участке. Сравнительный график сбора томатов на опытном и контрольном участке представлен на рис. 4.

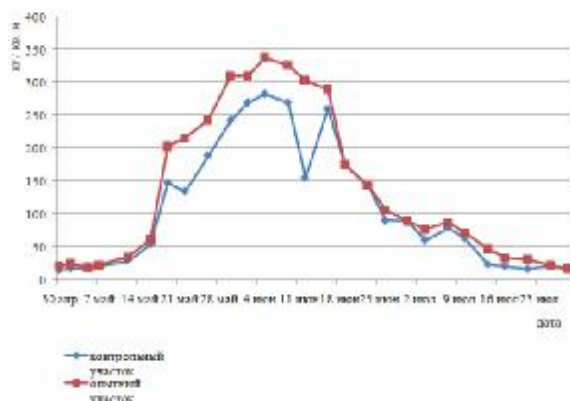


Рис.4. График сбора томатов на опытном и контрольном участках

Анализ экспериментальных данных

Сбор урожая с 30 апреля по 23 июля с контрольного и опытного участков составил 2920,5 и 3632,5 кг с квадратного метра соответственно.

Таким образом, прирост урожая на опытном участке в сравнении с урожаем контрольного участка составил 19,6 %.

Использование разработанного органического удобрения дало больший экономический эффект нежели применение минерального. Обильное поступление и хорошее усвоение питательных веществ позволило кустам томата быстро развить корневой аппарат и тем самым предотвратить негативное влияние нематоды на урожай.

Фотография выращенного куста томата представлена на рис. 5.



Рис. 5. Фотография выращенного томата в теплице

Аналогичные результаты были получены при внекорневой подкормке других овощных

культур. Эффективность внекорневой подкормки овощных культур показана в таблице 1.

Таблица 1. Эффективность внекорневой подкормки овощных культур «ЖОУКД»

Культура	Водный раствор «ЖОУКД» по содержанию водорастворимых гуматов, %			
	0,001		0,002	
	Урожай т/га	Прирост т/га / %	Урожай т/га	Прирост т/га / %
Капуста	16,9	1,6/10,5	17,0	1,7/11,1
Огурцы	12,3	2,0/19,4	12,9	2,6/25,2
Свекла столовая	24,2	0,8/3,4	25,3	1,9/8,1
Морковь	43,5	2,2/5,3	43,3	2,0/4,8

Полученные результаты, при выращивании кукурузы, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты полученные при выращивании кукурузы

Варианты опыта	Средняя урожайность, т/га	Прирост урожая к фону, ± т/га
Контроль без удобрений + 400 л/га воды внекорневое	40,8	—
Контроль + раствор «ЖОУКД» (разведен водой 1:40)	50,6	+ 9,8

Использование разработанного удобрения не только повысило урожайность культур, но и улучшило экологическое состояние почвы.

Подтверждением этого являются результаты рентгено-флуорисцентного анализа почв отобранных на контрольном и опытном участках и представленных в таблице 3.

Анализ представленной таблицы 3 показывает, что при применении разработанного органического удобрения произошло количественное изменение содержания химических элементов в почве. Увеличилась концентрация таких элементов: калий, хлор, кальций, хром, цинк, селен, рубидий, стронций.

Аналогичный результат был получен при опыте, где использовался фильтрат полигона ТБО г. Суммы, растительные остатки и промышленные стоки предприятия по производству взрывчатых веществ.

Таблица 3. Результаты рентгено-флуорисцентного анализа почв

Элемент	Концентрация элементов мкг/г на контрольном участке		Концентрация элементов мкг/г на опытном участке	
	Сухой остаток	Сырое вещество	Сухой остаток	Сырое вещество
S	1772,335	139,554	610,148	44,864
Cl	136,641	10,759	200,345	14,731
K	9036,119	711,505	11173,6	821,585
Ca	1122,57	88,391	1193,56	87,762
Cr	0,587	0,046	1,734	0,127
Mn	9,636	0,759	0,539	0,04
Fe	18,567	1,462	17,513	1,288
Ni	1,341	0,106	0,732	0,054
Cu	7,656	0,603	4,047	0,298
Zn	21,274	1,675	24,84	1,826
Se	0,082	0,006	0,142	0,01
Br	4,699	0,37	4,905	0,361
Rb	16,304	1,284	18,164	1,336
Sr	0,773	0,061	1,534	0,113
Cd	0,073	0,011	0,062	0,005
Pb	0,911	0,072	0,821	0,06

Результаты биологической деструкции загрязняющих веществ в фильтрате ТБО сумского полигона и промстоках завода ГП «НПО ПХЗ» на микробиологическом этапе представлены в таблице 4. [15].

Таблица 4. Результаты биологической деструкции загрязняющих веществ на микробиологическом этапе

Загрязняющее вещество	Исходная концентрация	Срок инкубации	Концентрация после инкубации
NH ₄	16350 мг/л	11 суток	220,6 мг/л
NO ₂	222 мг/л	11 суток	4,3 мг/л
NO ₃	488,7 мг/л	11 суток	75,9 мг/л
Фосфаты	26 мг/л	11 суток	9,75 мг/л
СПАВ	33 мг/л	11 суток	9,1 мг/л
Fe _{общ}	149 мг/л	11 суток	107 мг/л
SO ₄	9800 мг/л	11 суток	6125 мг/л
Cl	5470 мг/л	11 суток	2472 мг/л

Результаты биологической деструкции загрязняющих веществ в фильтрате ТБО сумского полигона и промстоках завода ГП «НПО ПХЗ» на этапе вермикюльтивирования представлены в таблице 5. [15].

Из полученных результатов виден высокий эффект очистки.

Удобрение позволяет проводить рекультивацию земель, восстановление естественного

плодородия почвы, являясь микробиологической средой насыщенной азото и фосфобактерами, а также продуктами их жизнедеятельности: ферментами и ростовыми веществами.

Таблица 5. Результаты биологической деструкции загрязняющих веществ на этапе вермикюльтивирования

Загрязняющее вещество	Исходная концентрация	Срок инкубации	Концентрация после инкубации
NH ₄	2082 мг/л	90 суток	18,2 мг/л
NO ₂	160,8 мг/л	90 суток	0,5 мг/л
NO ₃	488,7 мг/л	90 суток	41,2 мг/л
Фосфаты	9,75 мг/л	90 суток	1,1 мг/л
СПАВ	11,8 мг/л	90 суток	0,25 мг/л
Fe _{общ}	107 мг/л	90 суток	0,3 мг/л
SO ₄	6125 мг/л	90 суток	485,4 г/л
Cl	3270 мг/л	90 суток	315,9 г/л

Эти бактерии фиксируют атмосферный азот, а он в свою очередь участвует в построении белков, деминерализируют тяжелые и засоленные грунты, разрыхляют почву, делая ее проницаемой для кислорода, способствуют разложению органических веществ.

Заключение

Рассмотрены типы наиболее применяемых органических удобрений. Показано, что гуминовые удобрения на настоящий момент являются наиболее эффективными.

Предложена и рассмотрена 4-х стадийная технология переработки органических отходов в жидкое органическое удобрение, которое по некоторым показателям более эффективное, чем существующие аналоги на основе гуматов.

Проведены исследования влияния разработанного удобрения на урожайность овощных культур. Отмечено повышение показателей урожайности при применении разработанного удобрения.

Проведены исследования влияния разработанного удобрения на состояния почв. Отмечено количественное изменение содержания химических элементов в почве. Увеличилась концентрация таких элементов: калий, хлор, кальций, хром, цинк, селен, рубидий, стронций.

Получены результаты биологической деструкции загрязняющих веществ на микробиологическом этапе и этапе вермикюльтивирования.

Список литературы

1. Печенкина В.В. Рынок органической агропродукции / В.В. Печенкина, А.Ю. Егоров // Экономика сельского хозяйства России, 2012. – Вып. 8. – С. 50 - 59.
2. Андреева Л.С. Энергетический поворот – шанс для экологических отраслей /Л.С. Андреева// Инновации в науке, 2013. – Вып. 17. – С. 19 - 23.
3. Лагуткин Н.В. Ресурсосберегающие технологии в системе земледелия / Н.В. Лагуткин // Актуальные агросистемы, 2013. – Вып. 3. – С. 8 - 17.
4. Кудрявцев А.Е. Интенсивность использования земельных ресурсов в пашне / А.Е. Кудрявцев, Е.В. Райхерт, О.Н. Шторм // Вестник АГАУ, 2008. – Вып. 10. – С. 5 - 9.
5. Волков А.М. Основные направления формирования рынка экологически чистых продуктов питания в России / А.М. Волков, Е.В. Щедрин // Никоновские чтения, 2007. – Вып. 12. – С. 75 - 76.
6. Суслов С.А. Биогумус – резерв повышения эффективности сельского хозяйства / С.А. Суслов, М.А. Дулепов // Вестник НГИЭИ, 2011. – Вып. 1. – С. 38 - 47.
7. Выгузова М.А. Исследование технологии утилизации отходов в сельскохозяйственном производстве / М.А. Выгузова // Научный журнал КубГАУ, 2013. – Вып. 85 – С. 338 - 348.
8. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в биосфере – М.: Наука, 1993. – 237 с.
9. Жолобова И.С. Влияние биогуматов на почвенную биоту / И.С. Жолобова, Л.О. Пономарева // Научный журнал КубГАУ, 2015. – Вып. 114 – С.975 - 984.
10. Пат. US7198805 B2 США, PCT/RU2002/000533 Method for producing humic acid salts / Gladkov O. A., Poloskin R.B., Polyakov Y.J., Sokolova I.V., Sorokin N.I., Glebov A. V.; заявитель и патентообладатель Gladkov O. A., Poloskin R.B., Polyakov Y.J., Sokolova I.V., Sorokin N.I., Glebov A. V.; – № US 10/498,776; заяв. 16.12. 2002; опубл. 3.04. 2007.
11. Пат. 38061 Україна, МПК: C05F 9/00, B09B 3/00 Спосіб переробки змішаних побутових відходів / Гавриш М.В., Смирнов С.Б., Баранов Г.А.; заявитель и патентообладатель Гавриш М.В. – № 200807014; заяв. 20.05.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
12. Пат. 17586 Україна, МПК: B09B 3/00, C02F 3/34 Спосіб утилізації високотоксичних сполук, наприклад пестицидів / Гавриш М.В., Дербасова Н.М., Єрьомін К.В., Кісельов М.М., Баранов Г.А.; заявитель и патентообладатель Гавриш М.В. – № 200510878; заяв. 17.11.2005; опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.
13. Пат. 49141 Україна, МПК: C05F 3/00, C05F 3/06 Спосіб очищення виробничих стічних вод / Рубцов Г.С., Васильев В.С., Гавриш М.В., Смирнов С.Б., Баранов Г.А.; заявитель и патентообладатель Рубцов Г.С. – № 200907426; заяв. 15.07.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.
14. Бухонова Ю.В. Определение возможных потерь урожая тепличных культур от галловых нематод / Ю.В. Бухонова, В.Р. Сергеев, К.А. Перевертин // Защита и карантин растений, 2010. – Вып. 11. – С. 40 - 41.
15. Дербасова Н.М. Оценка эффективности микробиологической очистки промышленных сточных вод / Н.М. Дербасова, Г.В. Жданова, Ю.Л. Ковальчук, О.П. Полтаруха // Вода: химия и экология, 2010. – Вып. 5. – С. 44 - 46.

