

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Глобальная ядерная безопасность

(научно-практический журнал)

ISSN 2305-414X (Print), ISSN 2499-9733 (Online)

2023, Том 13, № 3 (48)

Журнал включен в перечень ВАК РФ (988)

Группы научных специальностей:

1.2 Компьютерные науки и информатика

2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь

2.4 Энергетика и электротехника

5.2 Экономика

Главный редактор:

Михаил Николаевич Стриханов, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Заместитель главного редактора:

Валентина Анатольевна Руденко, доктор соц. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Редакционная коллегия:

Владимир Петрович Поваров, доктор техн. наук, Нововоронежская АЭС, Российская Федерация

Мажын Каналинович Скаков, доктор физ.-мат. наук, профессор, Восточно-Казахстанский университет, Казахстан

Валентин Ефимович Шукинунов, доктор техн. наук, профессор, Центр тренажеростроения и подготовки персонала, Российская Федерация

Лю Дамин, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, Китай

Александр Викторович Чернов, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Юрий Иванович Пимшин, доктор техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, Российская Федерация

Александр Прокопьевич Елохин, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Абдель-Монем Мохамед Эл-Батахи, Центральный металлургический научно-исследовательский институт, Египет

Валерий Вольфович Кривин, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Виктор Иванович Ратушный, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Андрей Александрович Сальников, канд. техн. наук, Ростовская АЭС, Российская Федерация

Александр Аркадьевич Лапкис, канд. техн. наук, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Сергей Эдуардович Гоок, PhD в области технических наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, Германия

Мария Владимировна Головки, доктор экон. наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Российская Федерация

Наталья Михайловна Фоменко, доктор экон. наук, РЭУ им. Г.В.Плеханова, Российская Федерация

Александр Николаевич Шилин, доктор техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация

Выпускающий редактор, компьютерная верстка:

Надежда Ивановна Лобковская, канд. филос. наук, НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

Регистрация СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 11 ноября 2011 года (Свидетельство ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г. – печатное издание)
Периодичность:	4 номера в год
Учредитель и издатель:	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Адрес редакции:	115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31; 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94, тел. 8(639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru
Адрес типографии:	347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Сайт:	https://glonucsec.elpub.ru/jour/index
Выход в свет:	21.09.2023 г.
Тираж:	300 экз.
Цена:	Свободная
Подписной индекс:	10647 (объединенный каталог «Пресса России»)



Научное издание. Знаком информационной продукции не маркируется согласно п. 2 ст. 1 ФЗ № 436-ФЗ от 29.12.2010 г

Москва

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023

National Research Nuclear University MEPHI

Global Nuclear Safety

ISSN 2305-414X (Print), ISSN 2499-9733 (Online)

2023, Vol. 13, No. 3

Editor-in-Chief:

Mikhail N. Strikhanov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief:

Valentina A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Editorial Staff:

Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Eng.), Novovoronezh NPP, Russian Federation

Mazhin K. Skakov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Kazakhstan

Valentin E. Shukshunov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, LLC «Simulator Center and Staff Training», Russian Federation

Liu Daming, Professor, Chinese nuclear power institute, CIAE, China

Alexandr V. Chernov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Yuri I. Pimshin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University, Russian Federation

Alexandr P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Abdel-Monem Mohamed El-Batahy, Dr. Philos. Central Metallurgical Research and Development Institute, Egypt

Valery V. Krivin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Viktor I. Ratushny, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Andrey A. Salnikov, Cand. Sci. (Eng.), Rostov NPP, Russian Federation

Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), MEPHI, Russian Federation

Sergei E. Gook, PhD, Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK, Germany

Maria V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), FSBEI HE Kuban SAU, Russian Federation

Natalia M. Fomenko, Dr. Sci. (Econ.), Plekhanov Russian University of Economics, Russian Federation

Alexander N. Shilin, Dr. Sci. (Eng.), Volgograd State Technical University, Russian Federation

Executive Editor and Computer layout:

Nadezhda I. Lobkovskaya, Cand. Sci. (Philos.), MEPHI, Russian Federation

Founded in November, 2011 Reg. № FS77-47155, November, 3 2011
Quarterly
Founder and Publisher: National Research Nuclear University MEPHI
Editorial address: Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation; Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation, Phone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru
Press address: Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation
Website: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>
Published on: 21.09.2023 r.
The circulation is: 300 copies
The price: Is free
The subscription index is: 10647 in the catalogue «Press of Russia»



Moscow

© National Research Nuclear University MEPHI, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

2023, № 3 (48)

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Анализ по сценариям потери теплоотвода из бассейна выдержки на атомных электрических станциях <i>М.Т. Акобян, А.И. Ксенофонтов, С.А. Саргсян</i>	5
Перспективы применения систем накопления энергии в системах электроснабжения собственных нужд АЭС <i>В.В. Карчин, Е.В. Мельдин, А.Н. Питев</i>	17

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Метод описания модульной информационно-измерительной системы на основе протокола CANopen с учетом межмодульных информационных связей <i>Д.А. Плотников, А.С. Муженко, В.И. Лачин</i>	26
Цифровая модель вибропреобразователя на основе эффекта левитации <i>А.Н. Шилин, С.В. Макартичян, И.С. Барашков</i>	37
Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР <i>К.Н. Проскуряков, М.С. Хвостова, Р.М. Исмаил, Яковлев К.А.</i>	51

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Применение метода вакуумного увода инертных радиоактивных газов для контроля герметичности оболочек твэлов ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР при работе на мощности <i>С.Н. Калмыков, С.Д. Полозков, А.И. Курина, Е.И. Голубев</i>	62
Совершенствование методов анализа технического состояния электромеханического оборудования АЭС <i>Е.А. Абидова</i>	72
Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя <i>С.С. Правосуд, Д.С. Маслаков, Я.О. Якубов, А.А. Овчеренко</i>	82

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Исследование причин и возможных направлений решения проблемы дефицита специалистов в энергетической отрасли России с привлечением HR-брендинга <i>В.А. Бондаренко, Т.С. Попова, А.А. Попов</i>	96
---	----

Авторский указатель номера 3 (48), 2023.....	107
--	-----

CONTENTS

2023, № 3 (48)

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

- Scenario analysis loss of heat removal from the spent fuel pool on nuclear power plant
M.T. Hakobyan, A.I. Ksenofontov, S.A. Sargsyan..... 5
- Prospects for the application of battery energy storage systems in NPP auxiliary
power supply systems
V.V. Karchin, I.V. Meldin, A.N. Pitev..... 17

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

- A method of describing a modular information and measurement system based on the CANopen
protocol, taking into account intermodule information links
D.A. Plotnikov, A.S. Muzhenko, V.I. Lachin..... 26
- Vibroconverter mathematical model based on the levitation effect
A.N. Shilin, S.V. Makartichan, I.S. Barashkov..... 37
- Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER
K.N. Proskuryakov, M.S. Khvostova, R.M. Ismail, K.A. Yakovlev..... 51

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

- Application of the method of vacuum withdrawal inert radioactive gases to control of fuel rods
leaking of nuclear reactors WWER types while operation
S.N. Kalmykov, S.D. Polozkov, A.I. Kurina, E.I. Golubev..... 62
- Improvement of methods for analyzing the technical condition of electromechanical
equipment of nuclear power plants
E.A. Abidova 72
- Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel node
adjacent to two coolant nodes
S.S. Pravosud, D.S. Maslakov, Ya.O. Yakubov, A.A. Ovcherenko..... 82

SAFETY CULTURE AND SOCIAL AND ECONOMIC ASPECTS OF NUCLEAR INFRASTRUCTURE AREA DEVELOPMENT

- Investigation of the causes and possible ways to solve the problem of shortage of specialists in the
Russian energy industry with the involvement of HR branding
V.A. Bondarenko, T.S. Popova, A.A. Popov..... 96

Author Index of 3 (48), 2023 107

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.039.7: 621.311.25
DOI 10.26583/gns-2023-03-01
EDN BRASHK



Анализ по сценариям потери теплоотвода из бассейна выдержки на
атомных электрических станциях

М.Т. Акобян^{1,2} , А.И. Ксенофонтов¹ , С.А. Саргсян²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

² Армянская атомная электростанция, г. Мецамор, Армения

✉ marine_h@mail.ru

Аннотация. Система хранения отработанного ядерного топлива предназначена для хранения и охлаждения отработанного топлива в течение нескольких лет с учётом плановых перегрузок и выгрузки всей активной зоны, накопленного после использования в ядерном реакторе. Она состоит из специальных бассейнов или контейнеров, где отработанное топливо помещается для временного хранения перед его окончательной обработкой или захоронением. Эти системы обеспечивают безопасное и эффективное хранение отработанного топлива, чтобы предотвратить утечку радиоактивных материалов в окружающую среду и минимизировать риски для здоровья людей и окружающей природы. События, произошедшие во время ядерной катастрофы в Фукусиме 11 марта 2011 года, подчеркнули важность безопасного хранения отработанного топлива в бассейне выдержки. Поэтому обеспечение безопасности хранения стало ключевым аспектом в данной области. Данная статья описывает расчеты потери теплоотвода для аналитического обоснования инструкций, по обслуживанию оборудования при аварийном реагировании в период останова реактора энергоблока №2 Армянской АЭС с помощью компьютерного кода RELAP5/Mod3.2. Рассмотрено исходное событие при потере теплоотвода от бассейна выдержки. Проведен анализ ядерной безопасности в ходе развития запроектной аварии с длительным обесточиванием АЭС применительно к бассейну выдержки энергоблока с реакторной установкой (РУ) ВВЭР-440 (проект В-270). Оценены радиационные последствия. В статье предоставлены расчеты следующих аварий для определения необходимых действий оператора: потеря теплоотвода от бассейна выдержки без действия оператора и потеря теплоотвода из бассейна выдержки с организацией последующей подпитки бассейна выдержки насосом борной очистки 2НБО-2. Выполнение расчетов основано на граничных и начальных условиях, соответствующих предположениям «улучшенной оценки».

Ключевые слова: АЭС, бассейн выдержки, тяжелая авария, атомная энергетика, радиационная безопасность.

Для цитирования: Акобян М.Т., Ксенофонтов А.И., Саргсян С.А. Анализ по сценариям потери теплоотвода из бассейна выдержки на атомных электрических станциях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):5–16. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-01>

Scenario analysis loss of heat removal from the spent fuel pool on nuclear power plant

Marine T. Hakobyan^{1,2} , Alexandre I. Ksenofontov¹ , Sos A. Sargsyan²

^{1,2} National Research Nuclear University «MEPhI», 31, Kashirskoye shosse, Moscow, Russia 15409

¹ HAEK CJSC, Metsamor, Armenia

✉ marine_h@mail.ru

Abstract. The spent nuclear fuel storage system is designed to store and cool spent fuel for several years taking into account scheduled reloads and unloading of the entire core accumulated after use in a nuclear reactor. It consists of special pools or containers where spent fuel is placed for temporary storage before final treatment or disposal. These systems provide safe and efficient storage of spent fuel to prevent radioactive material from leaking into the environment and minimize risks to human health and the natural environment. The events that occurred during the Fukushima nuclear disaster on March 11, 2011, underscored the importance of safe storage of spent fuel in the spent fuel storage pool. Storage safety has therefore become a key aspect in this area. This

article describes the heat sink loss calculations for the analytical substantiation of the emergency response instructions for the shutdown state of the Armenian NPP power unit No.2 using the RELAP5/Mod3.2 computer code. The initiating event in the event of loss of heat removal from the spent fuel pool is considered. The analysis of nuclear safety in the course of the development of a beyond design basis accident with a long NPP blackout was carried out in relation to the spent fuel pool of a power unit with a reactor plant WWER-440 (project V-270). The radiation consequences are estimated. The article provides calculations of the following accidents to determine the necessary actions of the operator: loss of heat removal from the spent fuel pool without operator action and loss of heat removal from the spent fuel pool from the organizations of subsequent make-up of the spent fuel pool with a boron cleaning pump (2NBO-2). The calculations are based on boundary and initial conditions corresponding to the assumptions of the «better estimate».

Keywords: nuclear power plant, spent fuel pool, severe accident, nuclear power industry, radiation safety.

For citation: Hakobyan M.T., Ksenofontov A.I., Sargsyan S.A. Scenario analysis loss of heat removal from the spent fuel pool on nuclear power plant. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):5–16 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-01>

Введение

Обеспечение ядерной безопасности предусматривает системный подход к созданию и соблюдению мер и процедур, направленных на предотвращение аварийных ситуаций и минимизацию рисков, связанных с использованием ядерной энергии. Системный подход включает обучение персонала, разработку средств контроля и мониторинга радиационной обстановки, а также создание систем аварийной защиты и эвакуации в случае необходимости.

Согласно исследованиям, проведенным до 2011 г. комиссией по ядерному регулированию США, вероятность тяжелых аварий, происходящих в бассейне выдержки (БВ) с отработавшим ядерным топливом, была достаточно низкой¹.

Фактически, существовало мнение, что из-за систем безопасности и наличия у оператора достаточного времени для принятия соответствующих мер, последствия этих аварий не выходят за пределы допустимых, так как, в случае длительного обесточивания станции, охлаждение бассейна выдержки обеспечивается запуском резервных устройств электропитания.

Однако, события 11 марта 2011 г. на АЭС Фукусима-Дайити в Японии, землетрясение и последовавшее за ним цунами привело к полному обесточиванию станции и отказу систем аварийного охлаждения, что напомнило мировому сообществу о необходимости повышения внимания к ряду вопросов по безопасности атомной энергетики, в частности, случаи аварии в бассейнах выдержках [1].

Этот инцидент показал, что хотя вероятность таких аварий невелика и аварийный процесс протекает медленно, однако из-за хранения огромного количества тепловыделяющих сборок и наличия только одного барьера на пути выброса радиоактивных материалов риск такой аварии в активной зоне реактора может быть даже больше, чем аварии активной зоны реактора.

Оценка аварии на АЭС Фукусима подчеркнула важность строгих соблюдений норм и правил безопасности и потребность постоянного обучения персонала². Угроза потери охлаждения бассейна выдержки становится очень опасной при событиях, связанных с длительным полным обесточиванием, поэтому необходимо провести анализ даже маловероятных сценариев развития проектной аварии на атомных

¹ Collins T.E., Hubbard G. Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants. Division of Systems Safety and Analysis. Report number NUREG-1738. *Office of Nuclear Reactor Regulation. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC 20555-0001. February 2001:3201,3202.* <https://www.nrc.gov/docs/ML0104/ML010430066.pdf> (дата обращения: 02.05.2023)

² International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami. IAEA Mission Report. 24 May – 2 June 2011. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/Full_Report.pdf (дата обращения: 02.05.2023)

станциях. Бездействие оператора может привести даже к полному осушению бассейна выдержки, и тепловыделяющие сборки начнут расплавляться из-за недостатка охлаждения, что приведет к серьезным радиационным последствиям³. В целом, обеспечение ядерной безопасности реакторной установки – это комплексный и многогранный процесс, который требует постоянного совершенствования и соблюдения высоких стандартов⁴.