References

1. Pechenkina V.V., Egorov A.Y. Market for organic agricultural products. *Ekonomika selskogo hozyaistva Rossii*, 2012, No 8, pp. 50 - 59.
2. Andreeva L.S., The energy turnaround - a chance for the environmental industries. *Innovacii v nauke*, 2013, No 17, pp. 19 - 23.
3. Lagutkin N.V. Resource-saving technologies in agriculture system. *Aktualnie agrosistemi*, 2013, No 3, pp. 8 - 17.
4. Kudryavcev A.E., Raihert E.V. Shtorm The intensity of land use in arable land. *Vestnik AGAU*, 2008, No 10, pp. 5 - 9.
5. Volkov A.M., Schedrin E.V. The main directions of formation of the market of organic foods in Russia. *Nikonovskie chteniya*, 2007, No 12, pp. 75 - 76.
6. Suslov S.A., Dulepov M.A. Biohumus - reserve for increasing the efficiency of agriculture. *Vestnik NGIEI*, 2011. No 1, pp. 38 - 47.
7. Viguzova M.A. Study recycling technology in agricultural production. *Nauchnii jurnal KubGAU*, 2013. No 85, pp. 338 - 348.
8. Orlov D.S. *Guminovie veschestva v biosphere* [Humic substances in the biosphere]. – Moscow: science, 1993. – 237 p.
9. Jolobova I.S., Ponomareva L.O. The impact on soil biota Biohumates. *Nauchnii jurnal KubGAU*, 2015. No 114, pp. 975 - 984.
10. Patent of USA № US7198805B2 from 3.04. 2007 Method for producing humic acid salts.
11. Patent of Ukraine № 38061 from 25.12.2008 *Treatment process for mixed domestic waste*.
12. Patent of Ukraine № 49141 from 16.09.2006 *Method for utilization of high toxic compounds, e.g. pesticides*.
13. Patent of Ukraine № 17586 from 26.04.2010 *Process for treatment of industrial waste water*.
14. Buhonova Y.V., Sergeev V.R., Perevertin K.A. Identification of possible crop losses greenhouse crops against rootknot nematodes. *Zaschita i karantin rastenii*, 2010. No 11, pp. 40 - 41.
15. Derbasova N.M, Zhdanova G.V., Koval'chuk Ju.L., Poltaruha O.P. Evaluation of microbiological treatment of industrial waste water. *Voda: himija i jekologija*, 2010. No 5, pp. 44 - 46.

УДК 621.375.8

Автоматизированный твердотельный лазерный сканер на красителях

Б.И. Деулин

БОУ ОО СПО «Орловский технологический техникум», ул. Раздольная, 100,
г. Орел, 302029, Россия, boris1967or@qip.ru

Статья поступила 26.01.2016 г.; после доработки 29.01.2016 г.

Аннотация

Твердотельные лазеры на красителях нашли самое широкое распространение в различных методах спектрального анализа. Проблеме улучшения их характеристик посвящено множество работ. Рассматривается вопрос сокращения временных затрат на проведение анализа проб на содержание различных веществ спектральными методами. Для решения этой проблемы предлагается автоматизированный сканер, выполненный на базе твердотельного лазера на органических красителях ЛКИ - 301. Преобразование лазера ЛКИ - 301 в сканер осуществляется за счет использования лазерных элементов на эпоксиполимерах или пористых стеклах, активированных красителями, которые позволяют производить накачку «в одну точку», стойки-радиатора с автоматизированным приводом от шагового двигателя, перестраиваемого интерферометра с пьезоэлементом, управляемых от компьютера.

Ключевые слова: лазер, краситель, автоматизация, шаговый двигатель, теплопроводность, стойка, сканер.

Automated Solid-State Laser Scanner on the Dye

B.I. Deulin

The Orel Technology College. 100 Razdolnaya st., Orel, 302029, Russia, boris1967or@qip.ru

Received 26.01.2016 y.; received in final form 29.01.2016 y.

Abstract

Solid-state dye lasers were widely spread in the various methods of spectral analysis. The problem of improving their performance has been widely discussed. This article addresses the issue of reducing the time spent on the analysis of samples for the maintenance of various substances by spectral methods. To solve this problem, the article proposes an automated scanner, one based on solid-state laser based on organic dye laser LKI 301. Converting the scanner is carried out by using laser elements on epoxy or porous glass, activated dyes, which allow pumping "at one point" Stand-radiator with automatic driven by a stepper motor, a tunable interferometer with piezo controlled by computer.

Keywords: laser, dye, automation, stepper motor, thermal conductivity, front scanner.

Введение

В настоящее время загрязнение окружающей среды приняло глобальный характер. Одним из загрязнителей почв и водоемов являются тяжелые металлы, которые накапливаются в организме и могут явиться причиной онкологических заболеваний. Поэтому необходимо периодически проводить анализ почв сельскохозяйственного назначения, а так же водоемов на предмет их загрязнения тяжелыми металлами и дру-

гими вредными веществами. Данный вопрос можно решить применением спектральных методов анализа, например, атомно-абсорбционного с использованием лазерных источников света. Одним из недостатков этого метода является разброс полос поглощения исследуемых элементов по спектру. Этот недостаток устраняется путем применения широкополосных лазеров на органических красителях [1]. В ряде случаев, для сокращения временных затрат на

анализ пробы, целесообразно проводить ее быстрое исследование в определенном диапазоне длин волн. Это возможно осуществить с помощью сканера, выполненного на базе широкополосного лазера на красителях [2, 3].

Постановка цели научной работы

Целью данной работы является уменьшение временных затрат по проведению анализа проб спектральными методами на содержание в них вредных веществ, которое осуществляется за счет их быстрого анализа в определенном диапазоне длин волн.

Для этого предлагается применение автоматизированного сканера, выполненного на базе твердотельного широкополосного лазера на красителях ЛКИ 301.

Изложение основного материала

Перестраиваемые широкополосные лазеры в спектроскопии получили широкое распространение т.к. расширяют возможности различных методов контроля веществ и материалов. Особое значение занимают лазеры на органических красителях. Широкий набор красителей, выпускаемых промышленностью, позволяет охватить всю видимую область длин волн от ближней инфракрасной до ближнего ультрафиолета.

Первоначально использовались лазеры на жидких растворах органических красителей. В качестве растворителя в них использовался этиловый спирт. Однако, лазерам на жидких растворах органических красителей присущи некоторые эксплуатационные недостатки, связанные с необходимостью прокачки красителя и возможностью испарения растворителя. Испарение растворителя может привести к взрыву, что особенно опасно в закрытых помещениях, поэтому был проведен ряд исследований по внедрению органических красителей в твердотельные матрицы. Красители внедрялись в различные среды: в полиметилметакрилат, эпоксиполимеры, пористые стекла и т.д.

В 80-х годах XX века отечественная промышленность освоила выпуск твердотельного лазера на красителях ЛКИ-301 с матрицей из полиметилметакрилата в виде диска, оптическая схема которого приведена на рис. 1 [1]. Матрицы из полиметилметакрилата обладают рядом недостатков: у них низкая теплопроводность; недостаточно высокое значение твердости, что затрудняет механическую обработку; они сильно поглощают излучение в ближней УФ – области, что вызывает определенные трудности при на-

качке от азотного лазера и ксеноновых ламп; у них низкая фотостойкость и ресурс; невысокая теплостойкость, что вызывает необходимость сканирования при накачке пучком света по поверхности лазерного элемента [2, 3]. Такой способ накачки из-за возможности неравномерного распределения красителя в матрице и ее не равномерному нагреву приводит к нестабильности излучения лазера. Для обеспечения большей стабильности излучения лазера, накачка должна производиться «в одну точку».

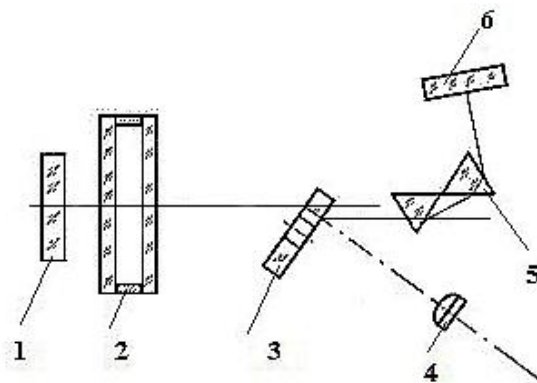


Рис. 1. Оптическая схема твердотельного лазера на красителях ЛКИ-301: 1 – глухое зеркало; 2 – интерферометр; 3 – активный лазерный элемент; 4 – линза; 5 – призма; 6 – выходное зеркало

Эпоксиполимеры относятся к реактопластам, поэтому матрицы, на их основе, обладают лучшей теплостойкостью по сравнению с полиметилметакрилатом, что расширяет интервал рабочих температур; большей теплопроводностью; большей твердостью. Эти свойства эпоксиполимеров позволили отказаться от сканирования лазерного элемента и проводить накачку «в одну точку» [2, 3].

Для увеличения теплопроводности и твердости матриц органические красители внедрялись в пористые стекла [4].

Интенсивность люминесценции красителей зависит от температуры [1,2,4]. С ростом температуры она уменьшается, рис. 2, поэтому, для увеличения КПД лазера и увеличения ресурса активного лазерного элемента целесообразно применять меры по его охлаждению.

Ранее были представлены различные конструкции радиаторов для твердотельных лазерных элементов, выполненных в виде дисков [1,5]. Общим недостатком этих конструкций является то, что они предназначены только для одного лазерного элемента. Поэтому, при смене диапазона работы лазера необходимо менять актив-

ный элемент, на что требуются определенные временные затраты.

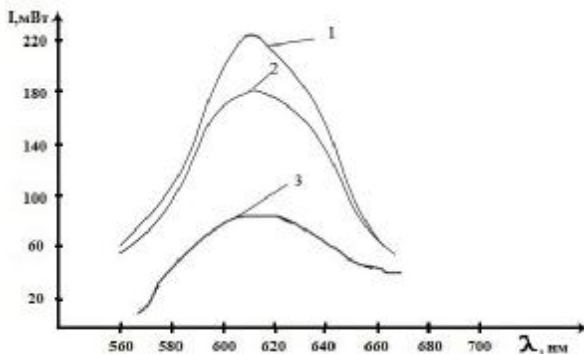


Рис. 2. Спектры люминесценции красителя родамина С в эпоксиолигомере ЭД-24 при разных температурах: 1 – при 39 °С; 2 – при 57 °С; 3 – при 115 °С.

В работах [6,7] были представлены стойки-радиаторы для твердотельных лазерных элементов, выполненных в виде дисков с ручным и автоматическим управлением. Данные стойки, помимо охлаждения, позволяют более оперативно менять лазерные элементы, а, следовательно, изменять диапазон излучения лазера. Они могут использоваться для его автоматизации.

Изменение длины волны генерации лазера ЛКИ 301 в пределах диапазона, осуществляется вручную с помощью интерферометра 2, рис. 1, путем изменения расстояния между его торцевыми зеркалами. Эту операцию можно осуществлять автоматически с помощью подачи напряжения, если использовать перестраиваемые интерферометры с пьезоэлементами. С их устройством и принципом работы можно ознакомиться в [8-10].

На рис. 3 представлена функциональная схема автоматизированного твердотельного лазерного сканера на красителях.

Данное устройство содержит: 1 – глухое зеркало; 2 – перестраиваемый интерферометр; 3 – стойка с активными лазерными элементами; 4 – линза; 5 – призма; 6 – выходное зеркало; 7 – светоделительное зеркало; 8 – фотопреобразователь; 9 – шаговый двигатель; 10 – светоделительное зеркало; 11 – фотоприемник; 12 – генератор пилообразных импульсов; 13 – электромагнитное реле; 14 – ключ; 15 – лазер накачки; 16 – счетчик импульсов; 17 – генератор прямоугольных импульсов; 18 – ключ; 19 – ключ; 20 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 21 – компьютер; 22 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

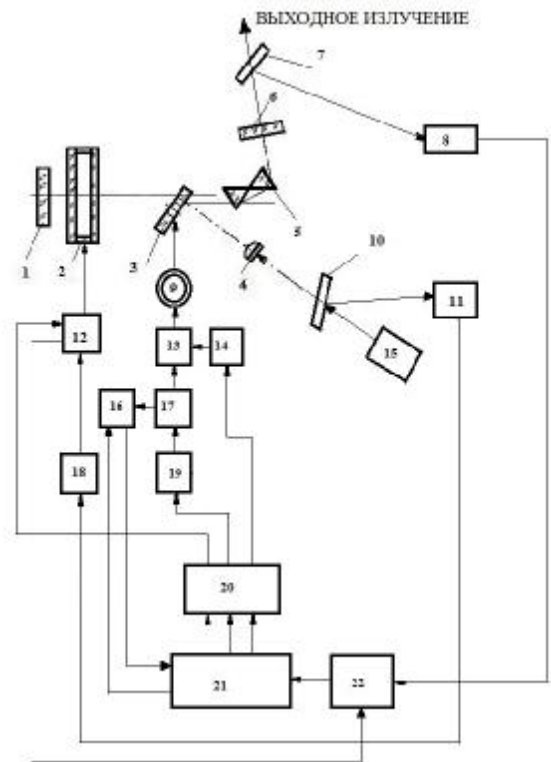


Рис. 3. Функциональная схема автоматизированного твердотельного сканера на красителях

Устройство работает следующим образом. Излучение от лазера накачки 15, работающего в импульсном режиме, через линзу 4 падает на активный лазерный элемент, находящийся в стойке 3. Под действием излучения накачки, краситель в лазерном элементе начинает люминесцировать. Глухое зеркало 1 и выходное зеркало 6 образуют оптический резонатор, внутри которого находится перестраиваемый интерферометр 2 и призма 5. Призма 5 служит для поворота излучения на требуемый угол. С помощью перестраиваемого интерферометра 2 из широкополосного излучения люминесценции красителя выделяется узкая линия выходного излучения. Изменение длины волны выходного излучения осуществляется за счет изменения расстояния между торцевыми зеркалами перестраиваемого интерферометра 2. Для этого, на пьезоэлемент перестраиваемого интерферометра 2 необходимо подать соответствующее напряжение.

Для быстрого изменения длины волны в пределах диапазона с компьютера 21 через ЦАП 20 на генератор пилообразных импульсов 12 подается требуемый уровень напряжения. Для синхронизации по времени работы генератора пилообразных импульсов 12 с лазером накачки 15, часть излучения накачки (около 1 %) с помощью светоделительного зеркала 10 подается на фото-

преобразователь 11, который преобразует его в напряжение. Напряжение с фотопреобразователя 11 подается на ключ 18 с целью включения генератора пилообразных импульсов 12. Пилообразные импульсы с генератора 12 поступают на перестраиваемый интерферометр 2, в результате чего выходное излучение сканера за один импульс изменяется во всем диапазоне. Для контроля текущего значения длины волны выходного излучения сканера, с генератора 12 через ЦАП 22 на компьютер 21 поступает сигнал, соответствующий текущему значению напряжения пилообразного импульса.

Мощность выходного излучения сканера зависит от многих факторов: от типа красителя в активном лазерном элементе, от его температуры, типа лазера накачки и других параметров. Поэтому выходную мощность целесообразно измерять. Для этого, предусмотрено светоделительное зеркало 10, которое часть выходного излучения (около 1 %) подает на фотопреобразователь 8, который преобразует его в напряжение и через АЦП 22 оно поступает на компьютер 21.

Изменение диапазона длин волн генерации сканера осуществляется путем смены его активного элемента. Это может быть осуществлено за счет поворота барабана стойки 3 на требуемый угол. С устройством данных стоек можно ознакомиться в работах [6,7]. Поворот барабана стойки 3 происходит за счет вращения шагового двигателя 9. Для этого, с компьютера 21 подается сигнал через цифро-аналоговый преобразователь 20 на ключ 19 с целью его открытия. Ключ 19 включает генератор прямоугольных импульсов 17. Импульсы с генератора 17 поступают на контакты электромагнитного реле постоянного тока 13, к которому подключены выводы шагового двигателя 9. Будем считать, что для вращения шагового двигателя 9 по часовой стрелке выводы генератора импульсов 17 и шагового двигателя 9 подключены на нормально замкнутые контакты электромагнитного реле 13, рис. 4.

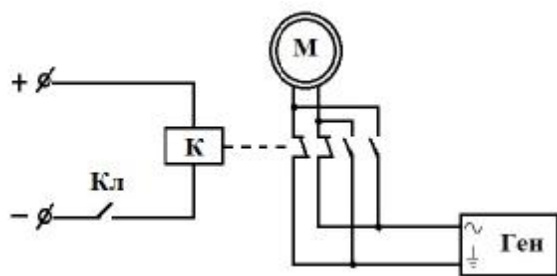


Рис. 4. Подключение шагового двигателя к генератору импульсов через электромагнитное реле

На рис. 4 следующие обозначения: Кл – ключ; К – катушка электромагнитного реле; М – шаговый двигатель; Ген – генератор импульсов.

Под действием импульсов (рис. 3) генератора 17, шаговый двигатель 9 начинает осуществлять вращение барабана стойки 3. К генератору прямоугольных импульсов 17 подключен счетчик импульсов 16, с помощью которого можно контролировать угол поворота шагового двигателя 9. Данные со счетчика импульсов 16 поступают на компьютер 21. При повороте шагового двигателя 9 на требуемый угол, с компьютера 21 через цифро-аналоговый преобразователь 20 поступает сигнал на ключ 19 с целью его закрытия и выключения генератора 17, а так же на счетчик импульсов 16, для его обнуления.

При необходимости вращения шагового двигателя 9 против часовой стрелки с компьютера 21 через цифро-аналоговый преобразователь 20 поступает сигнал на ключ 14, который замыкает цепь катушки электромагнитного реле 13. В результате чего электромагнитное реле 13 срабатывает. При этом нормально замкнутые контакты размыкаются, а нормально разомкнутые замыкаются. Далее с помощью компьютера 21 через цифро-аналоговый преобразователь 20 открывается ключ 19, который включает генератор прямоугольных импульсов 17. Теперь импульсы от генератора 17 поступают на нормально разомкнутые контакты электромагнитного реле 13, к которым подключается шаговый двигатель 9, рис. 4. Таким образом, меняется полярность импульсов поступающих на шаговый двигатель 9 и он начинает вращаться против часовой стрелки, осуществляя поворот барабана стойки 3. Для контроля угла поворота шагового двигателя 9 служит счетчик импульсов 16, подключенный к генератору прямоугольных импульсов 17. Данные со счетчика импульсов 16 поступают на компьютер 21. При повороте шагового двигателя 9 на требуемый угол с компьютера 21 через цифро-аналоговый преобразователь 20 поступает сигнал на ключ 19 с целью выключения генератора прямоугольных импульсов 17 и на ключ 14, который размыкает цепь катушки электромагнитного реле постоянного тока 13. Далее с компьютера 21 поступает сигнал на счетчик импульсов 16 с целью его обнуления.

Выводы

Представленный в данной работе автоматизированный твердотельный лазерный сканер на красителях позволяет быстро изменять длину волны выходного излучения внутри диапазона, а

так же изменять его диапазон, что дает возможность ускорить проведение анализа проб на наличие в них вредных веществ различными спектральными методами. Данное устройство может применяться самостоятельно или как составная часть приборов для спектрального анализа.