В данной статье анализируются результаты расчета представленных сценариев, начальные события которых ведут к потере теплоотвода из бассейна выдержки. Главной целью анализа является исследование вопроса о возможности нарушения важных критериев безопасности в результате сложившихся аварийных ситуаций. Расчеты выполнялись для оценки возможности охлаждения бассейна выдержки ВВЭР-440/270 (Армянская АЭС, энергоблок №2) и эффективности действий оператора по применению насоса низкого давления в ходе аварии в условиях потери теплоотвода из бассейна выдержки [2].

Описание бассейна выдержки

Бассейн выдержки – это специальный резервуар или бак, предназначенный для временного хранения отработавших тепловыделяющих сборок (ТВС) из реактора ядерной энергетической установки. Он используется для охлаждения и временного размещения выгруженных из реактора ТВС перед их дальнейшей обработкой или транспортировкой на специализированные объекты для долгосрочного хранения или переработки.

Бассейн выдержки обычно имеет большой объем и специальную конструкцию, предназначенную для эффективного охлаждения и обеспечения безопасного хранения выгруженных ТВС. Он оборудован системами охлаждения, включающими циркуляцию воды или другого охлаждающего вещества, а также системами контроля и мониторинга, которые обеспечивают постоянное наблюдение за состоянием ТВС и условиями в бассейне⁵.

Бассейн выдержки является важным элементом ядерной энергетической установки, который обеспечивает безопасное временное хранение отработавших тепловыделяющих сборок до их дальнейшей обработки или транспортировки на другие объекты. Он предназначен для минимизации рисков радиационных выбросов и обеспечения безопасности персонала и окружающей среды в процессе обработки и утилизации выгруженных ТВС.

Стеллажи БВ позволяют разместить и хранить отработавшие ТВС в два яруса с неуплотненным размещением топливных кассет в ячейках или в герметичных пеналах. В нижнем стеллаже БВ размещены 312 ячеек для кассет и 60 ячеек для герметичных пеналов. В верхнем (съёмном) стеллаже размещено 291 ячейки для кассет и 60 ячеек для герметичных пеналов. Всего в БВ может быть размещено 723 отработавших ТВС. Кассеты и гермопеналы расположены в стеллажах по вершинам равностороннего

³ Будаев М.А., Васильев А.Д., Звонарев Ю.А., Конобеев А.В., Меркулов В.В. Генерация водорода при осушении бассейна выдержки во время аварии с полным обесточиванием на АЭС. Материалы Международной VIII научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. 23-25 мая 2012 г., г. Подольск, Россия, МНТК. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2012. С. 78.

⁴ НП-058-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения. URL:<https://docs.cntd.ru/document/420215595> (дата обращения: 24.04.2023)

⁵ Безбородов А.Н. Меркулов В.В. Теплофизический анализ и анализ ядерной безопасности бассейна выдержки при аварии с полным длительным обесточиванием АЭС. Материалы Международной VIII научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. 23-25 мая 2012 г., г. Подольск, Россия, МНТК. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2012. С. 16.

треугольника со стороной 225 мм. В нижнем ярусе размещены 13 герметичных пеналов, три гермопенала, у которых демонтированы трубы охлаждения, в результате чего они стали негерметичными, а остальные ячейки переделаны для хранения кассет. В верхнем (съемном) стеллаже все ячейки для гермопеналов переделаны для хранения кассет.

Сценарии и критерии аварии

Критерии, главным образом, сфокусированы на предотвращении разрушения многочисленных барьеров, обеспечивающих защиту от разрушения топлива БВ и неконтролируемого выхода радиоактивных веществ.

Вышеуказанные события рассматриваются как крайне маловероятные, применяемые для этого процесса критерии определены в нормах МАГАТЭ по безопасности⁶ для запроектных аварий. Принято, что максимальная температура оболочки горячей кассеты ($T_{\text{обол}}$) не должна превышать 1200°C , а полное локальное окисление оболочки (ПЛО) кассеты не должно превышать 17% исходной толщины до окисления, т.е. можно записать уравнение (1):

$$\Delta t = t \cdot k \cdot a = 630 \cdot 0,17 \cdot 20 = 87 \text{ мкм} \quad (1)$$

где Δt – ПЛО;

t – минимальная толщина оболочки ТВЭЛа;

k – допустимая толщина окисления – 17%;

a – окисление до начала аварии.

Общее количество водорода (H_2), образовавшегося при химической реакции оболочки кассеты с водой или паром, не должно превышать 1% гипотетического количества (5,1 кг), которое образуется, если оболочки всех кассет, выгруженных из активной зоны при полной выгрузке, участвуют в реакции. Поскольку кассеты, которые были выгружены в прошлые годы, находятся в нижнем ярусе и имеют низкую степень энерговыделения, образование водорода при химической реакции оболочки этих кассет незначительно.

Допустимое количество H_2 рассчитывается по формуле (2):

$$\begin{aligned} \pi \cdot (2 \cdot d - 2 \cdot t) \cdot t \cdot \rho \cdot n \cdot (m \cdot l + k \cdot l_1) \cdot x \cdot \frac{N}{M} \cdot \frac{\alpha}{N} = \pi \cdot \\ (2 \cdot 9,05 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 6,3 \cdot 10^{-4}) \cdot 2 \cdot 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot 6550 \cdot 126 \cdot \\ (312 \cdot 2,46 + 37 \cdot 2,36) \cdot 0,9 \cdot \frac{4}{91,22} \cdot \frac{0,01}{4} = 5,10 \text{ (кг)} \end{aligned} \quad (2)$$

где d – минимальный внешний диаметр оболочки ТВЭЛа;

t – минимальная толщина оболочки ТВЭЛа;

ρ – плотность циркония;

n – количество ТВЭЛов в одной кассете;

m – количество регулирующих кассет (РК);

l – длина топливной части в рабочих кассетах при рабочей температуре;

k – количество аварийно регулирующих кассет (АРК);

⁶ Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности №SSG-2. Нормы МАГАТЭ по безопасности. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2014. ISBN 978–92–0–401814–1. ISSN 1020–5845. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1428r_web.pdf (дата обращения: 24.04.2023)

l_1 – длина топливной части в АРК при рабочей температуре;

X – доля содержания циркония в сплаве оболочки;

N – количество атомов водорода, образующихся при пароциркониевой реакции;

M – молярная масса циркония;

A – допустимая доля образования водорода при пароциркониевой реакции – 1%.

Время до повреждения топлива БВ определяется временем до нарушения любого критерия. Например, время до нарушения критерия по максимальной температуре оболочки равно времени достижения температуры оболочки 1200°C, а время до нарушения критерия по максимальной температуре топлива определяется временем достижения температуры облученного топлива 2570°C или свежего 2840°C.

Для рассмотренной аварии вероятны нарушения именно этих критериев, но для полноты анализа рассматриваются еще и другие критерии. Так, для предотвращения плавления топлива даже в локальном масштабе локальная энтальпия горячего стержня средней топливной кассеты должна быть меньше 840 Дж/г для облученного топлива и меньше 963 Дж/г для свежего топлива⁷.

В данной статье не анализируются последствия радиологических выбросов, так как после достижения критерия повреждения активной зоны оператор от аварийной инструкции переходит к руководству по управлению тяжелых аварий, и оценка радиологических выбросов выполняется на этой фазе развития аварии. В этой статье рассматривается временной интервал, определяемый только моментом повреждения топлива БВ.

Методология

Был использован компьютерный код RELAP5/Mod3.2 [3] для моделирования динамики процессов в ядерных энергетических установках. Код предназначен для моделирования различных условий и сценариев, таких, как нормальная эксплуатация, аварийные ситуации, а также локальные и глобальные потери охлаждения в реактор⁸. Он основан на математических моделях, описывающих теплогидравлические процессы, включая теплообмен, гидродинамику и многофазные потоки, что позволяет моделировать поведение реактора в различных режимах работы и в аварийных ситуациях [4].

Анализ исходного события потери охлаждения БВ

Для выполнения анализа исходных данных данной группы была разработана модель БВ с двухъярусным расположением отработавших ТВС в БВ энергоблока №2 ААЭС. Нодализация диаграмма двухъярусной модели БВ представлена на рисунке 1. Двухъярусная модель БВ моделирует расположение ТВС от плановых перегрузок со временем выдержки от одного до четырех лет в нижнем стеллаже БВ. Верхний стеллаж БВ полностью занят ТВС аварийно-выгруженной активной зоны. Уровень воды в БВ принят минимальным 10,2 м.

⁷ International Organization for Standardization. Nuclear Energy. Light Water Reactors. Calculation of Decay Power in Nuclear Fuels. ISO, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/76532.html> (дата обращения: 24.04.2023)

⁸ RELAP5/MOD3 CODE MANUAL.// Code structure, System Models, and Solution Models Laboratories, Idaho National Engineering Laboratory Lockheed-Martin Idaho Technologies Company, 1995, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174 vol. 1 URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/008/27008531.pdf (дата обращения: 24.04.2023)

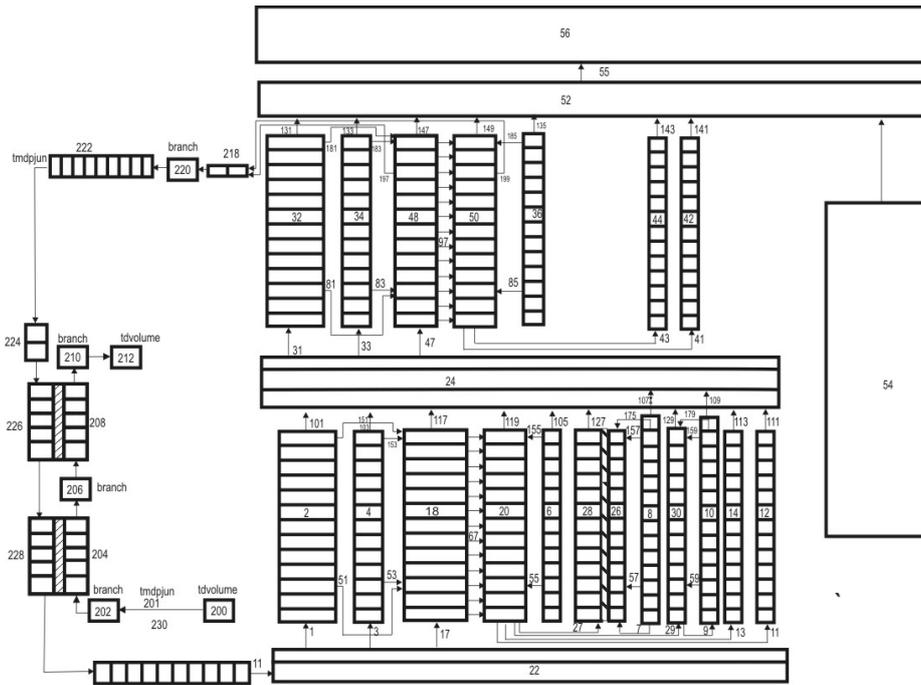


Рисунок 1. Нодализация схема двухъярусной модели БВ ОЯТ
 Figure 1. Nodalization scheme of a two-tier model of a spent nuclear fuel pool

Расчеты были выполнены для случая полной выгрузки ядерного топлива из активной зоны. При проведении расчетов были приняты следующие допущения: время проведения полной выгрузки 10 суток, начальный уровень воды в БВ 10,2 м, кроме кассет, выгруженных из активной зоны при полной выгрузке, в БВ находятся еще 372 кассеты, выгруженные в течение предыдущих четырех лет.

Остаточное энерговыделение рассчитывалось при полной выгрузке. Мощность остаточного энерговыделения кассет, выгруженных из активной зоны, составляет 3,54 МВт. Мощность остаточного энерговыделения кассет, выгруженных в течение предыдущих четырех лет, составляет 260 кВт. Кроме того, в данной работе не рассмотрен сценарий с потерей внешнего электропитания.

Принцип единичного (независимого) отказа не применяется при анализе действия оператора. Кроме начального события, могут быть еще несколько независимых отказов. Действия оперативного персонала смоделированы также, как действия оператора по включению 2НБО-2 для подпитки бассейна выдержки [5].

Описание и оценка результатов

Расчеты проводились до момента повреждения топлива в БВ. До начала моделирования аварии, с целью достижения начального состояния с распределением температуры воды в БВ 6000 с проводился расчет с работой насоса расхолаживания бассейна и теплообменника бассейна выдержки.

Сделана оценка выполнимости приемочных критериев. Максимальные значения переменных определяются путем анализа графиков, отображающих их изменения в течение процесса.

Для переменных полного локального окисления и общего количество водорода, выделяемого в результате химической реакции оболочки и воды/пара используются данные, содержащиеся в файле выходных данных, относящихся к конечному моменту расчета.

Для определения толщины локального окисления выбирается максимальное значение соответствующей переменной.

Анализ результата расчета потери теплоотвода из БВ без вмешательства оператора

Графические результаты расчета потери теплоотвода из БВ без вмешательства оператора представлены на рисунках 2а-2г. После потери теплоотвода из БВ начинается подъем температуры воды бассейна выдержки и на 9520 секунде начинается кипение (рис. 2б). Уровень воды в начале из-за теплового расширения немного возрастает, но, начиная с 12900 секунды влияние испарения начинает преобладать над эффектом теплового расширения и уровень БВ начинает снижаться (рис. 2е). На 124000 секунде уровень БВ снижается до головки кассет (рис. 2е) и, начиная примерно с 130000 секунды температура на выходе из верхнего яруса (рис. 2г), оболочки и топлива начинают возрастать.