Список литературы

1. Деулин Б.И. Модернизация твердотельного лазера на органических красителях ЛКИ-301 / Б.И. Деулин // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОрелГТУ, 2013. – № 5(301). – С. 145 - 149.
2. Деулин Б.И. Сравнительные характеристики твердотельных лазеров на красителях с различными матрицами / Б.И. Деулин // Материалы VI Международной заочной научно-практической Интернет-конференции «Инновационные, фундаментальные и прикладные исследования в области химии сельскохозяйственному производству». – Орел: ОрелГАУ, 2013. – С. 162 - 166.
3. Крыжановский, В.К. Технические свойства полимерных материалов: уч.-справочное пособ. / В.К. Крыжановский В.В. Бурлов А.Д. Паниматченко Ю.В. Крыжановская. – СПб. Профессия, 2003. – 240 с.
4. Земский В.И. Физика и техника импульсных лазеров на красителях / В.И. Земский, Ю.Л. Колесников, И.К. Мешковский. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 176 с.
5. Деулин, Б.И. Твердотельный лазер на органических красителях с мембранным радиатором / Б.И. Деулин, В.В. Филиппов // Известия ВолгГТУ, серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь», № 3(161), Т. 11, 2015. – С. 40-44.
6. Деулин Б.И. Стойка-радиатор для твердотельного лазера на красителях / Б.И. Деулин, В.В. Филиппов // Орел: издательство ОрелГАУ, «Агротехника и энергообеспечение» № 5 (9), 2015. – С. 87 - 94.
7. Деулин Б.И. Автоматизированная стойка для твердотельных лазерных элементов с мембранными радиаторами / Б.И. Деулин, В.В. Филиппов // Орел: издательство ОрелГАУ, «Агротехника и энергообеспечение» № 5 (9), 2015. – С. 95-101.
8. Findpatent [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/251/2517801.html>
9. Findpatent [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/209/2091732.html>
10. Большая Энциклопедия Нефти Газа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id558737p2.html>

Reference

1. Deulin, B.I. Modernization of the solid-state laser based on organic dyes LKI-301 / *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: «Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii»*. Orel. Publisher OrelGTU, 2013, pp. 145 - 149.
2. Deulin, B.I. Comparative characteristics of solid-state dye lasers with different matrix / *Materialy VI Mezhdunarodnoj zaочноj nauchno-prakticheskoy Internet-konferencii «Innovacionnye, fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti himii sel'skohozyajstvennomu proizvodstvu»*. [Proceedings of the VI International correspondence scientific and practical Internet-conference "Innovative, fundamental and applied research in the chemistry of agricultural production"]. Orel. Publisher OrelGAU, 2013, p. 162 - 166.
3. Kryzhanovsky V.K., Rages V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Y.V. *Tekhnicheskie svoystva polimernyh materialov: Uch.-spravochnoe pos* [Technical properties of plastics Tch. and reference book]. SPb. Publisher "Professiya", 2003, 240 p.
4. Zemsky V.I., Kolesnikov L.Yu., Meshkovsky I.K. *Fizika i tekhnika impul'snyh lazerov na krasitelyah* [Physics and technology of pulsed dye lasers]. SPb. Publisher ITMO, 2005, 176 p.
5. Deulin, B.I., Filippov V.V. Solid-state laser based on organic dye membrane radiator. *Izvestiya VolgGTU, seriya Elektronika, izmeritenaya tekhnika, radiotekhnika I svyaz*. No. 3 (161), Vol. 11, 2015, pp. 40 - 44.
6. Deulin, B.I., Filippov V.V. The front radiator for a solid-state dye laser. *Izvestiya OrelGAY Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2015, No. 5(9), pp. 87 - 94.
7. Deulin, B.I., Filippov V.V. Automated stand for solid-state laser elements with membrane radiators: *Izvestiya OrelGAY Agrotekhnika i energoobespechenie*, 2015, No. 5 (9), pp. 95 - 101.
8. [Findpatent] Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/251/2517801.html>
9. [Findpatent] Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/209/2091732.html>
10. Bolshaya Entsiklopediya Nefti I gaza [Big Encyclopedia of oil and gas] Available at: <http://www.ngpedia.ru/id558737p2.html>

УДК 504.502

Радиэкологический мониторинг радиационного состояния почв чернобыльской зоны отчуждения

Л.И. Лукина¹, Д.В. Моисеев², М.А. Фролова³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹liluk.05@mail.ru, ²DVMoiseev@sevsu.ru, ³frolova-85@mail.ru

Статья поступила 18.03.2016 г.; после доработки 20.03.2016 г.

Аннотация

Представлен анализ результатов радиационно-экологического мониторинга радиационного состояния почв чернобыльской зоны отчуждения (ЗО). Рассмотрены изменение плотности радиационного поверхностного загрязнения почвы ЗО радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr за период 2004-2010 гг., процессы вертикальной миграции ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах всех уровней рельефа ЗО.

Ключевые слова: радиационно-экологический мониторинг, зона отчуждения, радионуклиды ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, ландшафт, почва, плотность загрязнения, миграция.

Radioecological Monitoring of the Radiation Status of Soils of the Chernobyl Exclusion Zone

L.I. Lukina¹, D.V. Moiseev², M.A. Frolova³

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹liluk.05@mail.ru, ²DVMoiseev@sevsu.ru, ³frolova-85@mail.ru

Received 18.03.2016 y.; received in final form 20.03.2016 y.

Abstract

The analysis of the results of radiation-ecological monitoring of the radiation status of the Chernobyl exclusion zone soils (EZ). Consider the change in the density of the surface of the radiation pollution of soil EZ radionuclide's ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the period 2004-2010., vertical migration processes of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in soils of all levels of relief EZ.

Keywords: radiation-ecological monitoring, the exclusion zone, the radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr, landscape, soil, pollution density, migration.

Введение

Чернобыльская катастрофа, являясь самой широкомасштабной, беспрецедентной и сложной за всю историю развития атомной энергетики, сказалась на состоянии окружающей среды, как Украины, Беларуси, России, так и многих стран Европы. Но особенно значительными оказались экологические последствия катастрофы в районах, непосредственно прилегающих к ЧАЭС. Эти районы, характеризующиеся высокой плотностью поверхностного радиационного загрязнения, в законодательном порядке выве-

дены из народнохозяйственного пользования с образованием зоны отчуждения (ЗО), которая является открытым источником радиоактивности, характеризуемым присутствием разных форм и видов депонируемых радионуклидов. Вследствие этого радиационный фактор продолжает представлять потенциальную опасность для населения, которое проживает на прилегающих к зоне территориях.

В настоящее время на территории Чернобыльской ЗО ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr являются основными дозоопределяющими при внешнем и внутреннем облучении человека и биоты [1]. Удельная ак-

тивность этих радионуклидов за последние годы уменьшилась более чем на 40 %. Расчеты показывают, что депонирование геологической средой ^{137}Cs и ^{90}Sr значительно выше, чем ежегодный водный вынос этих радионуклидов из ЗО.

С целью контроля и оценки радиационного состояния почвы, приземного слоя атмосферы, поверхностных и подземных вод, в ЗО проводится радиоэкологический мониторинг (РЭМ). Целенаправленный мониторинг компонентов окружающей среды ЗО осуществляет Центр радиационно-экологического мониторинга зоны отчуждения (ЦРЭМЗО).

В задачи РЭМ входят наблюдение, анализ и научно обоснованное прогнозирование миграционных процессов радионуклидов в почве и ландшафтах, растительных комплексах, поверхностных и подземных водах, приземном слое атмосферы, гидробионтах, донных отложениях, лесу, а также абиогенных и биогенных процессов выноса радионуклидов за пределы ЗО.

Естественные физическая, химическая, биологическая миграции радионуклидов медленно изменяют общий характер загрязнения ОС. Перераспределение радионуклидов в почвенном слое прослеживается в основном в местах антропогенного влияния и на участках, склонных к регулярному затоплению (подтапливание) – пойменные участки рек. Основная часть радиоактивности сконцентрирована в верхнем слое почвы и подстилке (в лесных экосистемах). Существуют участки, на которых интенсивность вертикальной миграции радионуклидов в почве выше, чем на других участках ЗО.

Характеристика ландшафтов ЗО приведена в работах [2,3]. Их структура определяется положением на Украинском щите, включая в себя его северо-восточный и западный склоны, по обе стороны границы Днепровского четвертичного оледенения, в природной зоне смешанных лесов. Рельеф ЗО представлен моренно-водноледниковыми, озерно-ледниковыми и аллювиальными равнинами, разными по высоте, форме поверхности, литологии поверхностных и подстилающих отложений. Это обуславливает неоднородность, даже пестроту почвенно-растительного покрова, и как следствие - неоднородность ландшафтно-геохимических условий.

Для оценки возможного "расползания" пятен радионуклидного загрязнения и определения риска проникновения радионуклидов в грунтовые воды важное значение имеет защищенность территории ландшафтно-геохимическими барьерами. Авторы [1,2] делают вывод о неравномерном распределении ландшафтно-геохимических

барьеров по территории исследований и неодинаковую защищенность ими различных ландшафтов ЗО. Таким образом, зона аварии на ЧАЭС в ландшафтном и ландшафтно-геохимическом отношении относится к территориям с очень неоднородным сочетанием факторов миграции радионуклидов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является анализ данных радиоэкологического мониторинга радиационного загрязнения почв черновобильской ЗО радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr за период 2004-2010 гг.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать данные по плотности радиационного поверхностного загрязнения почвы ЗО радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr за период 2004-2010 гг.;
- рассмотреть процессы вертикальной миграции радионуклидов в почвах всех уровней рельефа ЗО.

Объекты и методы исследования

Мониторинг на ландшафтных полигонах (ЛП) проводится на основе ландшафтно-биогеохимического подхода с целью изучения характера миграции и баланса радионуклидов в компонентах ландшафтов с определением их барьерных свойств, условий и вероятного количества поступления радиоактивных веществ из грунтов в растительность, к поверхностным и подземным водам [4 - 8]. Для этого использовалась система ЛП в количестве 13 шт., которые репрезентуют типические для ЗО ландшафтно-геохимические комплексы: ЛП под номерами 1-4, 11, 12 соответствуют водораздельным равнинам, под номерами 5, 7, 8, 10, 13 – надпойменным террасам, под номерами 6, 9 – пойменным террасам. Исходя из задач мониторинга, на каждом ЛП проводились ежегодные наблюдения с последующим исследованием радиоактивного загрязнения почвенного покрова в период с мая по август.

Для исследования плотности радиационного загрязнения почвы пробоотбор проводится в пяти закрепленных точках каждого ЛП с помощью цилиндрического пробоотборника методом «конверта» - пятью уколами (по углам и в центре). Пробы отбираются с интервалом апробирования 5 см на глубину 20 см, на площади 25 м². Дальше пять отобранных проб объединяются в

одну для каждого интервала глубин.

Вертикальная миграция радионуклидов изучается на каждом ЛП с помощью шурфов размером 1,5×0,8×0,5 м, в которых пробоотбор выполняется из зачищенной от посторонних примесей стенки шурфа снизу вверх цилиндрическим пробоотборником диаметром 50 мм. Интервал отбора проб – 5 см.

Отобранные на ЛП пробы анализируются на содержание ^{137}Cs , ^{90}Sr .

Радиоцезий определяется гамма-спектрометрическим методом, радиостронций – методом радиохимического выделения ^{90}Sr путем соосаждения либо ионного обмена, с последующим определением по β -активности.

Исследование плотности радиационного поверхностного загрязнения почвы ЗО радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Работа проводилась в рамках Договора о сотрудничестве между Государственным специализированным научно-производственным предприятием «Чернобыльский радиозоологический центр» ГСНПП «Экоцентр» и кафедрой Радиозоологии и экологической безопасности СХУЭиП на базе Центра радиационно-экологического мониторинга зоны отчуждения (ЦРЭМЗО), действующего с 2008 по 2014 гг. Результаты мониторинговых исследований послышного загрязнения почвенного покрова ЗО свидетельствуют о том, что плотность радиационного загрязнения почвенного покрова радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr в слое 0–20 см на исследуемых ЛП изменяется в широком диапазоне значений. Суммарное распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвенном слое ландшафтных полигонов в период 2004–2010 гг. [6] представлены в таблицах 1 – 2.