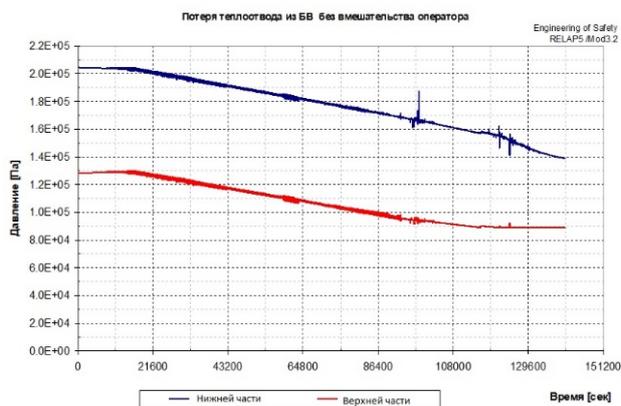


Рисунок 2а. Давление в бассейне выдержки
Figure 2a. Pressure in the spent fuel pool

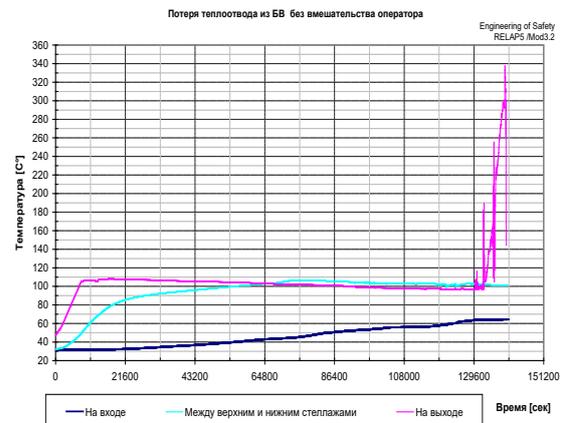


Рисунок 2б. Температура на входе, между стеллажами и на выходе из БВ
Figure 2b. Temperature at the inlet, between the racks and at the outlet of the coolant pool

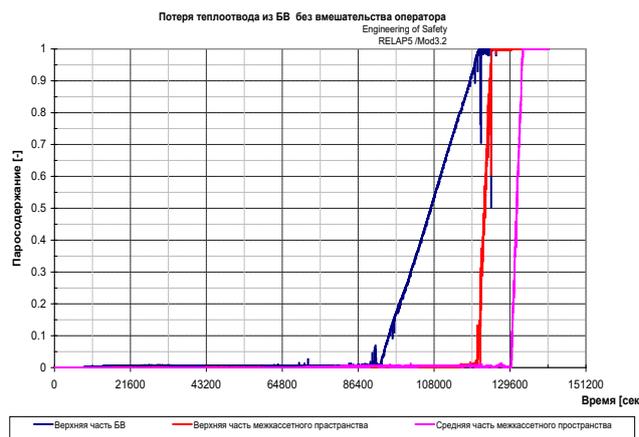


Рисунок 2в. Паросодержание в теплоносителе БВ
Figure 2в. Steam content in the spent fuel pool coolant

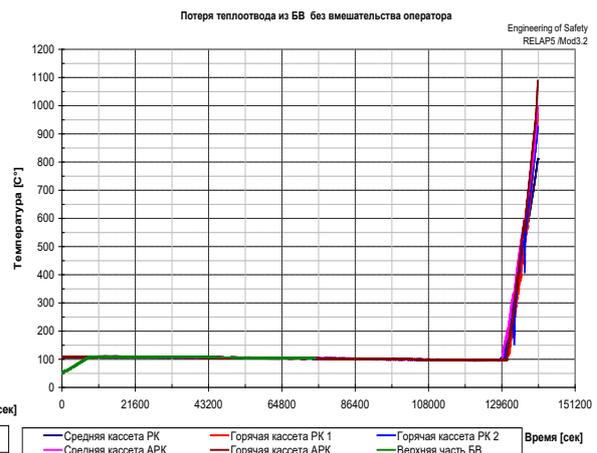


Рисунок 2г. Температура теплоносителя на выходе из БВ
Figure 2г. Coolant temperature at the outlet of the coolant pool

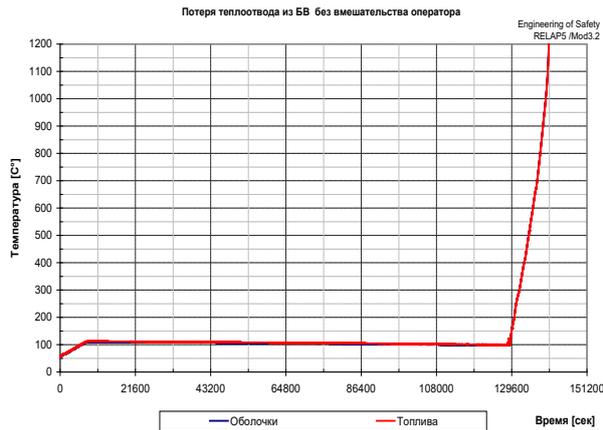


Рисунок 2д. Температура топлива и оболочки твэл
Figure 2d. Fuel and cladding temperature

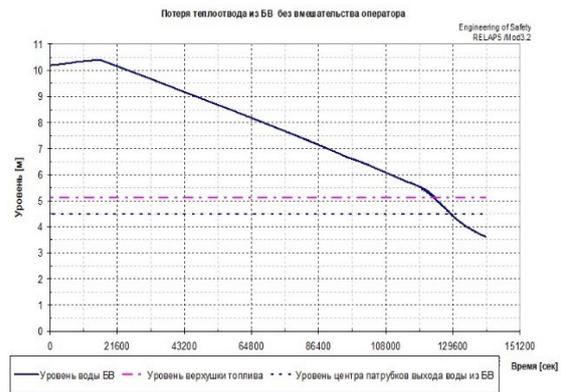


Рисунок 2е. Уровень воды в БВ
Figure 2e. Water level in the pool

Дополнительное увеличение температуры оболочки происходит из-за парциркуляционной реакции. Расчет проводился до достижения температуры оболочки 1200°C (на 140202,2 секунде), когда происходит повреждение топлива. Расписание событий при потере теплоотвода из БВ без вмешательства оператора приведено в таблице 1. Оценка соответствия рассчитанного режима приемочным критериям – МТО, ПЛО и H₂ – приведена в таблице 2.

Таблица 1. Расписание событий при потере теплоотвода из БВ без вмешательства оператора
Table 1. Schedule of events in case of loss of heat removal from the coolant pool without operator intervention

Время, сек	События
0,0	Потери теплоотвода из БВ
124000	Начало оголения топливной части кассеты
130000	Начало увеличения температуры топлива
140202,2	Минимальный уровень воды в БВ: 3,70 м
140202,2	Максимальная температура оболочки (МТО): T _{обол.} = 1200,0°C
140202,2	Максимальная температура топлива (МТТ): T _{топ.} = 1200,0°C
140202,2	Конец вычислений

Таблица 2. Хронология сценария потери теплоотвода из БВ без вмешательства оператора
Table 2. Chronology of the scenario of loss of heat removal from the coolant pool without operator intervention

Информация по сценарию	Результаты
Сценарий аварии	Разрыв линии расхолаживания БВ
Оцениваемые приемочные критерии безопасности (ПКБ)	МТО (максимальная температура оболочки) < 1200°C. ПЛО (полное локальное окисление) < 17% от начальной толщины оболочки. H ₂ (общее количество водорода) < 1% от гипотетического количества
Ключевые начальные условия	Физика бассейна выдержки: подкритичное состояние, максимально допустимые коэффициенты неравномерности энерговыделения, уровень в БВ 10,2 м, давление атмосферное, средняя температура бассейна выдержки определяется работой одного НРБ и ТОБВ с температурой охлаждающей воды 25°C
Вычислительные инструменты	RELAP5/MOD 3.2, двухъярусная модель с имитацией теплогидравлики бассейна выдержки и теплового поведения горячего топливного стержня
Время расчета	140202,2 сек
Результаты расчета параметров ПКБ	МТО 1200,0 °C; ПЛО – 66,7794 мкм; H ₂ – 2,4690 кг МТТ 1200,0°C
Состояние результатов расчета аварии по отношению к ПКБ	Оцененные значения ПЛО, H ₂ и МТТ для этой аварии, кроме МТО, не превысили допустимых значений. T _{пов.} =T _{МТО} = 140202,2 с ≈38,94 ч до превышения температуры оболочки допустимого значения - 1200°C
Оценка конструктивных характеристик станции	Надежность охлаждения бассейна выдержки

Анализ результата расчета потери теплоотвода из БВ с организацией последующей подпитки БВ насосом борной очистки

Результаты расчета потери теплоотвода из БВ с организацией последующей подпитки БВ насосом НБО представлены на рисунках 3а-3ж. До 137007,7 секунды авария развивается идентично первой аварии. На 137007,7 секунды при снижении уровня БВ до 3,8м оператор включает 2НБО-2 (рис. 3ж). После чего начинается подъем уровня БВ (рис. 3е) а, начиная с 137100.0 секунды начинается снижение температуры воды бассейна выдержки (рис. 3г) и топлива (рис. 3д). По мере возрастания уровня БВ расход 2НБО-2 (рис. 3ж) немного уменьшается, для расхолаживания БВ и в конце расчетного периода температура воды бассейна выдержки наверху стабилизируется на уровне 90°C, при этом температура топлива стабилизируется на уровне 96°C, а уровень воды БВ (рис. 3е) на уровне 10,9м.

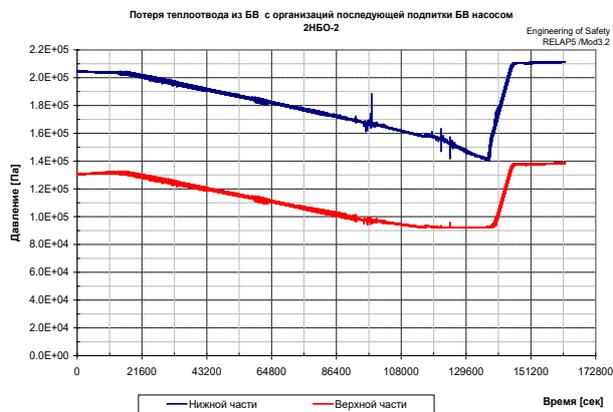


Рисунок 3а. Давление в бассейне выдержки
Figure 3a. Pressure in the spent fuel pool

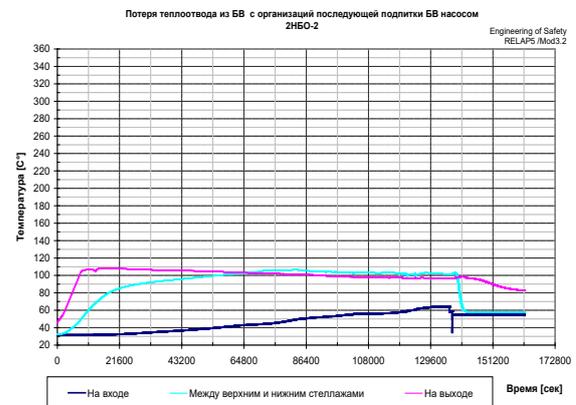


Рисунок 3б. Температура на входе, между стеллажами и выходе из БВ
Figure 3b. Temperature at the inlet, between the racks and the outlet from the coolant pool

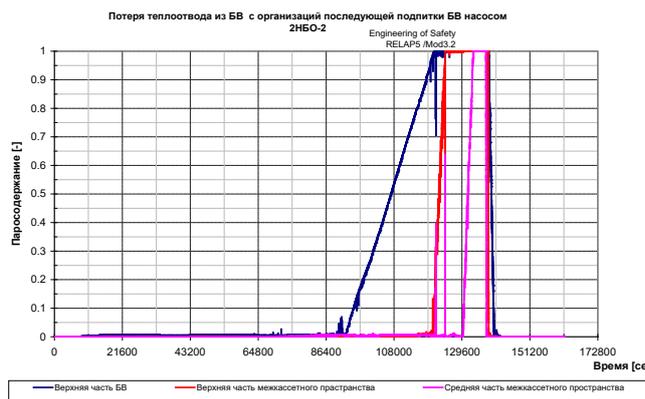


Рисунок 3в. Паросодержание в теплоносителе БВ
Figure 3в. Steam content in the cooling pool coolant

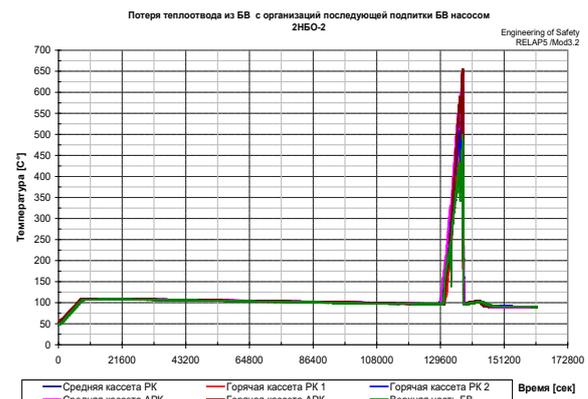


Рисунок 3г. Температура теплоносителя на выходе из БВ
Figure 3г. Coolant temperature at the outlet of the spent fuel pool

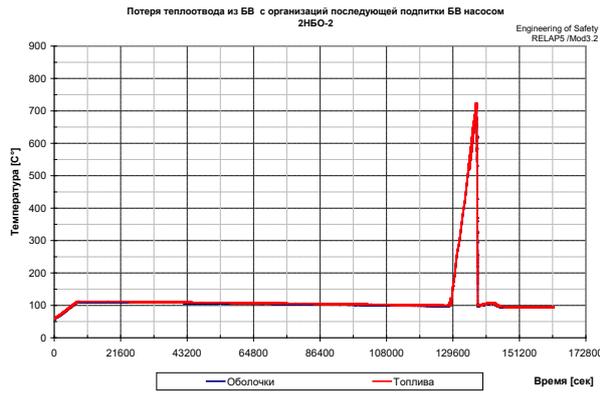


Рисунок 3д. Температура топлива и оболочки твэл
Figure 3д. Fuel and cladding temperature

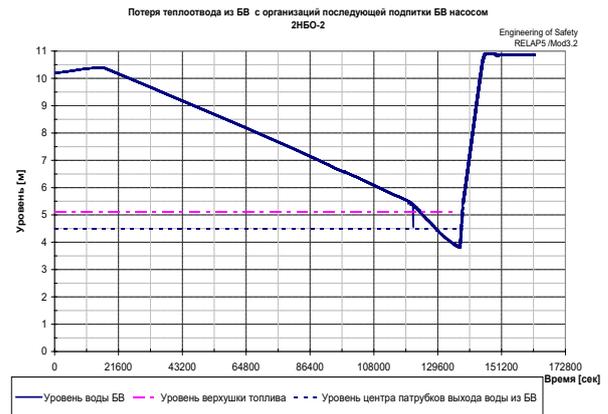


Рисунок 3е. Уровень воды в БВ
Figure 3е. Water level in the pool

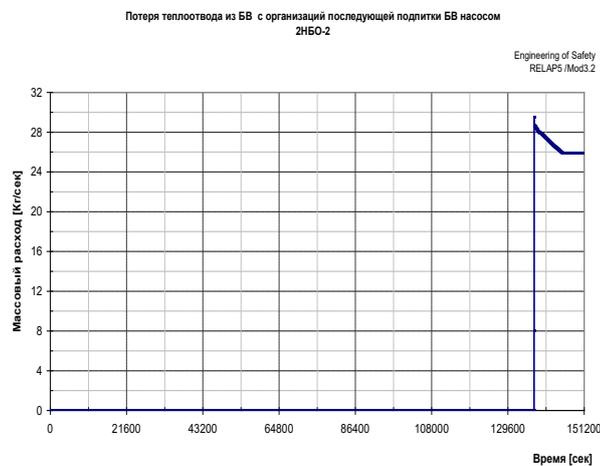


Рисунок 3ж. Расход 2НБО-2
Figure 3ж. Consumption of 2NBO-2

Документирование протекающих событий приведено в таблице 3.

Таблица 3. Расписание событий при потере теплоотвода из БВ с организацией последующей подпитки БВ насосом 2НБО-2

Table 3. Schedule of events in case of loss of heat removal from the spent fuel pool from the organizations of the subsequent make-up of the spent fuel pool by the pump 2NBO-2

Время, сек	События
0,0	Потеря теплоотвода из БВ
124000	Начало оголения топливной части кассеты
130000	Начало увеличения температуры топлива
137007,7	Включение 2НБО-2 оператором
137012,0	Минимальный уровень воды в БВ: 3,799 м
137100,0	Максимальная температура оболочки (МТО): $T_{обол.} = 720,6^{\circ}\text{C}$
137104,4	Максимальная температура топлива (МТТ): $T_{топ.} = 722,6^{\circ}\text{C}$
162000,0	Конец вычислений

Оценка соответствия рассчитанного режима приемочным критериям – МТО, ПЛО и H_2 – приведена в таблице 4.

Таблица 4. Хронология сценария потери теплоотвода из БВ с организацией последующей подпитки БВ насосом 2НБО-2

Table 4. Chronology of the scenario of loss of heat removal from the spent fuel pool from the organizations of the subsequent make-up of the spent fuel pool by the pump 2NBO-2

Информация по сценарию:	Результаты:
Сценарий аварии	Разрыв линии расхолаживания БВ
Оцениваемые приемочные критерии безопасности (ПКБ)	МТО (максимальная температура оболочки) < 1200°C. ПЛО (полное локальное окисление) <17% от начальной толщины оболочки. H ₂ (общее количество водорода) <1% от гипотетического количества
Ключевые начальные условия	Физика бассейна выдержки: подкритичное состояние, максимально допустимые коэффициенты неравномерности энерговыделения, уровень в БВ 10,2м, давление атмосферное, средняя температура бассейна выдержки определяется работой одного НРБ и ТОБВ с температурой охлаждающей воды 25°C.
Вычислительные инструменты	RELAP5/MOD 3.2, двухъярусная модель с имитацией теплогидравлики бассейна выдержки и теплового поведения горячего топливного стержня
Время расчета	162000,0 с
Результаты расчета параметров ПКБ	МТО 720,6°C; ПЛО – 4,57586 мкм; H ₂ – 0,22377 кг МТТ 722,6°C.
Состояние результатов расчета аварии по отношению к ПКБ	Оцененные значения ПЛО, H ₂ и МТТ для этой аварии не превысили допустимых значений.
Оценка конструктивных характеристик станции	Надежность охлаждения бассейна выдержки

Заключение

Расчеты выполнены при помощи разработанной реалистической модели бассейна выдержки ОЯТ реактора ВВЭР-440/В270 второго энергоблока Армянской АЭС с помощью компьютерного кода RELAP5/Mod3.2.

В модели двухъярусного БВ учитывается расположение топливных элементов в нижнем стеллаже, где они выдерживаются в течение от одного до четырех лет, с учетом плановых перегрузок. А Верхний стеллаж БВ полностью занят ТВС аварийно-выгруженной активной зоны.

Разработанная модель применялась для исследования сценариев аварий в бассейне выдержки при потере теплоносителя и исходных событиях потери охлаждения.

Сравнение расчетных параметров с приемочными критериями для рассмотренной аварии приведено в таблице 5.

Таблица 5. Сравнение вариантов расчетных параметров с приемочными критериями

Table 5. Comparison of variants of design parameters with acceptance criteria

ПАРАМЕТР	МТО	T _{пов.}	ПЛО	H ₂	МТТ
Единица измерения	°C	с	мкм	кг	°C
Приемочные критерии	<1200	-	<87	<5,1	<2570 (ЕОС); <2840 (ВОС)
Начальное событие	Результаты расчета				
Потеря теплоотвода из БВ без вмешательства оператора	1200,0	140202,2	66,78	2,469	1200,0
Потеря теплоотвода из БВ с последующей организацией подпитки от насоса 2 НБО-2	720,6	-	4,58	0,224	722,6

Из анализа таблицы видно, что приемочные критерии по температуре оболочки нарушаются при исходном событии без вмешательства оператора. При организации подпитки уровень БВ увеличивается и быстро перекрывает топливную часть кассет, тем самым предотвращая повреждение топлива. При проведении расчета выбран насос 2НБО-2 имеющий меньший расход, чем 2НЗБ или 2НБО-1, следовательно, нет необходимости проведения расчета сценариев с включением 2НЗБ и 2НБО-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Carlos S., Sanchez-Saez F., Martorell S. Use of TRACE best estimate code to analyze spent fuel storage pools safety. *Progress in Nuclear Energy*. 2014;77:224–238. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.07.008>
2. Акобян М.Т., Ксенофонтов А.И. Пути энергообеспечения в Республике Армении. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(2):5–14. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-01>
3. Fullmer W.D., Kumar V., Brooks C.S. Validation of RELAP5/MOD3.3 for subcooled boiling, flashing and condensation in a vertical annulus. *Progress in Nuclear Energy*. 2016;93:205–217. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.013>
4. Omidifard P., Pirouzmand A., Hadad K., Sahin S. Analysis of loss of cooling and loss of coolant severe accident scenarios in VVER-1000/V446 spent fuel pool. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;138:107205. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107205>
5. Mousavian S.K., Shirani A.S., D'Auria F. Analysis of loss of cooling accident in VVER-1000/V446 spent fuel pool using RELAP5 and MELCOR codes. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023;(55)8:3102–3113. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.12.031>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Акобян М.Т. – выявление и исследование факторов, требующих дополнительных исследований и принятия компенсирующих мер для решения проблем, написание текста статьи;

Ксенофонтов А.И. – концепция и качественная разработка исследования;

Саргсян С.А. – изучение тематического материала, систематизация информации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Марине Тадевосовна Акобян, аспирант, кафедра радиационной физики и безопасности атомных технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация; ведущий инженер, Армянская АЭС, г. Мецамор, Республика Армения.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8710-5734>

e-mail: marine_h@mail.ru

Александр Иванович Ксенофонтов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник (доцент) кафедры радиационной физики и безопасности атомных технологий, «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6864-9805>

e-mail: aiksenofontov@mephi.ru

Сос Аршакович Саргсян, начальник отдела ядерной безопасности и надежности, Армянская АЭС, г. Мецамор, Республика Армения.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7998-124X>

e-mail: sossarghsyan@yahoo.com

Поступила в редакцию 27.06.2023

После доработки 21.08.2023

Принята к публикации 29.08.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Hakobyan M.H. – identification and researching factors requiring further research and the implementation of compensatory measures to address is-sues writing the text of the article;

Ksenofontov A.I. – conceptualization and qualitative research design;

Sargsyan S.A. – study of thematic material, systematization of information, results analysis.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Marine T. Hakobyan, postgraduate student, Department of Radiation Physics and Nuclear Technology Safety, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; leading engineer, Armenian NPP, Metsamor, Republic of Armenia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8710-5734>

e-mail: marine_h@mail.ru

Alexandre I. Ksenofontov, Cand. Sci. (Phys. and Math), Senior Research Assistant (Associate Professor), Department of Radiation Physics and Nuclear Technology Safety, National Research Nuclear University «MEPhI», Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6864-9805>

e-mail: aiksenofontov@mephi.ru

Sos A. Sargsyan, Chief of Nuclear Safety and Reliability Department, Armenian NPP, Metsamor, Republic of Armenia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7998-124X>

e-mail: sossarghsyan@yahoo.com

Received 27.06.2023

Revision 21.08.2023

Accepted 29.08.2023

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.311: 621.039.58
DOI 10.26583/gns-2023-03-02
EDN EOODDO



Перспективы применения систем накопления энергии в системах
электрообеспечения собственных нужд АЭС

В.В. Карчин¹ , Е.В. Мельдин²  , А.Н. Питев² 

¹ Чебоксарский институт (филиал) московского политехнического университета, г. Чебоксары,
Чувашская Республика, Россия

² Калининская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом»,
г. Удомля, Тверская обл., Россия
 evg-meldin@ya.ru

Аннотация. В настоящее время реализуется энергетическая стратегия, одной из черт которой является развитие атомной энергетики и увеличение доли энергоблоков атомных станций в составе генерирующих объектов энергосистемы страны. В связи со сложностью борьбы с последствиями аварий, безопасности эксплуатации атомных станций уделяется значительное внимание. Для поддержания работы систем безопасности в условиях потери внешнего энергообеспечения используются автономные источники питания – дизель-генераторные установки, однако их использование сопряжено с рядом трудностей эксплуатации и обслуживания, а развивающиеся в настоящее время технологии позволяют реализовывать новые процессы преобразования энергии. В статье выполнено сравнение современных систем накопления и преобразования энергии, основанных на различных физических принципах, а также выполнен анализ ключевых преимуществ и недостатков, присущих каждой технологии. Описаны эксплуатационные преимущества современных электрохимических систем накопления и их влияние на безопасность и оптимизацию циклов технического обслуживания и повышения степени интегрируемости в цифровые системы контроля и управления, а также повышение экономической эффективности генерации электроэнергии и маневренность при эксплуатации атомных энергоблоков. Сделаны выводы о возможности перспективного использования систем накопления электрической энергии в качестве экономически эффективной альтернативы существующим автономным источникам с учетом диверсификации и развития производств, а также их замыкания внутри предприятий государственной корпорации «Росатом».

Ключевые слова: надежность электрообеспечения, блэкаут, автономная система электрообеспечения, системы накопления энергии, статком, инверторы напряжения, безопасность АЭС, система плавного пуска, сглаживание пиков, оптимизация ТО.

Для цитирования: Карчин В.В., Мельдин Е.В., Питев А.Н. Перспективы применения систем накопления энергии в системах электрообеспечения собственных нужд АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):17–25. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-02>

Prospects for the application of battery energy storage systems in NPP auxiliary power
supply systems

Viktor V. Karchin¹ , Ievheniy V. Meldin²  , Alexei N. Pitev² 

¹ Cheboksary Institute, Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Chuvashia region, Russia

² Kalinin Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Udomlya, Tver region, Russia
 karchinvv@gmail.com

Abstract. One of the characteristics of energy strategy, which currently implementing is atomic energy elaboration and NPP development with rising part of atomic generation in national energy system. Of course one of the most important property of atomic generation is safety (Chernobyl, Three Mile Island, Fukushima Daiichi accidents). To maintain the operation of security systems in conditions of loss of external power supply, autonomous power sources - diesel-generator sets are used, but their use is associated with a number of difficulties of operation and maintenance, and currently developing technologies allow to realize new processes

of energy transformation. And on the other hand modern technologies are providing access to new energy saving technologies. In this article we will try to compare energy storage systems, which use different physical principles and try to review their advantages and particularities. Also we especially explore operational advantages of battery energy storage systems and their influence on atomic safety and maintenance cycles and also integrating to digital control system and more effective generation and flexibility during NPP operation with conclusion about new business for «Rosatom» company.

Keywords: power system reliability, blackout, independent power system, energy storage systems, STATCOM, multilevel voltage invertors, NPP safety, variable frequency drive, peaks smoothing, maintenance optimization.

For citation: Karchin V.V., Meldin I.V., Pitev A.N. Prospects for the application of battery energy storage systems in NPP auxiliary power supply systems. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):17–25 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-02>

Введение

В настоящее время перспективным источником генерации электрической энергии для обеспечения жизнедеятельности населения и развития народного хозяйства являются атомные электростанции, позволяющие вырабатывать значительное количество электрической энергии и мощности при незначительном нарушении баланса окружающей среды. Однако незначительный урон окружающей среде в процессе безопасной генерации оборачивается возможностями значительного (если не сказать катастрофического) нарушения экологической безопасности при нарушении технологического процесса генерации. Отклонение в технологическом процессе, представляющее угрозу безопасности АЭС, вызывает срабатывание элементов систем безопасности, как, например, работа быстродействующих редуцирующих устройств, система аварийного впрыска бора и др. Хотя в системах безопасности атомных станций предусмотрены пассивные (не требующие вмешательства человека в исполнение защитных функций) элементы защиты (например, система управления и защиты реактора), но для комплексного выполнения функций (контроль технологических параметров, управление аварией и др.) необходимо наличие источников, обеспечивающих наличие электрической энергии при отсутствии электрической связи с энергосистемой. В настоящее время для автономной работы систем безопасности используются дизель-генераторные установки (ДГУ).

Современное состояние вопроса

В настоящее время основным источником питания оборудования систем безопасности АЭС (в отечественной атомной промышленности) являются ДГУ – технические решения проектирования типовых (наиболее часто встречающихся в отечественной энергетике) атомных энергоблоков I поколения берут свое начало в работах ОКБ «Гидропресс» 1970-1980 гг. и учитывали реалии и передовые возможности того времени [1]. Их запуск и включение на нагрузку систем безопасности происходит по алгоритму ступенчатого пуска, основная суть которого в следующем:

- а) при потере напряжения собственных нужд происходит выделение канала системы аварийного электроснабжения на автономную работу;
- б) происходит запуск дизель-генератора и выход на номинальные параметры работы (~10-15 с.);
- в) взятие и несение нагрузки I ступени (особо ответственных потребителей первого контура и реакторного отделения);
- г) взятие и несение нагрузки II ступени (ответственных потребителей второго контура и систем обеспечения);
- д) взятие и несение нагрузки III ступени (ответственные потребители собственных нужд).

В настоящий момент после потери электроснабжения собственных нужд перерыв питания потребителей может достигать нескольких минут (в случае неуспешного первого запуска ДГУ), что является значительным промедлением при нарушениях технологических параметров первого контура. Использование автономных систем на основе преобразования энергии дизельного топлива в электрическую обладает как рядом преимуществ, так и недостатками (табл. 1).

Таблица 1. Преимущества и недостатки использования автономных систем на основе преобразования энергии дизельного топлива в электрическую

Table 1. Advantages and disadvantages of using autonomous systems based on diesel-to-electric energy conversion

№	Преимущества	Недостатки
1	– полная автономность работы дизельного генератора (для работы необходимы только рабочие среды, при возможности подвоза топлива и отсутствии аварийных ситуаций в системе водяного охлаждения, а также сети собственных нужд предел работы практически неограничен)	– усложнение генераторной системы из-за наличия множественных системных связей в установке (подача топлива для работы двигателя, воздуха для поддержания процесса горения топлива, подача тех. воды для обеспечения корректного теплового режима работы установки, электрической энергии от постороннего источника/подсистемы для поддержания работоспособности системы управления и возбуждения генератора) и трудоемкость обслуживания и поддержания установки в режиме готовности
2	– высокая перегрузочная способность ДГУ, связанная с электромеханическим устройством генератора	– как следствие – снижение надежности системы (часты явления отказов запуска ДГУ из-за отсутствия или неприемлемых значений параметров одной из необходимых рабочих сред)
3	– надежность электрической части генераторной установки	– низкий КПД дизельных двигателей (50-70%)
4	-	– наличие значительных последствий при возникновении пожара в системе ДГУ, а, следовательно, необходимость усиленного контроля и управления рисками при эксплуатации дизельных систем
5	-	– экологические последствия от сжигания значительного количества дизельного топлива

Подробный анализ систем ДГУ проведен в работе М. Джанг и др. «Моделирование и анализ надежности на этапе проектирования дизельного двигателя на основе технологии интеграции 4F» [2], результаты которой выделяют более чем один режим отказа в каждой механической подсистеме ДГУ. В исследовании «Анализ режимов, последствий и критичности отказов (FMECA) механических подсистем дизель-генератора на АЭС» [3] авторы описывают примеры и последствия отказов ДГУ САЭ.