Анализ табличных данных свидетельствует о том, что плотность загрязнения меняется в зависимости от ландшафтно-геохимических типов почв. Так, по данным 2010 года для ЛП на водораздельных равнинах она колеблется: для ^{137}Cs от 100 до 1880 кБк/м², для ^{90}Sr от 20 до 300 кБк/м²; на надпойменных террасах: для ^{137}Cs от 400 до 4400 кБк/м², для ^{90}Sr – от 80 до 1550 кБк/м²; на пойменных террасах для ^{137}Cs от 4700 до 25000 кБк/м², для ^{90}Sr – от 1000 до 4800 кБк/м².

При сравнении количественных характеристик плотности загрязнения почвы этими радионуклидами, следует, что для всех типов почв величины плотности радиационного загрязнения радионуклидом ^{137}Cs примерно в пять раз выше таковых для ^{90}Sr .

Таблица 1. Суммарное распределение ^{137}Cs в почвенном слое ландшафтных полигонов, кБк/м²

№ ЛП	Годы					
	2004	2006	2007	2008	2009	2010
Ландшафтные полигоны водораздельных равнин (ЛП 1-4, 11-12)						
1	650	650	519	514	554	602
2	1000	870	767	1177	981	952
3	1700	1700	1590	1454	1451	1403
4	2270	2500	2433	2624	2610	1881
11	145	120	30	134	119	104
12	104	105	76	93	79	102
Ландшафтные полигоны надпойменных террас р. Припять (ЛП 5, 7–8, 10, 13)						
5	1550	2670	1831	1465	4652	1224
7	350	410	344	354	340	406
8	3900	4200	4263	4208	3638	4358
10	690	680	432	546	480	531
13	2075	1550	1262	1511	1654	1624
Ландшафтные полигоны пойменных террас р. Припять (ЛП 6, 9)						
6	4690	5710	4819	3285	4652	4675
9	39738	29820	25048	29850	27480	24922

Таблица 2. Суммарное распределение ^{90}Sr в почвенном слое ландшафтных полигонов, кБк/м²

№ ЛП	Годы					
	2004	2006	2007	2008	2009	2010
Ландшафтные полигоны водораздельных равнин (ЛП 1-4, 11-12)						
1	85	75	107	62	78	86
2	260	205	179	178	205	95
3	330	490	399	447	286	307
4	620	550	643	965	711	292
11	42	27	22	26	27	30
12	46	55	30	85	45	23
Ландшафтные полигоны надпойменных террас р. Припять (ЛП 5, 7–8, 10, 13)						
5	640	950	704	625	588	468
7	90	110	95	76	68	80
8	1070	840	1299	2175	1105	1552
10	245	195	146	144	89	107
13	300	190	142	184	130	172
Ландшафтные полигоны пойменных террас р. Припять (ЛП 6, 9)						
6	2300	1880	2134	1659	2043	1029
9	7900	7300	7766	15618	8648	4810

Это обусловлено, в первую очередь, тем, что плотность первичных выпадений радиоцезия

была выше, т.к. в аварийных выбросах радионуклидов количество радиоцезия было значительно больше, чем радиостронция.

Процессы вертикальной миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr

Исследования вертикального распределения ^{137}Cs в пробах почв показали, что локализация основных запасов ^{137}Cs на протяжении исследуемого периода изменялась незначительно: с 2004 до 2007 г. 83...98 % - в слое 0...10 см, и только с 2007 года стала снижаться в верхнем слое до 80 %, а с 2008 г. – до 60 % (по усредненному варианту). Наиболее активное вертикальное перемещение произошло на нижнем уровне рельефа (ЛП 6,9), а также на некоторых участках верхнего (ЛП 2) и среднего (ЛП 7, ЛП 10) уровней рельефа. В 2008-2010 гг. глубина залегания основных запасов ^{137}Cs имеет выраженную тенденцию к заглублению на всех уровнях рельефа.

В таблицах 3, 4 приведены данные за 2010 г. по вертикальному распределению ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах ландшафтных полигонов.

Таблица 3. Распределение ^{137}Cs в шурфах почвы ландшафтных полигонов, %

Слой, см	Ландшафтные полигоны												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0-5	92	56	89	82	94	66	66	81	39	65	80	77	78
5-10	5,7	26	4,2	9,3	3,6	31	23	11	11	13	7,4	14	6,6
10-15	0,9	9,6	2,8	3,6	1,3	2,1	6,3	3,3	32	6,8	2,7	3,3	6,5
15-20	0,7	3,6	1,0	0,7	0,3	0,03	0,7	0,5	15	3,5	1,0	0,3	1,8
20-25	0,3	2,6	1,8	1,3	0,3	0,03	1,0	2,1	1,5	2,2	1,1	1,4	1,6
25-30	0,2	1,4	0,6	1,1	0,1	0,01	0,5	1,5	0,7	2,4	2,0	2,7	0,9
30-35	0,02	0,7	0,3	0,9	0,1	0,01	0,7	0,1	0,6	2,7	0,8	0,5	0,9
35-40	0,01	0,2	0,1	0,5	0,03	0,01	0,7	0,1	0,1	1,8	0,7	0,3	2,0
40-45	0,1	0,1	0,03	0,4	0,1	0,01	0,4	0,1	0,2	1,8	3,3	0,2	0,6
45-50	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	1,8	1,0	0,2	0,7

Таблица 4. Распределение ^{90}Sr в шурфах почвы ландшафтных полигонов, %

Слой, см	Ландшафтные полигоны												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0-5	88	28	72	88	24	16	72	34	11	18	56	65	30
5-10	2,8	26	8,5	2,7	0,4	11	19	15	6,5	11	16	12	18
10-15	2,4	8,8	18	2,0	14	2,5	2,3	14	26	15	11	6,8	35
15-20	2,5	14	0,6	1,0	18	1,0	0,9	8,5	23	13	3,7	5,9	11
20-25	1,4	13	0,4	1,4	13	3,9	0,9	12	10	18	3,1	2,3	2,1
25-30	0,9	3,8	0,1	1,0	7,7	12	0,9	8,5	7,5	11	2,5	5,6	1,1
30-35	0,5	2,4	0,04	3,2	7,4	15	0,9	3,8	5,6	5,1	2,3	1,0	1,2
35-40	0,5	1,7	0,04	0,3	4,8	19	0,9	1,9	4,0	2,0	2,3	0,4	0,1
40-45	0,4	0,9	0,03	0,6	6,1	13	0,9	1,2	3,7	2,6	1,9	0,3	0,9
45-50	0,4	0,9	0,03	0,4	4,5	6,5	0,9	0,9	2,0	3,7	1,6	0,5	0,7

При оценке распределения ^{90}Sr по глубине установлено, что на ЛП 1,3,4,7,11,12 около 60...99 % запаса его активности сосредоточено в 0...15 см слое почвы. Для всех остальных полигонов эта величина запасов активности ^{90}Sr размещена в интервале глубин от 0...20 до 0...45 см.

Для наглядности полученных данных построены диаграммы послойного распределения ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвенных профилях на ЛП 1-13 (рис. 1, 2).

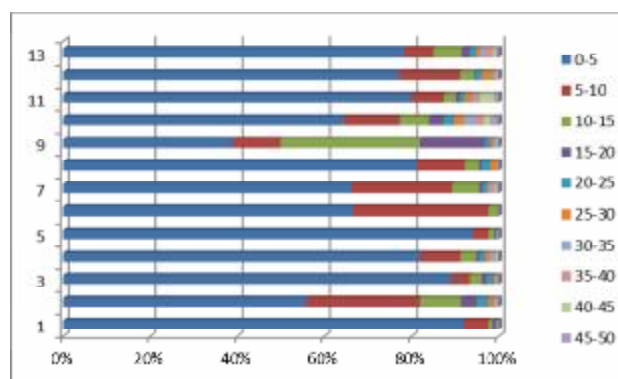


Рис. 1. Послойное распределение ^{137}Cs в почвенных профилях ландшафтных полигонов 1-13 (2010 г.)

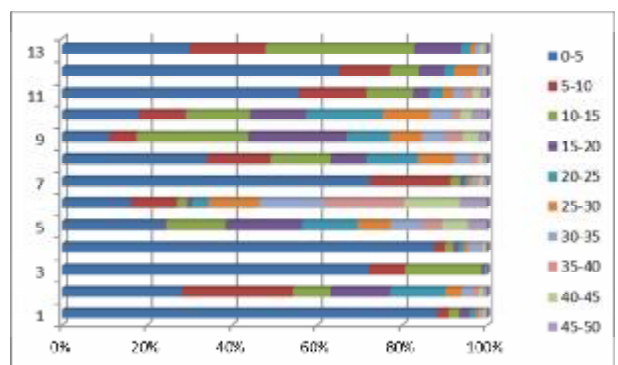


Рис. 2. Послойное распределение ^{90}Sr в почвенных профилях ландшафтных полигонов 1-13 (2010 г.)

Из приведенных в таблицах 3, 4 и рисунках 1, 2 данных следует, что скорость и глубина вертикальной миграции ^{90}Sr значительно выше, чем у ^{137}Cs .

Заключение

Из приведенных данных следует, что плотность загрязнения почвенного покрова чернойбыльской ЗО радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr изменяется в широком диапазоне значений и зависит от ландшафтно-геохимических типов почв. Наибольшее значение она имеет для пойменных ландшафтов, наименьшее – для водораздельных равнин. При этом плотность загрязнения ^{137}Cs значительно выше плотности загрязнения ^{90}Sr . Так, по данным 2010 года для ЛП на водораздельных равнинах она колеблется: для ^{137}Cs от 100 до 1880 кБк/м², для ^{90}Sr от 20 до 300 кБк/м²;

на надпойменных террасах: для ^{137}Cs от 400 до 4400 кБк/м², для ^{90}Sr - от 80 до 1550 кБк/м²; на пойменных террасах для ^{137}Cs от 4700 до 25000 кБк/м², для ^{90}Sr - от 1000 до 4800 кБк/м².

Установлено, что в большинстве ЛП основной запас активности ^{137}Cs сосредоточен в верхнем 0-20 см слое почвы, что обусловлено его связыванием в гумусных слоях почв. Однако глубина залегания ^{137}Cs имеет тенденцию углубления на всех уровнях рельефа. В почвах пойменных ландшафтов отмечается более плавное снижение концентрации радионуклидов с глубиной и нет выраженной аккумуляции в верхнем слое. Такое распределение, очевидно, обусловлено слабым выражением необменной сорбции ^{137}Cs в гумусных слоях этих почв.