Перспективные решения для обеспечения надежного электроснабжения

В настоящее время получают все большее применение и развитие системы накопления энергии (СНЭ), основанные на преобразовании в электрическую энергию энергий различного типа: а) энергии сжатого воздуха (Compressed Air Energy System); б) энергии жидкого воздуха (Liquid Air Energy System); в) химической энергии, запасенной в аккумуляторах или энергию электрического поля, запасаемую в т.н. суперконденсаторах (ионисторах). А также ее хранение и высвобождение (обратное преобразование) в необходимые моменты.

Основными компонентами пневмокомпрессионных систем являются механизмы накопления воздуха – как правило это насосы, закачивающие воздух, а также

резервуары, в которых выполняется его сжатие и хранение, а затем (в необходимые моменты времени) выпуск воздуха и приведение в движение турбины, воздействующей на генератор и получение электрической энергии [4,5]. Аналогичная система (т.н. система пускового воздуха) используются для запуска и прохождения пускового режима дизель-генераторной установки.

Криогенные системы, работающие на сжиженном воздухе, используют также сосуды для запасаания воздуха, но он не закачивается в сосуды под давлением, а сжижается путем охлаждения и хранится при низкой температуре в жидком виде. А при необходимости выдачи энергии – воздух перестает охлаждаться и подогревается, этот процесс сопровождается значительным увеличением объема газа и совершением полезной работы при воздействии на лопатки турбины [6].

Основными компонентами электрохимических и систем накопления энергии в электрическом поле являются преобразовательные системы (выпрямительные и инверторные установки, а также совмещенные выпрямительно-инверторные, двунаправленные преобразователи) и батареи запасаания энергии (батареи ионисторов или аккумуляторов). В зависимости от параметров системы выбираются необходимые технологии и топологии преобразовательных установок с использованием современных электронных устройств – запираемых тиристоров (IGCT) или транзисторов различных технологий, а также химические соединения, лежащие в основе источников энергии [7]. Наиболее технологичным современным решением являются системы хранения и накопления энергии на литий-ионных элементах аккумуляторных батарей (ЛИАБ) с использованием Литий-Железо-Фосфорных элементов. В настоящее время в системы среднего напряжения внедряется значительное количество систем накопления большой емкости, позволяющих изменять конфигурацию энергосистемы в различных режимах и эффективно управлять элементами и связями сети. Пилотные проекты использования СНЭ на объектах отечественной электроэнергетики также реализованы в филиалах и ДЗО ПАО «Россети» и показали свою экономическую эффективность, а также надежность эксплуатации, что позволяет приступить к рассмотрению систем накопления энергии как альтернативы дизель-генераторным системам [8,9].

В связи с используемым уровнем напряжения оборудования систем безопасности, а также учитывая значительное количество энергии, необходимой к запасаанию, источник автономной работы в составе САЭ должен проектироваться со значением выходного напряжения среднего класса (в настоящее время значение напряжения в сетях собственных нужд АЭС с типами реакторов ВВЭР-1000/1200 составляет 10 кВ, это обуславливает необходимость приведения входного/выходного напряжения накопителя к данному значению). Для реализации этого требования существуют различные способы построения преобразовательной техники: например, типовым проектным решением для СНЭ среднего напряжения является организация СНЭ уровня 0,4 кВ с использованием согласующего силового трансформатора необходимой мощности с напряжениями обмоток 10 и 0,4 кВ; также стоит отметить возможность использования бестрансформаторных преобразователей различных топологий (преимущественно – топологии многоуровневых инверторов напряжения) [10,11].

Важно учесть также, что возможно проектирование системы из распределенных блоков ограниченной мощности, что позволит выполнить систему модульного типа с резервированием любого заданного наперед проектом типа («2n», «n+2» и др.), что повышает надежность системы (отказ одного блока позволит ввести в работу резервные преобразовательные блоки, а отказ резервных – позволит работать системе без отключения, снизив лишь перегрузочную способность к несению нагрузки. В то же время блочное исполнение позволяет сократить время восстановления работоспособности системы (замена неисправного блока, идентификация системой контроля и управления установленного преобразовательного блока и автоматический ввод блока в синхронную работу).

Эксплуатационные особенности предлагаемых электрохимических систем

В настоящее время освоены типовые решения преобразовательных установок с возможностью выдачи мощности до 10 МВт с использованием безжидкостных систем охлаждения, что позволяет говорить о повышении надежности работы преобразовательного оборудования с учетом требований к тепловому режиму силовых ключей в связи с современными применяемыми решениями в области вращающихся механизмов теплоотводящих систем (магнитные и газоздушные подшипники, частотное регулирование и контроль ресурса и пр.). Также стоит учитывать следующие недостатки типовых решений с согласующим трансформатором:

– высокие токовые нагрузки преобразователя на стороне 0,4 кВ и, как следствие, тяжесть последствий при нарушениях его работы (потеря контроля проводимости ключа или одного из ключей в плече, высокие токи КЗ, необходимость конструирования специальных кабельных связей между элементами и электромагнитная совместимость оборудования преобразователя);

– низкое напряжение накопительного модуля (батареи аккумуляторов, ионисторов) неизбежно приводит к росту габаритов помещений накопителей. Решением в таком случае является организация стоек\сборок запасующих элементов с напряжением, близким к номинальному входному напряжению инверторного преобразователя. Но напряжение стойки ограничено входным напряжением (при одинаковой энергоемкости потребуются большее количество элементов).

Именно в связи с топологией преобразовательного решения значительным эксплуатационным параметром, влияющим на СНЭ является напряжение накопительного модуля (стойки, кассеты элементов). С одной стороны, низкое напряжение модуля позволит улучшить его эксплуатационные свойства (выравнивание параметров заряда батарей и контроль разрядных характеристик элементов модуля позволят системам контроля и управления анализировать работу модулей, а использование предиктивной аналитики в информационных системах поддержки и принятия решений – цифровых двойниках АЭС позволит рассмотреть возможность к переходу на техническое обслуживание системы по состоянию, оптимизировать выполнение работ и повысить надежность работы оборудования и готовность к несению нагрузки). С другой стороны, увеличение напряжения стойки осложняет процесс контроля и управления ее ресурсными характеристиками (накопленным количеством энергии, напряжением заряда и разряда и др.). В связи с этим в настоящий момент актуальной темой является изучение и проектирование новых накопительных элементов, совмещающих в себе достоинства накопительных элементов различных типов.

В настоящее время трансформаторные решения способны обеспечивать работу СНЭ с номинальной выходной мощностью 5 МВт (без учета масштабирования систем).

К преимуществам эксплуатации систем накопления энергии можно отнести следующие их свойства:

1) отсутствие сложных связей в системе (отсутствие систем и трубопроводов подачи масла, воды, топлива, воздуха), что повышает надежность систем и простоту эксплуатации и обслуживания. В настоящее время преобразовательные системы до 5 МВт способны поддерживать температурный режим благодаря системам воздушного охлаждения. Ресурс подшипников вращающихся элементов систем составляет от 1000 до 2000 часов, однако применяемые в настоящее время воздушные или магнитные подшипники позволяют значительно увеличить этот ресурс;

2) возможность безостановочного подхвата нагрузки системы безопасности без необходимости выделения пускового режима позволяет повысить надежность электроснабжения;

3) возможность автоматической синхронизации автономного источника с напряжением сети делает возможным мгновенное включение источника питания без ударных нагрузок на силовое электрооборудование.

Стоит также отметить существенную особенность литий-ионных накопительных элементов, способную повлиять на оптимизацию технологического процесса АЭС – снижение деградационных характеристик аккумуляторов при выполнении периодических тренировочных циклов (разрядов до 30-50% емкости) [12-14].

В случае использования этой особенности повышается маневренность СНЭ и достигаются лучшие экономические и технологические показатели, а именно:

1. Выделение СНЭ канала СБ для работы в режиме УПП/ПЧ. Применяемые в настоящее время главные циркуляционные насосные агрегаты обладают значительным моментом инерции, что приводит к трудному (а иногда и ударному) режиму пуска электродвигателей ГЦН с просадками напряжения собственных нужд, а также отсутствию контроля параметров пускового режима электродвигателя. Рациональным решением в таком случае является организация пуска ГЦН путем выделения СНЭ одного из каналов на работу в режиме устройства плавного пуска ГЦН. Топология преобразователей без согласующего трансформатора в настоящее время позволяет выполнять такие задачи (а именно, реализация в системе управления преобразователя алгоритмов ШИМ и цифровой обработки сигналов), а современные технические решения устройств автоматики (органы контроля и улавливания синхронизма, системы телемеханики и контроллеры присоединений) позволяют выполнять безударный перевод электродвигателя на основную сеть после выхода на номинальные параметры. Попутно решаются задачи осциллографирования параметров пускового режима, улучшается контроль над ресурсными характеристиками оборудования. [15]

2. Работа СНЭ в режиме статического компенсатора с высоким быстродействием (СТАТКОМ). Поддержание параметров энергосистемы, а также обеспечение устойчивости при переходных режимах требует использование быстродействующей автоматики (УПАЭ, АПНУ, ЦСПА) для предотвращения аварийных режимов. Важным условием синхронизма системы является сохранение угла вдоль линии электропередачи. При отключении линии устройствами РЗА и ПА возможно резкое снижение потребляемой мощности нагрузки. В таком случае СНЭ включается в режиме заряда и принимает (а при необходимости – рассеивает) излишнюю мощность для сохранения устойчивости энергосистемы. [16,17]

3. Сглаживание суточных колебаний режима генерации. В настоящее время энергоблоки активно участвуют в регулировании параметров режима работы энергосистемы (выдача мощности, контроль перетоков в сечениях, регулирование баланса мощностей и пр.). В связи с этим при суточных колебаниях потребляемой мощности происходит регулирование выдачи мощности непосредственно воздействием на основное технологическое оборудование – турбоагрегат и реакторную установку. При использовании СНЭ возможна оптимизация, изменение методов регулирования: при снижении необходимого уровня генерации (диспетчерских ограничениях) возможен ввод в работу СНЭ в режиме заряда (запасания энергии) и отбор мощности энергоблока без необходимости снижения генерации активной мощности (как это реализуется в настоящее время), а при повышении потребления в пиковые моменты – включение СНЭ в режиме выдачи запасенной энергии в энергосистему. В таком случае решаются несколько задач:

а) выполнение контрольных циклов заряда-разряда для мониторинга состояния батареи;

б) поддержание режима энергосистемы [18,19];

в) повышение экономической эффективности генерации электрической энергии энергоблоками АЭС.

Стоит заметить, что наличие в настоящее время в контуре ГК «Росатом» предприятий, способных принимать участие на каждом этапе жизненного цикла систем накопления (исследование и анализ свойств применяемых материалов, полный производственный цикл, эксплуатация, сервис, утилизация), позволит замкнуть внутри корпорации и упростить процессы контроля качества изготовления, проектирования, анализа работы систем и механизмы получения обратной связи между предприятиями отрасли, что позволит развивать и оттачивать технологические решения с учетом опыта эксплуатации, а также прогнозировать производство на длительные сроки.

Заключение

Электрохимические системы накопления электрической энергии в качестве перспективного автономного источника для собственных нужд систем безопасности АЭС можно охарактеризовать как высокоманевренные, масштабируемые системы с высокой степенью резервирования, а также с возможностями мониторинга и управления ресурсными характеристиками. Систематизированный анализ систем накопления энергии представлен в таблице 2.

Таблица 2. Результаты анализа систем накопления энергии

Table 2. Results of the analysis of energy storage systems

Технология системы	КПД накопителя	Преимущества метода	Недостатки метода	Ссылки на источники
Криогенная (Liquid Air Energy Storage)	45-60	<ul style="list-style-type: none"> – возможность запасания значительного количества энергии; – возможность легкого интегрирования в системы различных конфигураций. 	<ul style="list-style-type: none"> – значительное количество рабочих сред; – сложность и опасность эксплуатации на АЭС; – высокая степень инерционности. 	[20] [21] [22]
Пнеumoкомпрессионная (Compressed Air Energy Storage)	35-70	<ul style="list-style-type: none"> – небольшое количество необходимых рабочих сред; – взрывобезопасность. 	<ul style="list-style-type: none"> – необходимость контроля параметров процесса; – низкая надежность эксплуатации. 	[5] [23] [24]
Электрохимическая (Battery energy storage)	80-95	<ul style="list-style-type: none"> – малое количество необходимых рабочих сред; – высокое быстродействие; – возможность интегрирования в процессы цифровизации. 	<ul style="list-style-type: none"> – рост требований к квалификации персонала. 	[19] [16] [12]

В настоящее время происходит цифровизация технологических процессов, процедур, оцифровывание методов взаимодействия оборудования. Наличие же систем удаленного мониторинга и самодиагностики электрооборудования, развитие концепции цифровых подстанций и предиктивная аналитика (цифровые двойники) оборудования АЭС, позволят интегрировать данные в автоматизированную систему поддержки и принятия решений, а в будущем – вывести эксплуатацию оборудования систем безопасности АЭС на новый уровень, улучшая также экологические процессы влияния деятельности АЭС на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. Москва: Логос, 2010. 604 с. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko_aes-s-reaktorom-vver-1000_2010/go,0/
2. Zhang M., Liu S., Hou X., Dong H., Cui C., Li Y. Reliability modeling and analysis of a diesel engine design phase based on 4F integration technology. *Applied Sciences*. 2022;(12)13:6513. <https://doi.org/10.3390/app12136513>
3. Kim T., Singh B., Sung T., Park J., Lee Y. Failure mode, effect and criticality analysis (FMECA) on mechanical subsystems of diesel generator at NPP. Korea Atomic Energy Research Institute, Daeduk. June, 1996. 31 p. URL: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28018603 (accessed: 04.04.2023).
4. Succar S.S., Williams R.H., Cavallo A., Christopher C.K., Nrel P.D. et al. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power. *Princeton environmental institute report*. 2008;8:81. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Compressed-Air-Energy-Storage-%3A-Theory-%2C-Resources-Succar-Williams/07b1c66eba1504846d7b49bc4fffc5725a17e57e>
5. Wang J., Lu K., Ma L., Wang J., Dooner M. et al. Overview of compressed air energy storage and technology development. *Energies* 2017;10:991. <https://doi.org/10.3390/en10070991>
6. Визгалов С.В., Шарапов И.И., Хисамеев И.Г. Системы хранения энергии на основе криогенных технологий сжижения воздуха. *Вестник Международной академии холода*. 2022;2:21–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-21-26
7. Lach J, Wróbel K, Wróbel J, Czerwiński A. Applications of carbon in rechargeable electrochemical power sources: a review. *Energies*. 2021;(14)9:2649. <https://doi.org/10.3390/en14092649>
8. Бушуев В.В., Новиков Н.Л. Инфраструктурные накопители в энергетике. *Энергетическая политика*. 2020;10:74–89. URL: <https://energypolicy.ru/v-bushuev-n-novikov-infrastrukturnye-nakopiteli-v-energetike/energetika/2020/14/20/> (дата обращения: 04.04.2023).
9. Stecca M., Elizondo L.R., Soeiro T.B., Bauer P., Palensky P. A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2020;1:46–65. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2020.2981832>
10. Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение. *Вестник Казанского технологического университета*. 2016;(19)22:134–138. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogourovnevye-invertory-napryazheniya-obzor-topologiy-i-primenenie> (дата обращения: 04.04.2023).
11. Мальнев А.И., Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015;(7)326:15–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-mnogourovnevyyh-invertorov-toka-vetroenergeticheskikh-stantsiy> (дата обращения: 04.04.2023).
12. Бушкова О.В., Ярославцева Т.В., Добровольский Ю.А. Новые соли лития в электролитах для литий-ионных аккумуляторов (обзор). *Электрохимия*. 2017;(53)7:763–787. <https://doi.org/10.7868/S0424857017070015>
13. Podder S., Khan M.Z.R. Comparison of lead acid and Li-ion battery in solar home system of Bangladesh. *IEEE 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*. Dhaka, Bangladesh, 2016. P. 434–438. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2016.7760041>
14. Si J., Tang Y., Li X., Zhang L. Comprehensive reliability assessment method for lithium battery energy storage systems. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 2474, The 2nd International Conference on New Energy and Power Engineering 2022*. Qingdao, China. IOP Publishing. 2023;(2474)1:012009. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2474/1/012009>
15. Barie E.Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
16. Рашитов П.А., Серегин Д.А., Аникин М.Д., Вершанский Е.А. Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации. *Вестник МЭИ*. 2021;3:58–66. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
17. He B., Ren Y., Xue Y., Fang Ch., Hu Zh., Dong X. Research on the frequency regulation strategy of large-scale battery energy storage in the power grid system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. V.2022. Article ID 4611426. 13 p. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4611426>
18. Li X., Wang S. Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021;(7)5:1026–1040. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.00160>
19. Rui F., Haitao L., Ling J. Operation analysis and optimization suggestions of user-side battery energy storage systems. *The Proceedings of the 5th International Conference on Energy Storage and Intelligent Vehicles. ICEIV 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023. V.1016. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1027-4_37

20. Liang T., Zhang T., Lin X., Tafone A., Legrand M. et al. Liquid air energy storage technology: a comprehensive review of research, development and deployment. *Progress in Energy*. 2023;5(1):012002. DOI:10.1088/2516-1083/aca26a

21. Marchionni M., Cipollone R. Liquid CO₂ and Liquid Air energy storage systems: a thermodynamic analysis. *Energies*. 2023;16(13):4941. <https://doi.org/10.3390/en16134941>

22. Liu Z., Kim D., Gundersen T. Optimization and analysis of different liquid air energy storage configurations. *Computers & Chemical Engineering*. 2023;169:108087.

23. Bullough C., Gatzen C., Jakiel Ch., Koller M., Nowi A., Zunft S. Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy. *Proceedings of the European wind energy conference, EWEC, 22-25 November, 2004, London, UK. 2004;(22):25.* URL: https://www.researchgate.net/publication/224797562_Advanced_adiabatic_compressed_air_energy_storage_for_the_Integration_of_wind_energy.

24. Chen X. iaojiao Chen, Huang L., Liu J., Song D., Yang Sh. Peak shaving benefit assessment considering the joint operation of nuclear and battery energy storage power stations: Hainan case study. *Energy*. 2022;239:121897. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121897>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Карчин В.В. – анализ особенностей систем электроснабжения АЭС;

Мельдин Е.В. – изучение схемотехнических решений для возможности реализации, анализ международного опыта;

Питев А.Н. – изучение и анализ современных технологий (химических источников тока) для возможности реализации систем накопления энергии.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Karchin V.V. – NPP power supply systems analysis and their features;

Meldin I.V. – study circuit solutions and devices design, international experience analysis;

Pitev A.N. – study and analysis of modern electrochemical power sources for the possibility of using battery energy storage systems.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Авторы благодарят компанию «РЭНЕРА» за предоставление информации и участия в тематических мероприятиях.

ACKNOWLEDGMENTS:

The authors thank «RENERA» company for information about battery energy storage systems.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виктор Васильевич Карчин, к.т.н., доцент кафедры транспортно-энергетических систем, Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, г. Чебоксары, Чувашская Республика, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4604-6173>

e-mail: karchinvv@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Viktor V. Karchin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Department of Transport and Energy Systems, Cheboksary Institute of Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4604-6173>

e-mail: karchinvv@gmail.com

Евгений Валерьевич Мельдин, инженер службы электроавтоматики, магистрант 1 г. о., Калининская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Удомля, Тверская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0134-7693>

e-mail: evg-meldin@ya.ru

Ievheniy V. Meldin, engineer-electrician, M. Sc. Student, Kalinin Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Udomlya, Tver region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0134-7693>

e-mail: evg-meldin@ya.ru

Алексей Николаевич Питев, руководитель службы автоматики, Калининская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Удомля, Тверская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4481-2599>

e-mail: pittyaalex@mail.ru

Alexei N. Pitev, deputy chief of electrical department, Kalinin Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Udomlya, Tver region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4481-2599>

e-mail: pittyaalex@mail.ru

Поступила в редакцию 04.05.2023

После доработки 30.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Received 04.05.2023

Revision 30.08.2023

Accepted 05.09.2023

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 004.75

DOI 10.26583/gns-2023-03-03

EDN FYOEP0



**Метод описания модульной информационно-измерительной системы
на основе протокола CANopen с учетом межмодульных
информационных связей**

Д.А. Плотников , А.С. Муженко  ✉, В.И. Лачин 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

✉ muzhenko97@mail.ru

Аннотация. Современные информационно-измерительные и управляющие системы – ИИУС – обычно имеют модульную структуру. Удобными средствами организации межмодульного взаимодействия являются интерфейсы CAN (CAN FD) и протокол CANopen. Стандартные средства, предусмотренные спецификацией CANopen, ориентированы на описание отдельных модулей и не обеспечивают целостность и непротиворечивость конфигурации ИИУС в целом. В данной статье рассматриваются причины возможных ошибок конфигурирования и предлагается метод описания ИИУС на базе протокола CANopen, обеспечивающий согласованную настройку модулей системы. Цель достигается за счёт дополнения стандартного описания модулей явным описанием сообщений, передаваемых модулями друг другу, с указанием источника, приёмников и перечня параметров. Разработана схема информационных потоков в модульной ИИУС, предложена общая структура описания системы, включающая параметры модулей и параметры сообщений. Подробно рассмотрены структуры данных, описывающие модули и сообщения, особое внимание уделено обеспечению целостности межмодульных информационных связей. Показано, что предлагаемый метод позволяет обнаружить или исключить такие ошибки конфигурирования, как сообщения без источника или без получателей, дублирование передачи параметров, попытка передачи несуществующего параметра, отсутствие передачи некоторых параметров, отсутствие источника у принимаемого параметра. Предложено использование языка XML для реализации метода описания ИИУС, обеспечивающее автоматическую проверку конфигурации системы стандартными средствами языка на основе схемы документа. Отмечено, что использование метода в программе моделирования и конфигурирования модульной системы вибромониторинга обеспечило выявление ошибок несогласованной или неполной настройки отдельных модулей на самых ранних этапах проектирования.

Ключевые слова: модульная система, межмодульное взаимодействие, протокол CANopen, сетевое взаимодействие, интерфейс CAN, обмен данными, информационные объекты, классы сообщений, объектный словарь, параметры модуля, конфигурирование модульных систем.

Для цитирования: Плотников Д.А., Муженко А.С., Лачин В.И. Метод описания модульной информационно-измерительной системы на основе протокола CANopen с учетом межмодульных информационных связей. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):26–36. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-03>

**A method of describing a modular information and measurement system based on the
CANopen protocol, taking into account intermodule information links**

Dmitriy A. Plotnikov , Alexander S. Muzhenko  ✉, Vyacheslav I. Lachin 

South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Rostov region, Russia

✉ muzhenko97@mail.ru

Abstract. Modern information and measuring and control systems (IMCS) usually have a modular structure. Convenient means of organizing intermodule interaction are the CAN interfaces (CAN FD) and the CANopen protocol. The standard tools provided by the CANopen specification are focused on the description of individual modules and do not ensure the integrity and consistency of the IMCS configuration as a whole. This article discusses the causes of possible configuration errors and suggests a method for describing the IMCS based on the CANopen protocol, which ensures consistent configuration of the system modules. The goal is achieved by supplementing the standard description of modules with an explicit description of the messages transmitted by modules to each other, indicating the source, receivers and a list of parameters. A scheme of information flows in a modular IMCS is developed, a general structure of the system description is proposed, including module parameters and message parameters. Data structures describing modules and messages are considered in detail, special attention is paid to ensuring the integrity of intermodule information links. It is shown that the proposed method makes it possible to detect or exclude configuration errors such as messages without a source or without recipients, duplication of parameter transmission, an attempt to transmit a non-existent parameter, the absence of transmission of some parameters, the absence of a source for the received parameter. The use of the XML language for the implementation of the IMCS description method is proposed, which provides automatic verification of the system configuration by standard language means based on the document schema. It is noted that the use of the method in the modeling and configuration program of the modular vibration monitoring system provided the identification of errors of inconsistent or incomplete configuration of individual modules at the earliest stages of design.

Keywords: modular system, intermodule interaction, CANopen protocol, network interaction, CAN interface, data exchange, information objects, message classes, object dictionary, module parameters, configuration of modular systems.

For citation: Plotnikov D.A., Muzhenko A.S., Lachin V.I. A method of describing a modular information and measurement system based on the CANopen protocol, taking into account intermodule information links. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):26–36 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-03>

Введение

Современные информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС) – такие, например, как системы вибромониторинга турбоагрегатов или контроллеры АСУ ТП электрических подстанций – обычно имеют модульную структуру. Такой подход позволяет с использованием сравнительно небольшой номенклатуры унифицированных модулей скомпоновать систему, обеспечивающую наиболее эффективное решение конкретной прикладной задачи для конкретного объекта (рис. 1).

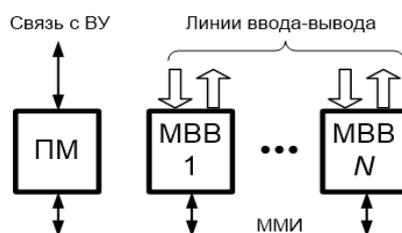


Рисунок 1. Типовая схема модульной ИИУС: ВУ – верхний уровень; МВВ – модули ввода-вывода; ММИ – межмодульный интерфейс; ПМ – процессорный модуль

Figure 1. Typical scheme of a modular IMCS: ВУ – upper level; МВВ – input/output modules; ММИ – inter-module interface; ПМ – processor module

Однако для этой структуры характерны и все недостатки сетевой организации. Наиболее важный из них – существенное влияние качества сетевого взаимодействия на показатели эффективности функционирования системы и на ее общую работоспособность. Более того, на основные параметры сетевого взаимодействия – скорость обмена данными, своевременность их доставки, вероятность искажения информации – непосредственно влияет сложность конкретной системы и число взаимодействующих модулей, входящих в ее состав, которое в разных реализациях ИИУС может изменяться в весьма широких пределах. Следовательно, для обеспечения и оценки качества функционирования модульных ИИУС на как можно более ранних

этапах проектирования требуются методы и средства описания, моделирования и анализа сетевого межмодульного взаимодействия, учитывающие особенности решаемых задач.

С точки зрения авторов одними из наиболее перспективных интерфейсов межмодульного взаимодействия в ИИУС являются интерфейсы *CAN*¹ и его улучшенная версия *CAN FD*². Они предназначены для создания систем, работающих в режиме реального времени, обеспечивают высокую достоверность обмена данными, имеют развитый механизм автоматического обнаружения ошибок. Кроме того, стоимость их аппаратной реализации невысока, а производители электронных компонентов и программного обеспечения (ПО) предоставляют разработчикам всестороннюю поддержку.

Упомянутые интерфейсы исследованы достаточно хорошо: этому посвящены работы [1-3], ряд методов и моделей для оценки и повышения эффективности межмодульного взаимодействия разработан авторами [4-7]. Однако, как *CAN*, так и *CAN FD* реализуют только физический и канальный уровни модели *OSI*, чего обычно достаточно для решения лишь простейших задач межмодульного взаимодействия. Однако если в состав ИИУС входят десятки модулей, которые обмениваются значениями сотен параметров, возникает необходимость обеспечения адресации и синхронизации модулей, коррекции ошибок взаимодействия, конфигурирования (настройки) как отдельных модулей, так и системы в целом. Для решения этих задач необходимо использование протоколов более высокого уровня. На основе интерфейсов *CAN* и *CAN FD* разработано несколько стандартных высокоуровневых протоколов³, в частности *CANopen*⁴. Этот протокол общего назначения предназначен для использования в распределенных модульных ИИУС реального времени и обеспечивает пять верхних уровней модели *OSI*.

Основным элементом логической структуры модуля (узла) *CANopen* является объектный словарь. Его можно рассматривать как таблицу, в которой хранятся параметры настройки и сведения о текущем состоянии устройства или процесса. Обращения к записям словаря (объектам) выполняются с использованием 16-разрядного индекса. Каждый объект может содержать до 256 подобъектов, которые адресуются с помощью восьмиразрядного субиндекса. Взаимодействие устройств реализуется в виде обращений к объектным словарям друг друга. Текущие и накопленные данные можно извлечь из устройства путем чтения соответствующих объектов его словаря. И наоборот: запись в какой-либо объект может быть интерпретирована устройством, как сигнал, инициирующий выполнение некоторых действий.

Постановка задачи исследования

Для получения доступа к объектам словаря в рабочем режиме ИИУС обычно используется служба *Process Data Objects (PDO)*⁵. Каждое сообщение этой службы содержит одно или несколько значений величин из объектного словаря передающего модуля системы, измеренных или вычисленных этим модулем. Службой *PDO*

¹ ISO 11898-1:2015 Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signaling [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/63648.html> (дата обращения: 22.07.2023)

² CAN with Flexible Data-Rate. Version 1.1. Aug.2011 [Электронный ресурс]. Robert Bosch GmbH. – URL: https://www.semiconductors.bosch.de/media/pdf/.../canliteratur/can_fd.pdf (дата обращения: 22.07.2023).

³ Standardized higher-layer protocols [Электронный ресурс]. © 2021 CAN in Automation. – URL: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/hlp/standardized-higher-layer-protocols/> (дата обращения: 30.07.2023).

⁴ CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0 [Электронный ресурс]. © CAN in Automation (CiA) 2011. – URL: <https://www.can-cia.org> (дата обращения: 30.07.2023)

⁵ Там же.