В отличие от ^{137}Cs , который связывается в поверхностном гумусном слое почвы, основная часть ^{90}Sr находится в обменной форме, то есть в миграционно-подвижном состоянии. Вследствие этого ^{90}Sr , мигрируя с потоком влаги, более равномерно распределяется по почвенному профилю и проникает на большую глубину сравнительно с ^{137}Cs . Наиболее значимые расхождения в профильном распределении ^{90}Sr наблюдаются в почвах пойменных ландшафтов. Как и в случае с ^{137}Cs , существенное влияние на максимальное перераспределение ^{90}Sr имеет гидрологический режим почв. Вертикальное перераспределение этих радионуклидов определяется такими ведущими процессами, как диффузия, конвективный перенос и биогенная миграция. Распределение ^{90}Sr в целом имеет относительно более плавный характер. Эти особенности свидетельствуют о большей значимости в вертикальной миграции ^{90}Sr процессов конвективного переноса.

Список литературы

1. Двадцать п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього. – К: КІМ, 2011. – С. 328.
2. Кіреєв С.І. Ландшафти зони відчуження / С.І. Кіреєв, Д.О. Вишневський // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2009. – № 1 (33). – С. 3 - 23.
3. Кіреєв С.І. Бар'єрні функції території зони відчуження - системні складові та можливість управління / С.І. Кіреєв, Д.О. Вишневський // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2008. – № 2(32). – С. 11 - 17.
4. Годун Б.О. Радіаційний стан зони відчуження в 2006 році / Б.О. Годун [та інш.] // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2007. – 1 (29). – С. 3 - 25.
5. Годун Б.О. Радіаційний стан зони відчуження в 2008 році / Б.О. Годун [та інш.] // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2009. – 1 (33). – С. 3 - 25.

кий науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2009. – 1 (33). – С. 3 - 25.

6. Кіреєв С.І. Радіаційний стан зони відчуження в 2009 році / С.І. Кіреєв [та інш.] // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2010. – 3 (35). – С. 3 - 18.
7. Кіреєв С.І. Радіаційний стан зони відчуження в 2010 році / С.І. Кіреєв [та інш.] // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2011. – 1 (37). – С. 37 - 62.
8. Кіреєв С.І. Цезій-137 у Чорнобильській зоні відчуження / С.І. Кіреєв [та інш.] // Чорнобильський науковий вісник. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – Чорнобиль: ДП Чорнобильінтерінформ, 2011. – 2 (38). – С. 3 - 13.

References

1. 25 Years at the Chornobyl Accident: Safety of the Future. – Kyiv: KIM, 2011. – P. 328.
2. Kireev S.I., Vishnevsky D.O. Landscapes exclusion zone. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2009, No. 1(33), pp. 3 – 23.
3. Kireev S.I., Vishnevsky D.O. The barrier function of the Exclusion Zone - system components and the ability to manage. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2008, No. 2(32), pp. 11 - 17.
4. Godun B.O., Vishnevsky D.O., Kireev S.I., Kupchenko P.G., Obrizan S.M., Petrov M.F., Pilipchik T.V., Haljava T.V. Radiation Exclusion Zone in 2006. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2007, No. 1(29), pp. 3 - 25.
5. Godun B.O., Vishnevsky D.O., Kireev S.I., Nikitina T.V., Obrizan S.M., Pylypchyk T.V., Halyava V.G. Radiation Exclusion Zone in 2008. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2009, No 1(33), pp. 3 - 25.
6. Kireev S.I., Godun B.O., Vishnevsky D.O., Obrizan S.M., Demyanovich V.O. Radiation Exclusion Zone in 2009. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2010, No. 3 (35), pp. 3.-18.
7. Kireev S.I., Godun B.O., Vishnevsky D.O., Obrizan S.M., Gurin O.S. Radiation Exclusion Zone in 2010. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2011, No. 1 (37), pp. 37 - 62.
8. Kireev S.I., Vishnevsky D.O., Obrizan S.M. Cesium-137 in the Chernobyl exclusion zone. *Chornobylskiyi naukovyi visnyk. Byulleten ekologichnogo stanu zony vidchzhennya ta zony bezumovnogo (obovyazkovogo) vidselelnnya*, 2011, 2(38), pp. 3 - 13.

УДК 577.34

Анализ радионуклидной активности и годовой эквивалентной дозы, создаваемой природными радионуклидами

П.А. Пономаренко¹, М.А. Фролова², Н.В. Кравченко³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹ppa4493@gmail.com, ²frolova-85@mail.ru, ³musyaka8@rambler.ru

Статья поступила 03.02.2016 г.; после доработки 05.02.2016 г.

Аннотация

Рассмотрены составляющие химические элементы органов и тканей «стандартного» человека и выделены их радиоактивные изотопы, являющиеся внутренним природным источником облучения. Приведены результаты оценки активностей отдельно по органам и тканям и выделены радионуклиды, дающие наибольший вклад в суммарную активность тела человека.

Ключевые слова: активность, «стандартный» человек, органы, ткани, доза.

Analysis of Radionuclide Activity and Annual Equivalent Dose Produced By Natural Radionuclids

P.A. Ponomarenko¹, M.A. Frolova², N.V. Kravchenko³Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹ppa4493@gmail.com, ²frolova-85@mail.ru, ³musyaka8@rambler.ru

Received 03.02.2016 y.; received in final form 05.02.2016 y.

Abstract

Article describes the composition of the chemical elements organs and tissues 'standard' rights and highlighted their radioactive isotopes, which are a natural source of internal irradiation. The results of the evaluation of the activity of individual organs and tissues and isolated radionuclides that make the largest contribution to the total activity of the human body.

Keywords: activity, "standard" man organs, tissues, a dose.

Введение

Радионуклиды "обитают" на нашей планете с самого ее появления. Естественный радиоактивный фон "живет" миллиарды лет. Еще не было на Земле человека, а ионизирующие излучения во Вселенной уже имелись, да и сама планета имеет в своем составе радиоактивные материалы [1]. Радиация окружает человека на каждом шагу [2] и сам человек немного радиоактивен!

Интересно, что, если человека поместить в свинцовую камеру с толстыми стенками, изолирующими его от излучений извне, он все равно будет облучаться. Источник этого облучения –

радионуклиды в его собственном теле, которые попали к нему при рождении и пополняются за счет употребления пищи, в которой содержатся радионуклиды. Радионуклиды, достигнув радиоактивного равновесия продолжают находиться там всю его жизнь. Избавиться от них невозможно принципиально, как, например, невозможно избавить человека от кальция или фосфора в его организме. Но имеется возможность оценить эту "радиоактивность" тела человека исходя из известных справочных данных аналитически.

Постановка цели и задач научной работы

Цель работы – оценить удельную активность тела «стандартного» человека и мощность дозы, создаваемой природными радионуклидами внутри тела и внешним ионизирующим излучением в поле, которого постоянно находится человек. Методике этой оценки и посвящена настоящая научная работа.

Задачи:

1. Оценить общую активность тела «стандартного» человека и внутренних органов в отдельности.
2. Рассчитать мощность эквивалентной дозы, создаваемую природными радионуклидами, входящими в состав тела человека.
3. Оценить мощность дозы от внешних источников излучения нейтронного и гамма.

Оценка общей активности тела «стандартного» человека

Известно, что в состав тела человека входит 46 химических элементов и часть этих элементов имеют природные радиоактивные нуклиды, которые и создают радиоактивность человеческого тела. Наиболее весомыми "такими" элементами являются водород, углерод, кальций, калий, рубидий, уран, ванадий, лантан и радиоактивный радий. Каждый из указанных элементов, помимо радия, имеет радиоактивные нуклиды, "заложенные" самой природой, количество которых указано в таблице 1.

Таблица 1. Радионуклидный состав тела «стандартного» человека

Химический элемент	Содержание химических элементов в теле человека, %	Количество радионуклида в природном химическом элементе, %
Водород	10	1 ядро ^3_1H на 10^{18} ядер водорода
Углерод	18	10^{-10}
Кальций	1,5	0,185
Калий	0,2	0,0117
Рубидий	0,0017	27,85
Уран	$3 \cdot 10^{-8}$	100
Ванадий	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,25
Лантан	$7 \cdot 10^{-5}$	0,089
Радий *	$1,4 \cdot 10^{-13}$	100

Примечание: *

- источником радия является ряд урана ($^{226}_{88}\text{Ra}$), актиноурана ($^{223}_{88}\text{Ra}$) и тория ($^{224}_{88}\text{Ra}$). Из-за ма-

лого количества актиноурана и малых периодов полураспада $^{223}_{88}\text{Ra}$ (11,45 суток) и $^{224}_{88}\text{Ra}$ (3,665 суток), поэтому их влияние на общую радиоактивность человека не учитывалось;

- $^{14}_6\text{C}$ (радиоуглерод) и ^3_1H (тритий) космогенного происхождения;
- $^{48}_{20}\text{Ca}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{50}_{23}\text{V}$, $^{138}_{57}\text{La}$ и $^{87}_{37}\text{Rb}$ примордиальные радионуклиды, не относящиеся к радиоактивным рядам, но встречающиеся в природе в настоящее время из-за большого периода полураспада.

Для оценки общей активности тела человека, наводимой указанными нуклидами необходимо учесть долю отдельных органов и тканей, при этом учитывая содержание в них нуклидов [1].

В качестве примера возьмем "стандартного" человека весом 70 кг и среднего роста, для которого и оценим общую активность тела, не учитывая активности отдельных органов.

Для определения активности, наводимой тритием (радиоактивным нуклидом водорода и его содержанием в природном водороде, с учетом испытаний ядерного и термоядерного оружия, пик которых приходился на 1952 ÷ 1954 и 1961 ÷ 1962 гг), применяется единица - тритиевая единица (ТЕ). Это такое количество трития в природном водороде, когда 1 ядро трития приходится на 10^{18} ядер водорода. Непосредственно активность любого радионуклида определяется по формуле (1):

$$A_i = \lambda_i \cdot N_i, \text{ Бк} \quad (1)$$

где A_i – активность i-го радионуклида, Бк (расп/с);
 λ_i – постоянная распада i-го радионуклида, с^{-1} ;
 N_i – число ядер i-го радионуклида в теле или органе человека, ядер.

Принимая выше сказанное, общая активность тела стандартного человека, наводимая указанными нуклидами равна сумме активностей от каждого радионуклида.

Известно, что лишь малая часть химических элементов распределена по всему организму примерно одинаково. Каждый из них избирательно накапливается тем или иным органом или тканью [1]. Соответственно и радиоактивные нуклиды тех или иных элементов депонируются в том или ином органе или ткани. Наиболее весомыми составными частями тела человека, в которых удельное содержание природных радионуклидов примерно постоянно, являются: костная ткань, мышечная ткань, жировая ткань и ряд отдельных органов, активности которых в данной статье не учитываются.

Для определения активности костной ткани возьмем за основу, что у женщин она составляет 12 % от массы тела, а у мужчин – 15 %. При этом содержание элементов в костной ткани следующее: Ca - $1,48 \cdot 10^5$ мкг/г, K - 880 мкг/г, Rb - 10 мкг/г, Ra - $1,7 \cdot 10^{-8}$ мкг/г, содержание C – 10 % и воды – 22 % от массы костной ткани,

а содержание урана составляет 85 % от массы урана во всем теле [1].