предусмотрена гибкая настройка режимов передачи: возможна отправка сообщений по изменению данных, по событию синхронизации, периодическая, допустимы также некоторые комбинации этих режимов. При необходимости модуль может формировать сообщения *PDO* разных типов, отличающихся содержанием и режимами передачи. Например, в *PDO* первого типа с заданной периодичностью передаются текущие измеренные значения параметров, *PDO* второго типа содержит признаки состояния модуля и передается только при их изменении. Содержание каждого *PDO* задается параметрами его разметки (*PDO Mapping*, рис. 2) при настройке модулей. Набор этих параметров одинаков для *PDO*, формируемых некоторым модулем (*TPDO*), и для *PDO*, принимаемых модулем (*RPDO*), однако их назначение несколько отличается. Разметка *TPDO* определяет, содержимое каких объектов словаря и в каком порядке следует расположить в передаваемом сообщении. Разметка *RPDO* показывает, данные какого размера в какой последовательности нужно извлечь из принятого сообщения и в какие объекты словаря их записать. На рисунке 3 показан пример передачи параметров вибрации, измеренных модулем 1, в контроллер системы вибромониторинга (модуль *N*) с использованием службы *PDO*.

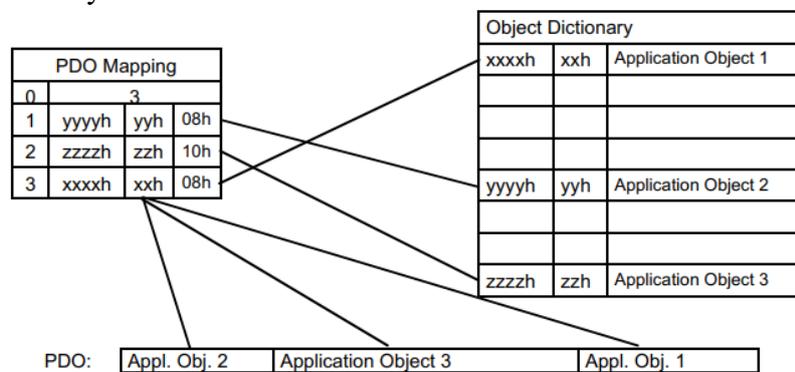


Рисунок 2. Разметка *PDO* (*PDO Mapping*), см. CiA 301. CANopen application (см. постр. сн. 4)
Figure 2. *PDO Mapping*, see CiA 301. CANopen application (page footnote 4)

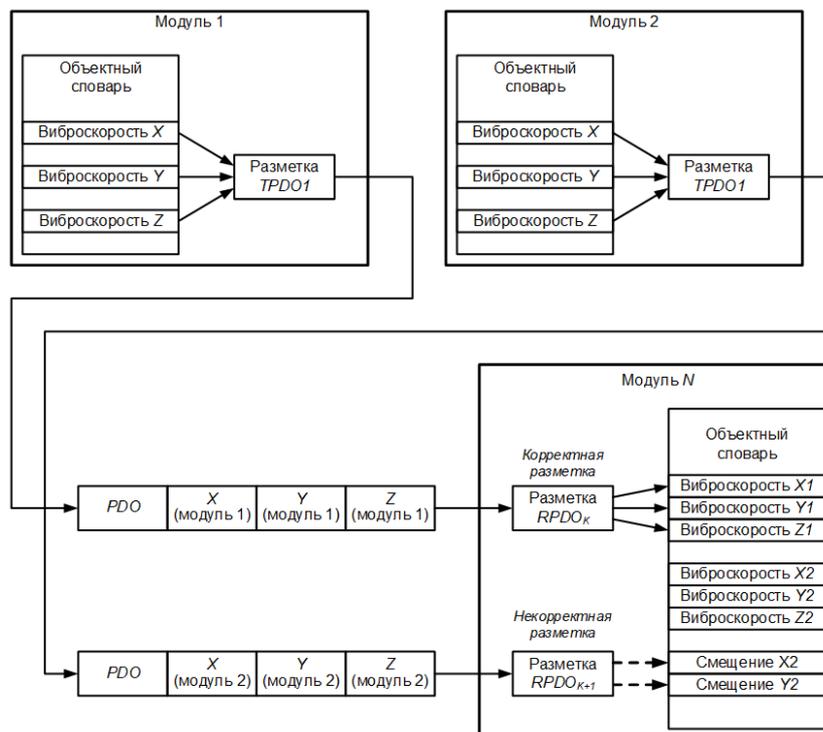


Рисунок 3. Пример организации межмодульного взаимодействия в системе вибромониторинга с использованием службы *PDO*

Figure 3. Example of organization of inter-module interaction in vibration monitoring system using *PDO* service

Описанный механизм обмена данными обладает чрезвычайной гибкостью, но при проектировании ИИУС в процессе ее адаптации к конкретному объекту управления он требует настройки с учетом специфики этого объекта. Поскольку количество и типы модулей, используемых в системе, а также набор контролируемых параметров для разных объектов управления могут отличаться, разработчики должны указать, какие модули конкретного варианта системы являются источниками некоторых наборов данных, а какие – приемниками, то есть задать информационные связи между объектными словарями модулей. В процессе настройки этих связей перед вводом ИИУС в эксплуатацию возможно возникновение трудно выявляемых ошибок. Дело в том, что в соответствии со стандартом⁶ разметки *TPDO* и *RPDO* взаимодействующих модулей настраиваются независимо в процессе создания отдельных *DCF*-файлов конфигурации для каждого модуля. Это может привести к ситуации, изображенной на рис. 3 в модуле *N*. Пусть, например, *TPDO1* модуля 1 настроено для передачи текущих значений ортогональных составляющих вибрации *X*, *Y*, *Z*, измеренных в некоторой точке объекта, а *TPDO1* модуля 2 – для передачи аналогичных параметров, измеренных в другой точке. Эти данные передаются службой *PDO* в сеть и принимаются модулем *N*. Если разметка *RPDO* принимающего модуля настроена правильно (*RPDO_k*), то она помещает полученные параметры вибрации в соответствующие объекты словаря. Если же при настройке *RPDO* допущена ошибка (*RPDO_{k+1}*), то часть параметров вибрации, измеренных модулем 2, запишется в объекты словаря, предназначенные для хранения других величин, а часть и вовсе будет потеряна. Некорректное указание размеров данных при настройке разметок *TPDO* и *RPDO* приводит к возникновению еще более сложно выявляемых проблем. При настройке ИИУС, модули которых обмениваются значениями сотен параметров, вероятность появления описанных ошибок весьма велика.

Таким образом, возникает задача разработки методов и средств описания ИИУС, исключающих возможность появления подобных ошибок.

Разработка метода описания ИИУС

Сформулированная задача решена авторами путем дополнения описания ИИУС, предусматривающего независимое создание конфигураций отдельных модулей и регламентированного стандартом⁷, явным описанием межмодульного взаимодействия с размещением всех элементов описания в единственном файле конфигурации системы. С этой целью к описанию системы добавлены информационные объекты, соответствующие *PDO* и включающие в себя всю необходимую информацию не только о содержании, но и о модуле-источнике и модулях-приемниках сообщений.

Для формирования структуры описания модульной ИИУС, основанной на протоколе *CANopen*, разработана схема информационных потоков (рис. 4). В соответствии с ней ИИУС представлена в виде множества модулей $\{m_k\}: k = \{1, 2, \dots, M\}$, где *M* – общее количество модулей. Параметры, измеряемые или вычисляемые *k*-м модулем, образуют множество X_k , параметры, получаемые от других модулей – множество Y_k . Каждый *k*-й модуль с помощью сообщений *PDO* передает другим модулям параметры из собственного множества X_k , а принимающие модули с номерами $i = \{1, 2, \dots, M\}, i \neq k$ в соответствии со своими настройками могут записать полученные данные в множества Y_i . Каждое сообщение имеет приоритет, определяемый классом сообщения $h \in \{1 \dots H\}$, где *H* – количество классов. Приоритет

⁶ CiA 306. CANopen electronic data sheet (EDS). Version 1.3.0. January 01, 2005 [Электронный ресурс]. © CAN in Automation (CiA) 2005. – URL: <https://www.can-cia.org> (дата обращения: 30.07.2023).

⁷ Там же.

тем выше, чем меньше номер класса. Сообщения с высшим приоритетом передаются и, соответственно, доставляются в первую очередь.

Таким образом, сообщение $l_{h,k}$, передаваемое k -м модулем и относящееся к классу h , можно описать информационным объектом, включающим следующие сведения:

- номер модуля-источника сообщения Src ($Src = k$);
- множество параметров $X_k^{(l)} \subset X_k$, содержащихся в сообщении;
- список модулей-приемников, в котором для каждого r -го модуля в поле Dst указан его номер в системе n_r , а также задано соответствие $f_{nr}^{(l)}: X_k^{(l)} \rightarrow Y_{nr}$, отображающее полученные в сообщении данные на множество Y_{nr} .

Кроме перечисленных сведений в описание сообщения включаются и другие предусмотренные стандартом⁸ параметры PDO , которые не имеют прямого отношения к разработанному методу и, в связи с этим, на рисунке 4 не показаны.

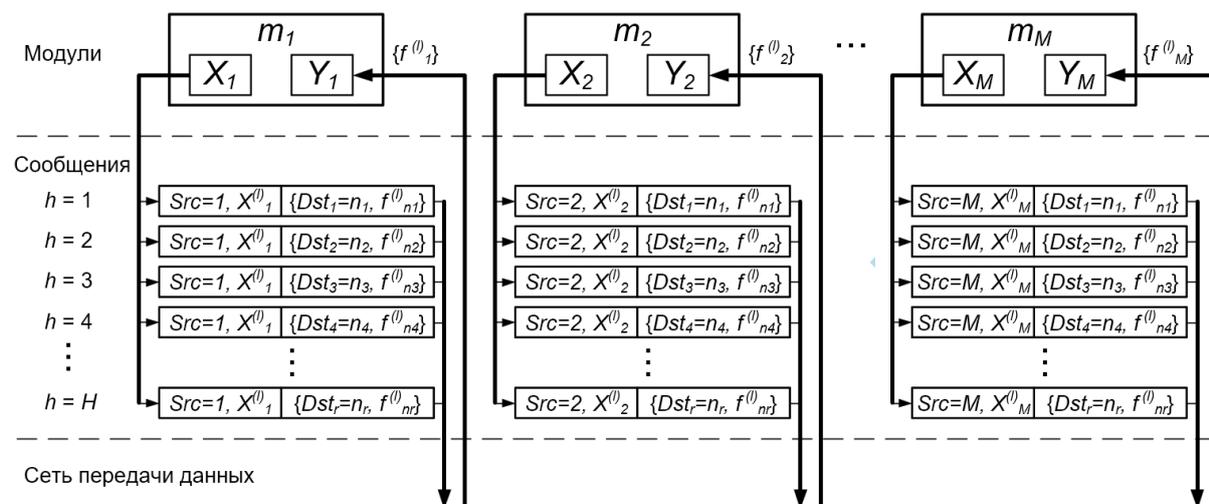


Рисунок 4. Схема информационных потоков в модульной ИИУС
Figure 4. Scheme of information flows in a modular IMCS

На основе разработанной схемы создан метод описания ИИУС, рассматривающий систему как совокупность модулей, взаимодействующих путем обмена сообщениями. На верхнем уровне описания определены две группы параметров (рис. 5): параметры модулей ($Nodes$) и параметры сообщений ($Messages$).

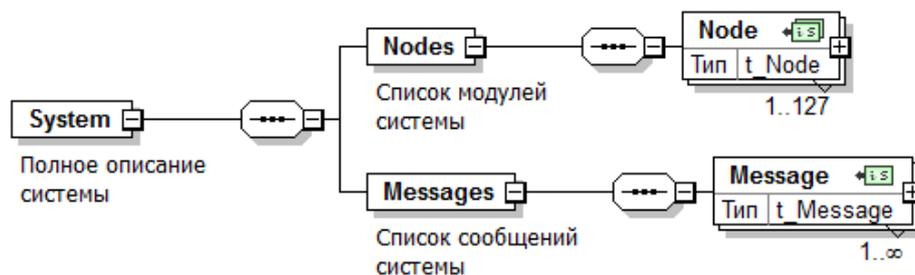


Рисунок 5. Общая структура описания ИИУС
Figure 5. General structure of the IMCS description

Список модулей $Nodes$ в соответствии с CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0 – 2011 (см. постр. сноску 4) не может содержать более 127 записей. Предельное количество записей в списке $Messages$, то есть максимально допустимое число всех возможных типов сообщений в системе, в явном

⁸ См. CiA 306. CANopen electronic data sheet... – постр. сноска 6

виде не задано, поскольку индивидуальные ограничения накладываются на количества типов сообщений, формируемых каждым модулем в отдельности. Это естественным образом ограничивает размер списка *Messages*.

Описания модулей m_k , содержащиеся в списке *Nodes*, имеют структуру, показанную на рисунке 6. Для каждого модуля задаются некоторые общие параметры (*attributes*) и описывается объектный словарь (*OBD*). В числе общих параметров следует особо отметить идентификатор (адрес) узла в сети *NodeID* и уникальный индекс модуля *idx*, с использованием которого другие объекты описания ссылаются на модуль. Применение в качестве индекса параметра *NodeID* признано нецелесообразным, поскольку он может изменяться в процессе настройки, что повлечет за собой необходимость выявления и коррекции множества ссылок. Оставшиеся общие параметры являются вспомогательными, их перечень при необходимости может дополняться и изменяться.