Исходя из этих данных была рассчитана активность костной ткани, которая составила у женщин - 471,44 Бк (или 56,12 Бк/кг) и у мужчин – 589,245 Бк (или 56,118 Бк/кг). Вклад каждого из указанных нуклидов приведен в таблице 2.

Таблица 2. Активность костной ткани «стандартного» человека

Элемент	Масса костной ткани женщины, г	Активность, Бк	Масса костной ткани мужчины, г	Активность, Бк
Водород	8400	3,99	10500	4,988
Углерод		166,242		207,802
Кальций		0,038		0,047
Калий		234,207		292,759
Рубидий		61,581		76,977
Уран		0,22		0,22
Радий		5,161		6,451
Суммарная активность		471,44		589,245

Как видно из таблицы 2, основными радионуклидами, образующими общую активность костной ткани у мужчин и у женщин являются $^{14}_6\text{C}$, $^{40}_{19}\text{K}$ и $^{87}_{37}\text{Rb}$. Кроме этого одинаковая удельная активность костной ткани у мужчин и у женщин говорит о том, что химический и нуклидный состав костной ткани у них приблизительно одинаков.

Для определения активности мышечной ткани примем содержание ее у женщин 35 % от массы тела, а у мужчин – 45 %. Воды в мышеч-

ной ткани содержится 76 %, Ca - 54 мкг/г, K - 3330 мкг/г, Rb - 31 мкг/г, La - 0,9 мкг/г, белок составляет 80 % сухой массы ткани и состоит на 53 % из углерода и на 7 % из водорода [1].

Исходя из этих данных была оценена активность мышечной ткани женщин – 3762 Бк (или 153,59 Бк/кг) и мужчин – 4857 Бк (или 154,19 Бк/кг). Вклад каждого из указанных нуклидов приведен в таблице 3.

Таблица 3. Активность мышечной ткани «стандартного» человека

Элемент	Масса мышечной ткани женщины, г	Активность, Бк	Масса мышечной ткани мужчины, г	Активность, Бк
Водород	24500	46,000	31500	60,00
Углерод		593,000		764,000
Кальций		$4,041 \cdot 10^{-5}$		$5,196 \cdot 10^{-5}$
Калий		2587		3344
Рубидий		537,000		689,000
Лантан		0,019		0,024
Суммарная активность		3763		4857
Удельная активность, Бк/кг		153,59		154,19

И снова замечаем, что основными радионуклидами, образующими общую активность мышечной ткани у мужчин и у женщин являются ^3_1H , $^{14}_6\text{C}$, $^{40}_{19}\text{K}$ и $^{87}_{37}\text{Rb}$, а одинаковая удельная активность костной ткани у мужчин и у женщин говорит о том, что химический и нуклидный состав мышечной ткани у них приблизительно

одинаков.

Активности жировой ткани можно определить, приняв, что эта ткань составляет 15 % массы тела у мужчин и 27 % у женщин. Кроме этого известно, что в жировой ткани находится 29 % воды, а остальная ткань на 79 % состоит из углерода и на 13 % из водорода. Са составляет

40 мкг/г, К - 400 мкг/г, Rb - 2 мкг/г, La - 0,09 мкг/г, всей массы жировой ткани [1].

По этим данным была оценена активность жировой ткани женщины и мужчины, которая

составила 2377 Бк (или 125,76 Бк/кг) и 1321 Бк (или 125,8 Бк/кг) соответственно. Вклад каждого из указанных нуклидов приведен в таблице 4.

Таблица 4. Активность жировой ткани «стандартного» человека

Элемент	Масса жировой ткани женщины, г	Активность, Бк	Масса жировой ткани мужчины, г	Активность, Бк
Водород	18900	11,834	10500	6,575
Углерод		2098		1166
Кальций		$2,309 \cdot 10^{-5}$		$1,283 \cdot 10^{-5}$
Калий		239,53		133,072
Рубидий		27,712		15,395
Лантан		$1,44 \cdot 10^{-3}$		$8,013 \cdot 10^{-4}$
Суммарная активность		2377		1321

И последнее замечание по данным таблицы 4: если удельная активность жировой ткани у мужчин и у женщин одинакова, значит и нуклидный состав этой ткани одинаков. Зато основными нуклидами, создающими активность жировой ткани, являются $^{14}_6\text{C}$ и $^{40}_{19}\text{K}$.

Таким образом, анализируя данные трех таблиц, можно заключить: и у мужчин и у женщин определяющими природными радионуклидами, создающими внутреннюю активность тела, являются $^{14}_6\text{C}$, $^{40}_{19}\text{K}$ и $^{87}_{37}\text{Rb}$. Кроме этого главным нуклидом, образующим активность костной и мышечной ткани является $^{40}_{19}\text{K}$. Но мышечная и костная ткани по массе преобладают у мужчин. Значит и калиевая активность является преобладающей в мужском теле. В женском же теле, в частности в жировой ткани, преобладающей активностью, согласно приведенным данным, является радиоуглеродная.

$^{14}_6\text{C}$ (радиоуглерод) – это чистый β^- излучатель с максимальной энергией β -частиц (электронов) 0,155 МэВ. Учитывая, что энергетический спектр β -излучения непрерывен, средняя энергия электронов радиоуглерода составляет $\approx 0,054$ МэВ. Средняя проникающая способность таких β -частиц в человеческом теле не будет превышать $0,005 \div 0,006$ см. Это говорит о том, что β -излучение от радиоуглерода, рожденное в теле человека, за пределы тела выйти почти не может, а будет поглощаться самой биотканью. Это значит, что вокруг и женского и мужского тела почти нет поля β -излучения, источником которого является радиоуглерод.

Радионуклид $^{87}_{37}\text{Rb}$ – чистый β^- излучатель с максимальной энергией β -частиц 0,273 МэВ и

средней энергией – 0,091 МэВ. Средняя проникающая способность в биоткани тела человека не превышает 0,01 см. Поэтому β -частицы рубидия-87 практически не могут рассматриваться как источник внешнего β -поля вокруг тела человека.

В мужском теле главным радионуклидом, образующим внутреннюю активность тела, является $^{40}_{19}\text{K}$. 89 % ядер калия-40 претерпевают β -распад, а 11 % ядер – К-захват электрона с К-оболочки атома ядром. Этот процесс захвата сопровождается γ -излучением с энергией фотонов 1,46 МэВ. Максимальная энергия β -частиц при β -распаде ядер калия-40 составляет 1,32 МэВ, а средняя – 0,44 МэВ. Средняя проникающая способность β -частиц $^{40}_{19}\text{K}$ в биологической ткани не превышает 0,05 см. Это значит, что и β -частицы $^{40}_{19}\text{K}$ не создают внешнего поля β -излучения вокруг и мужского и женского тела, но γ -кванты с энергией 1,46 МэВ имеют вообще высокую проникающую способность, которую в теле человека можно оценить следующим образом. Тело человека примерно на 70 % состоит из воды, а проникающая способность γ -квантов с указанной энергией в воде характеризуется линейным коэффициентом ослабления μ , который равен $0,057 \text{ см}^{-1}$. А это значит, что слой половинного ослабления для таких гамма-квантов из биоткани имеет толщину 122 мм. Это уже свидетельствует о том, что значительная часть гамма-квантов, рожденных в мужском теле выйдет за его пределы и создаст поле гамма-квантов вокруг него. Такое же по качеству гамма-поле будет создаваться и вокруг женского тела. Однако, так как калиевая активность мужского выше аналогичной активности женского, то гамма-поле вокруг мужского тела примерно на 30 %

будет выше поля вокруг женского тела.

Суммарная активность стандартного тела, создаваемая природными радионуклидами, у женщин и у мужчин без учета активности внутренних органов, различна и равна 6611 Бк и 6767 Бк соответственно. Из этих данных видно, что тканевая активность мужского тела выше женской. Различие составляет ~ 2,5 %. Но эта активность в принципе может меняться, так как с возрастом и у мужчины и у женщины масса тела может значительно изменяться, а соответственно изменяется и масса тканей организма.

Расчет мощности эквивалентной дозы

Активность радонуклида – это физическая величина, характеризующаяся числом радиоактивных ядер, распадающихся за 1 секунду, т.е. это скорость распада. Эта величина не учитывает сколько и каких частиц выделяется при одном распаде, тем более не учитывает их энергию. Степень же разрушения облучаемого объекта зависит от величины энергии излучения, преобразованной в облучаемом объекте. Для биологической ткани эта величины должна быть еще умножена на коэффициент, учитывающий плотность произведенных излучением нарушений. Этот эффект учитывается специальной величиной, которая называется эквивалентной дозой. Поэтому далее оценим эту величины для «стандартного» тела человека с учетом международных рекомендаций по предельно допустимым дозам внутреннего облучения [2,3]. Эти реко-

$$P_{\text{ТН}} = (A_{\text{КТЖ}}^{\text{H-3}} + A_{\text{МТЖ}}^{\text{H-3}} + A_{\text{ЖТЖ}}^{\text{H-3}}) \cdot 0,01 + (A_{\text{КТЖ}}^{\text{C-14}} + A_{\text{МТЖ}}^{\text{C-14}} + A_{\text{ЖТЖ}}^{\text{C-14}}) \cdot 0,054 + (A_{\text{КТЖ}}^{\text{K-40}} + A_{\text{МТЖ}}^{\text{K-40}} + A_{\text{ЖТЖ}}^{\text{K-40}}) \cdot 0,6 + (A_{\text{КТЖ}}^{\text{Ca-48}} + A_{\text{МТЖ}}^{\text{Ca-48}} + A_{\text{ЖТЖ}}^{\text{Ca-48}}) \cdot 0,1 + (A_{\text{КТЖ}}^{\text{Rb-87}} + A_{\text{МТЖ}}^{\text{Rb-87}} + A_{\text{ЖТЖ}}^{\text{Rb-87}}) \cdot 0,11 + (A_{\text{КТЖ}}^{\text{La-138}} + A_{\text{МТЖ}}^{\text{La-138}} + A_{\text{ЖТЖ}}^{\text{La-138}}) \cdot 1,9 + A_{\text{КТЖ}}^{\text{U}} \cdot 43 + A_{\text{КТЖ}}^{\text{Ra}} \cdot 49 \frac{\text{МэВ}}{\text{с}} \quad (1)$$

Если подставить в формулу (1) данные тканевой активности женского тела, получим скорость поглощенной дозы:

$$P_{\text{Ж}} = 2330 \text{ МэВ/с} = 3,73 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/с}$$

Принимая во внимание, что поглощенная доза $D_{\text{погл}} = 1 \text{ Гр}$, если в 1 кг облучаемого объекта поглощается $E_{\text{изл}} = 1 \text{ Дж}$. Масса костной, мышечной и жировой ткани у женщины составляет 74 % от массы тела, что составляет ~ 52 кг. Следовательно $3,73 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$ поглощается в 52 кг, это соответствует мощности поглощенной дозы $7,17 \cdot 10^{-12} \text{ Гр} \cdot \text{с}^{-1}$. Но эффективная энергия учитывает и относительную биологическую эффективность. Поэтому коэффициент качества в данном случае будет равен 1, а так как $P_{\text{экв}} = P_{\text{погл}}$.

мендации вводят понятие «эффективной энергии», которое представляет величину полной энергии, освобождаемой в ткани всеми видами ионизирующего излучения (X , γ , β^- , β^+ , α и ядра отдачи) данного радиоактивного нуклида на один распад, включая относительную биологическую эффективность каждого из этих видов ионизирующего излучения. Для дальнейших расчетов эквивалентной дозы, создаваемой внутренним содержанием природных радионуклидов в теле человека, воспользуемся данными эффективной энергии для различных радионуклидов, приведенными в [1,5-7] и сведенными в таблицу 5.

Таблица 5. Эффективные энергии некоторых природных радионуклидов

Радионуклид	$E_{\text{эфф}}$, МэВ
^3_1H	0,01
$^{14}_6\text{C}$	0,054
$^{40}_{19}\text{K}$	0,6
$^{48}_{20}\text{Ca}$	0,1
$^{87}_{37}\text{Rb}$	0,11
$^{138}_{57}\text{La}$	1,9
U	43
$^{224}_{88}\text{Ra}$	49

Тогда мощность эквивалентной дозы за 1 секунду по всем трем тканям будет равна:

$$KK = 7,1710^{-12} \text{ Зв} \cdot \text{с}^{-1} = 0,00023 \text{ Зв} \cdot \text{год}^{-1} = 0,23 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}.$$

Если провести аналогичную оценку годовой дозы для мужского тела, получим $D_{\text{МТ}}^{\text{МТ}} = 2,84 \text{ мЗв}$.

Оценка мощности дозы от внешних источников излучения

Кроме дозы, которой облучается тело человека связанной с содержанием в нем природных радионуклидов, каждый житель Земли облучается внешним ядерным излучением, величина дозы которого в каждом регионе земного шара различна. К внешнему ядерному излучению относится нейтронное и γ - излучение. Величина дозы и γ - излучения в каждом районе своя и зависит в

основном от содержания урана и тория, а так же природных радионуклидов в земле данного района. Для г. Севастополя величина мощности эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения (так называемого фона ионизирующего излучения) составляет $\sim 80 \text{ мБэр} \cdot \text{год}^{-1} = 0,8 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$.

Кроме фона гамма-излучения в каждой точке земного шара имеется и определенная величина нейтронного поля, характеризующаяся плотностью потока нейтронов. Источником этих нейтронов являются космические частицы очень высокой энергии, взаимодействующие с ядрами составляющих элементов воздуха (в основном с ядрами азота и кислорода). Поэтому эти нейтроны называют космическими. Их плотность потока зависит от широты поверхности Земли и высоты над уровнем моря. На рисунке представлена зависимость плотности потока нейтронов от широты и высоты над уровнем моря [8].

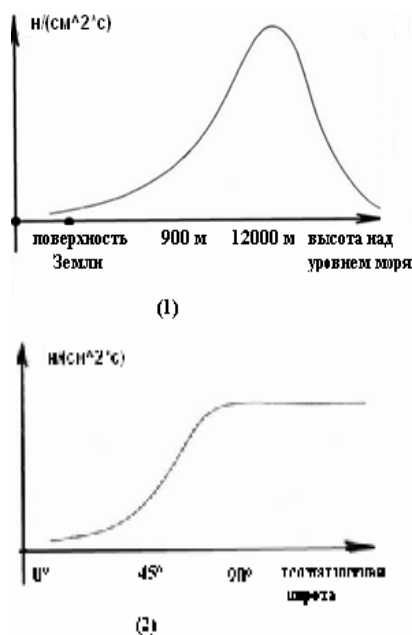


Рис. Зависимость плотности потока космических нейтронов: 1 – от высоты над уровнем моря; 2 – геомагнитной широты

На графике $\varphi \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ – плотность потока нейтронов космического происхождения от широты места на Земном шаре α° и высоты H над уровнем моря (на рисунке (1) указанная экваториальная зона). Поэтому повышенной дозой космических нейтронов облучаются жители районов близких к полюсам, бортовой персонал и пассажиры самолетов, а также жители горных районов.

Широта г. Севастополя $44,5^\circ$. Это значит, что средняя плотность потока нейтронов космического происхождения, которой постоянно облучаются жители города, составляет $\sim 6 \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В результате упругого и неупругого столкновения этих нейтронов с ядрами элементов составляющих воздуха N_2 , O_2 , Ar , He , CO_2 , паров H_2O и др., эти космические нейтроны теряют свою энергию. Поэтому можно допустить, что энергия указанных нейтронов – тепловая на уровне $0,2 \div 0,02 \text{ эВ}$. Для нейтронов такой энергии удельная максимальная эквивалентная доза h [9] находится на уровне $9 \cdot 10^{-10} \text{ бэр} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{нейтрон}^{-1}$. Мощность эквивалентной дозы от космических нейтронов для жителей Севастополя выразится как

$$\begin{aligned} P &= \varphi \cdot h = 6 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \cdot 9 \cdot 10^{-10} \frac{\text{бэр} \cdot \text{см}^2}{\text{н}} = \\ &= 54 \cdot 10^{-10} \frac{\text{бэр}}{\text{с}} = 1,94 \cdot 10^{-5} \frac{\text{бэр}}{\text{час}} = 0,17 \frac{\text{бэр}}{\text{год}} = \\ &= 0,0017 \frac{\text{Зв}}{\text{год}} = 1,7 \frac{\text{мЗв}}{\text{год}}. \end{aligned}$$

Суммарная мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения за год для «стандартного» человека – жителя Севастополя составит:

$$P = P_{\text{внутренняя}} + P_{\text{фон}} + P_{\text{косм.нейтроны}} \quad (2)$$

Следовательно, суммарная годовая эквивалентная доза костной, мышечной и жировой ткани определяется по формуле (3). Для женщины и мужчины массой 70 кг будет составлять соответственно 2,73 мЗв и 2,84 мЗв.

$$D_{\text{годовая}}^{\text{ЖТ}} = D_{\text{годовая}}^{\text{внутренняя}} + D_{\text{годовая}}^{\text{фон}} + D_{\text{годовая}}^{\text{косм.нейтроны}} \quad (3)$$

Заключение

Таким образом, основные ткани (костная, жировая и мышечная) женщины массой в 70 кг в г. Севастополе облучаются природным ионизирующим излучением и годовая эквивалентная доза этого излучения составляем $\sim 2,73 \text{ мЗв}$, а для «стандартного» мужчины она составит 2,84 мЗв. Расчетные данные являются основой для дальнейших расчетов рисков здоровья населения, связанных с облучением природными источниками.

Список литературы

1. Закутинский Д.И. Справочник по токсикологии радиоактивных изотопов /Д.И. Закутинский, Ю.Д. Парфенов, Л.Н. Селиванова. – М.: мед. лит., 1962. – 116 с.
2. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомен-

- дациях 1990 г. Публ. 60. Ч. 1, 61 МКРЗ: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 68 с.
3. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публ. 60, ч. 2 МКРЗ: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1994. – 208 с.
 4. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1–3), 1991 – 249 с.
 5. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности / В.Ф. Козлов; 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 632 с.
 6. Справочник по ядерной физике. Перевод с английского под редакцией академика Л.А. Арцимовича. – М.: Госиздат физ., 1963. – 632 с.
 7. Гусев Н.Г. Радиоактивные изотопы как гамма-излучатели [Текст] / Н.Г. Гусев, В.П. Машкович, Б.В. Вербицкий. – М.: Атомиздат, 1964. – 277 с.
 8. Филиппов Е.М. Возможности использования нейтронов космического фонда для изучения солесодержания морских вод / Е.М. Филиппов // Авторский оттиск «Атомная энергия», 1984. – Т. 56. – 18 с.
 9. Нормы радиационной безопасности НБР - 76/87 и основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87 [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 20 с.
 - neutrons Space Foundation to study the salinity of sea water], Avtorskij ottisk «Atomnaja jenergija» tom 56, 1984. 18 p.
 9. Normy radiacionnoj bezopasnosti NBR - 76/87 i osnovnye sanitarnye pravila raboty s radioaktivnymi veshhestvami i drugimi istochnikami ionizirujushhih izluchenij OSP-72/87 [Tekst] [Standards of radiation safety - 76/87 and the basic sanitary rules with ra-radioactive substances and other sources of ionizing radiation SIR-72/87]. Moskow, Jenergoatomizdat, 1988, 20 p.

References

1. Zakutinskij D.I., Parfenov YU.D., Selivanova L.N. *Spravochnik po toksi-kologii radioaktivnyh izotopov* [Handbook of Toxicology of radioactive isotopes]. Moskow, Gosizdat Med.lit., 1962. – 116 p.
2. *Predely godovogo postupleniya radionuklidov v organism rabotayushchikh, osnovannye va rekomendats* [Recommendations of the International Commission on Radiological Protection]. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1), 1994, 68 p.
3. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, 1994, Ann. ICRP 21 (2), 208 p.
4. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, 1991, Ann. ICRP 21 (1–3), 249 p.
5. Kozlov V.F. *Spravochnik po radiacionnoj bezopasnosti* [Handbook of Radiation Safety], 4-e izd., pererab. i dop. Moskow, Energoatomizdat, 1991, 352 p.
6. *Spravochnik po yadernoj fizike. Perevod s anglijskogo pod redakciej akademika L.A. Arcimovicha* [Guide to nuclear physics. Translated by Academician LA Artsimovich edited]. Moskow, Gosizdat fiz., 1963, 632.p.
7. Gusev N.G., Mashkovich V.P., Verbickij B.V. *Radioaktivnye izotopy kak gamma-izluchатели* [Tekst] [Radioactive isotopes as gamma-emitters]. Moskow, Atomizdat, 1964, 277 p.
8. Filippov E.M. *Vozmozhnosti ispol'zova-nija nejttronov kosmicheskogo fonda dlja izuchenija solesoderzhaniya morskikh vod* [The possibility of using

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 2 № 1**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 2 No 1**

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

Адрес редколлегии:
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. г. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail sevsu.ru\l.v.litvinova@sevsu.ru
тел. +7(8692) 71-30-44, факс +7(8692) 71-01-38

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка *Л.В. Литвинова*

Подписано к печати 30.03.2016. Изд. № 104/16. Зак. 44/16. Тираж 75 экз.
Объем 12,5 п.л. Усл. п.л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,26. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»