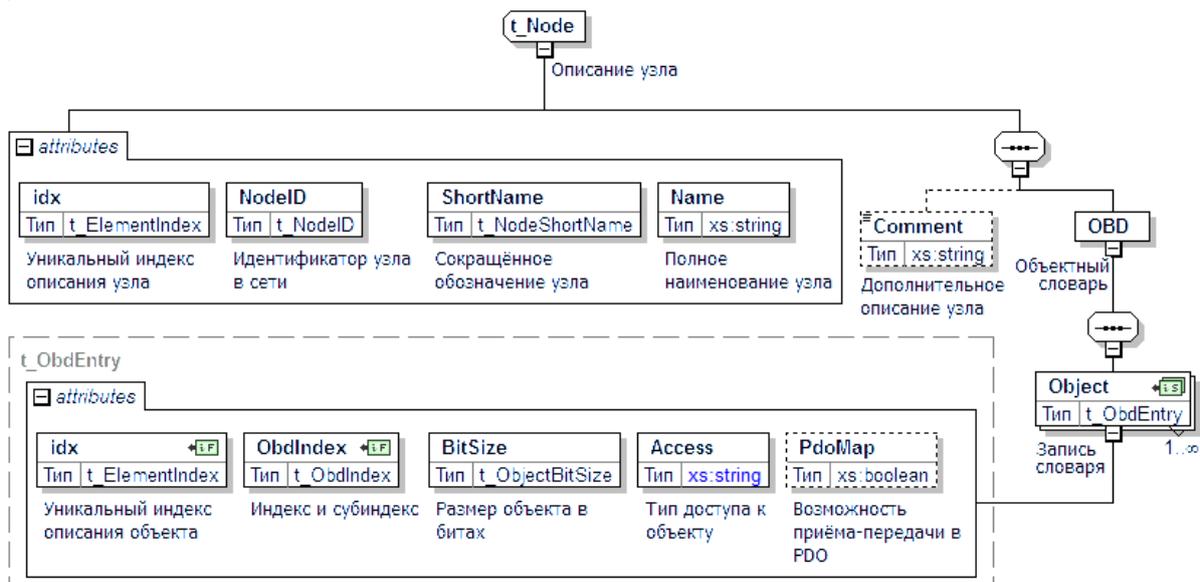


Рисунок 6. Описание модуля ИИУС
Figure 6. IMCS module description

Список *OBD* содержит описания отдельных объектов словаря *Object* типа *t_ObdEntry*. Для каждого объекта задается уникальный индекс *idx*, необходимый для ссылок на этот объект из других частей описания, а также параметры, в соответствии с CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0 – 2011 (см. постр. сноску 4): индекс и субиндекс (*ObdIndex*), разрядность данных в битах (*BitSize*), режим доступа (*Access*), признак возможности приема или передачи в *PDO* (*PdoMap*) и ряд других, которые для простоты на схеме не показаны. Множества вычисляемых и принимаемых величин (X_k и Y_k соответственно) задаются неявно на основе значений параметров *PdoMap* и *Access* всей совокупности объектов модуля. Прежде всего, для элементов каждого из множеств должна быть разрешена передача службой *PDO* (*PdoMap* = true). Из всей совокупности этих элементов в множество X_k входят объекты с режимом доступа «Только чтение» (*Access* = ro), а в множество Y_k – с режимом доступа «Запись» или «Чтение и запись» (*Access* = {wo | rw}). Такой способ задания X_k и Y_k предотвращает избыточность описания и, как следствие, исключает возможность несогласованности его элементов.

Для описания сообщений ИИУС используется структура данных, упрощенная схема которой показана на рисунке 7.

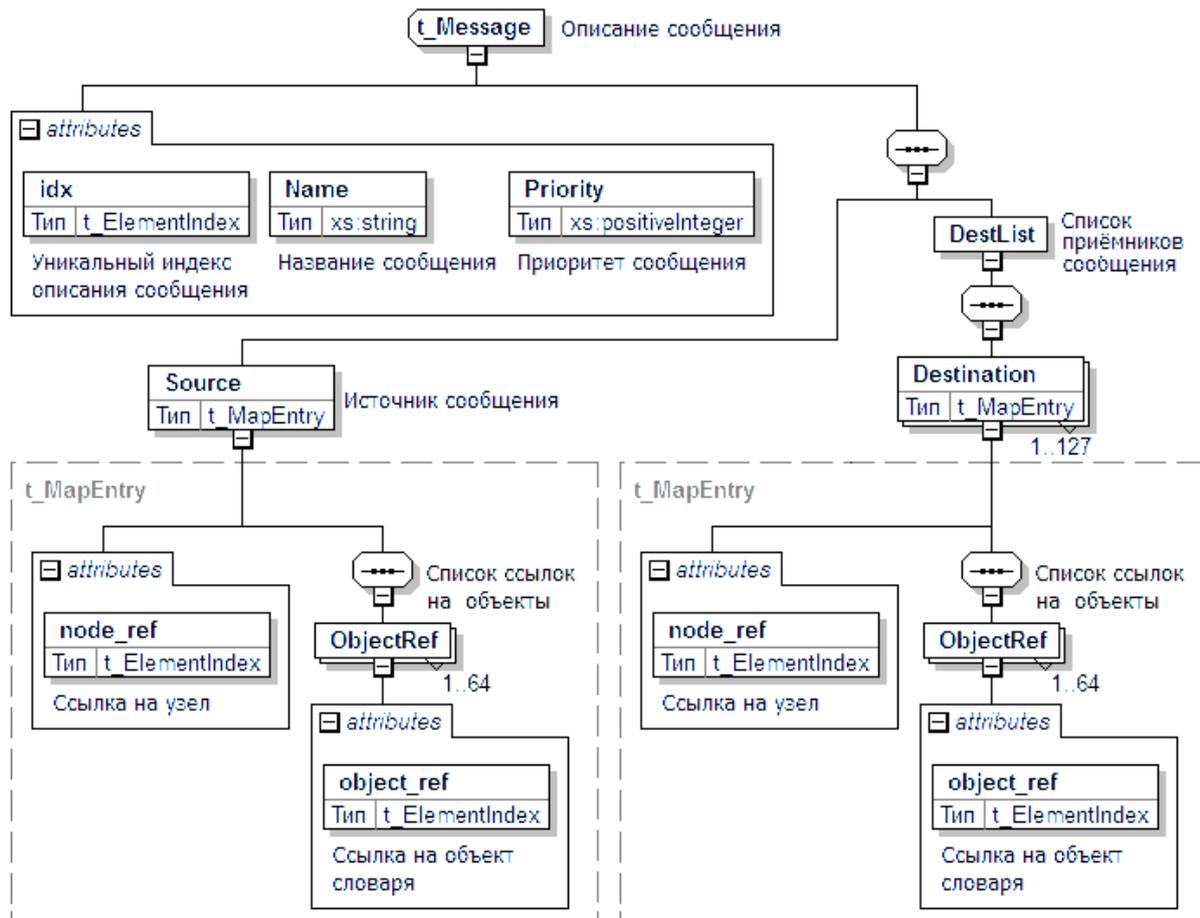


Рисунок 7. Описание сообщения
Figure 7. Message descriptions

Эта структура, аналогично структуре t_Node , содержит набор общих параметров (*attributes*), а также описание источника и приемников сообщения (*Source* и *DestList* соответственно). Назначение параметра *idx* аналогично описанному ранее для других структур, приоритет (класс) сообщения h определяется параметром *Priority*.

Источник *Source* и список приемников *DestList* сообщения описываются одинаковыми структурами типа $t_MapEntry$. Различие заключается лишь в том, что любое сообщение всегда имеет только один источник, а приемников может быть несколько. В структуре *Source* указывается индекс модуля, передающего сообщение, и список ссылок на объекты из словаря этого модуля, определяющий содержание сообщения, то есть множество $X^{(l)}_k$. Список *DestList* содержит одну или несколько аналогичных структур, в каждой из которых указан индекс принимающего модуля и список ссылок на объекты из его словаря, в которые будут записаны данные, содержащиеся в сообщении. Отображение $f^{(l)}_{nr}: X^{(l)}_k \rightarrow Y_{nr}$ задается порядком перечисления индексов объектов в списках *ObjectRef* источника и приемников.

Некоторые параметры объектов словаря, оговоренные в CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0 – 2011 (см. постр. сноску 4), но не относящиеся непосредственно к разработанному методу – такие, как режимы передачи, значения по умолчанию и ряд других – в приведенном описании для простоты не упомянуты, однако при практической реализации метода указываются в соответствующих структурах данных.

Реализация метода с использованием языка XML

Разработанный метод описания ИИУС реализован авторами с использованием языка XML⁹, что обеспечивает ему следующие преимущества:

1. Простота модификации. XML-описание хранится в текстовом формате и имеет иерархическую структуру, доступную для восприятия человеком. За счет этого небольшие изменения описания можно выполнить любой программой для редактирования текста без специального ПО.

2. Расширяемость. Язык XML допускает использование произвольного количества тегов и атрибутов, определяемых разработчиком, в том числе и внутри уже существующих структур. За счет этого к описанию любого объекта ИИУС можно добавить необходимое количество параметров с сохранением как минимум прямой совместимости исходных и дополненных описаний. Обратной совместимости можно добиться путем использования значений по умолчанию для элементов, отсутствующих в исходном описании.

3. Универсальность. Поскольку язык XML стандартизирован и широко распространен, для него существует множество средств разработки и поддержки, что позволяет использовать для создания описаний ИИУС не только специальное, но и универсальное ПО (например, JSON and XML Editor¹⁰);

4. Целостность. Структуру XML-документа можно описать и впоследствии автоматически проверить на соответствие этому описанию (схеме документа) при помощи стандартных средств.

Для обеспечения последнего преимущества авторами дополнительно разработана схема описания ИИУС на языке XSD¹¹, обеспечивающая контроль полноты и непротиворечивости описания каждой конкретной системы. С использованием этой схемы автоматически выявляются следующие ошибки и потенциальные проблемы настройки межмодульного взаимодействия:

- сообщения, не имеющие источника;
- сообщения, не имеющие получателей;
- сообщения без содержимого (пустые);
- передача одних и тех же параметров в нескольких сообщениях;
- передача отсутствующего (несуществующего) параметра;
- параметры, доступные для передачи, но не передаваемые ни в одном сообщении;
- отсутствие источника у принимаемого параметра;
- несоответствие типов передаваемого и принимаемого параметров.

Выводы

Разработанный метод описания ИИУС имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартным (см. постр. сноску б), задающим межмодульное взаимодействие путем создания независимых конфигураций для каждого модуля системы:

1. Взаимодействие модулей описывается явным образом в едином информационном объекте (XML-файле) и наглядно связывает источник и приемники данных, что упрощает создание, модификацию и анализ описания системы.

⁹ Extensible Markup Language (XML) [Электронный ресурс]. 2016. – URL: <https://www.w3.org/XML/> (дата обращения: 10.08.2023).

¹⁰ JSON and XML Editor [Электронный ресурс]. 2021. – URL: <https://www.altova.com/xmlspy-xml-editor> (дата обращения: 10.08.2023).

¹¹ W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1 [Электронный ресурс]. 2012. – URL: <https://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/> (дата обращения: 10.08.2023).

2. При создании описания системы возникает возможность выявления сообщений, которые передаются, но не принимаются ни одним модулем (с пустым списком приемников). Они увеличивают нагрузку на сеть, но не несут полезной информации.

3. Исключаются ситуации, когда приемники будут настроены на получение данных, не имеющих источника. Это относится как к сообщениям в целом (сообщения с пустым полем *Source* недопустимы), так и к отдельным параметрам (списки *ObjRef* источника и приемников должны соответствовать друг другу по количеству и типам данных, а также ссылаться на существующие объекты словарей).

4. Обеспечивается возможность выявления объектов словаря, значения которых должны быть получены от других модулей, но передача этих значений отсутствует.

5. Исключается несоответствие типов данных: для этого в описании каждого сообщения отображения $f^{(l)}_{nr}: X^{(l)}_k \rightarrow Y_{nr}$ проверяются на совместимость передаваемых и принимаемых данных.

6. На основе единого описания ИИУС возможно автоматизированное создание согласованных друг с другом стандартных файлов конфигурации *DCF* (см. постр. сноску б) для отдельных модулей, что при необходимости позволяет использовать для настройки системы ПО сторонних производителей. Возможно решение и обратной задачи: автоматическое формирование *XML*-описания ИИУС на основе имеющихся отдельных *DCF*-файлов с проверкой его полноты и согласованности.

7. Описание ИИУС может быть использовано для автоматизации формирования фрагментов исходного текста ПО модулей – в первую очередь структур, описывающих объектные словари.

Элементы предложенного метода описания ИИУС реализованы в программе конфигурирования и моделирования модульной системы вибромониторинга турбоагрегатов [8]. Опыт применения программы показал, что благодаря описанным решениям все ошибки несогласованной или неполной настройки отдельных модулей и, как следствие, возможность потери или искажения данных по этой причине выявляются и устраняются еще на этапе подготовки конфигурации системы в условиях предприятия-изготовителя, а не в процессе пусконаладочных работ, как это было ранее до внедрения разработанного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Iehira K., Inoue H., Ishida K. Spoofing attack using bus-off attacks against a specific ECU of the CAN bus. *15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Las Vegas, NV, USA, 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/CCNC.2018.8319180>

2. Liu Yu, Yin Y. Statistical analysis of improved bit-stuffing method based on CAN bus. *Computer science and engineering*. 2018. <https://doi.org/10.12783/dtscse/ceic2018/24562>

3. Alaei R., Moallem P., Bohlooli A. statistical based algorithm for reducing bit stuffing in the controller area networks. *Microelectronics Journal*. 2020;101:104794. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2020.104794>

4. Плотников Д.А. Оценка времени отклика элементов в модульных информационно-измерительных и управляющих системах, использующих интерфейс CAN. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2017;1:13–18. <http://dx.doi.org/10.17213/0321-2653-2017-1-13-18>

5. Плотников Д.А. Вероятностный метод для оценки параметров межмодульного взаимодействия в системе управления защитой турбоагрегата по вибрации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;11(3):37–51. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-04>

6. Лачин В.И., Плотников Д.А., Муженко А.С., Дьяченко В.Б., Рарова Н.В. Разработка имитационной модели модульной информационно-измерительной системы на базе интерфейса CAN FD. Д.А. *Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов 19-й Международной научно-практической конференции, 06-07 июня 2023 г.* НИЯУ МИФИ. Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2023. С. 133-136. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54313273&pff=1>

7. Плотников Д.А., Лачин В.И., Муженко А.С., Рарова Н.В. Оценка времени передачи сообщений в информационно-измерительных и управляющих системах, использующих интерфейс CAN FD. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2023;2:5–10. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-5-10>

8. Плотников Д.А., Алджиязна В.К.М. Моделирование межмодульного взаимодействия в системах на базе протокола CANopen (CanOpenAnalyzer). – Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ 2020610500 РФ. Роспатент. № 2019667012; заявлено 19.12.19, зарег. 15.01.20.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Плотников Д.А. – разработка теории, планирование и проведение экспериментов, расчетов, выполнение анализа результатов экспериментов, разработка программного обеспечения;

Муженко А.С. – создание рукописи статьи, выполнение анализа результатов экспериментов и расчетов;

Лачин В.И. – выполнение анализа результатов расчетов, руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Статья написана без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дмитрий Александрович Плотников, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7551-1364>

e-mail: dpl68@mail.ru

Александр Сергеевич Муженко, ассистент, кафедра «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3620-9945>

e-mail: muzhenko97@mail.ru

Вячеслав Иванович Лачин, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматика и телемеханика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7337-229X>

e-mail: lachinv@mail.ru

Поступила в редакцию 07.07.2023

После доработки 28.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Plotnikov D.A. – development of theory, planning and conducting experiments, calculations, analysis of experimental results, software development;

Muzhenko A.S. – creation of the manuscript, analysis of the results of experiments and calculations;

Lachin V.I. – analysis of the results of calculations, management of research work and verification of its results.

FUNDING:

The article was written without external sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

The author declares no relevant conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Dmitriy A. Plotnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department «Automation and Telemechanics», Platov South-Russia State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7551-1364>

e-mail: dpl68@mail.ru

Alexander S. Muzhenko, assistant lecturer, Department «Automation and Telemechanics», Platov South-Russia State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3620-9945>

e-mail: muzhenko97@mail.ru

Vyacheslav I. Lachin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department «Automation and Telemechanics», Platov South-Russia State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7337-229X>

e-mail: lachinv@mail.ru

Received 07.07.2023

Revision 28.08.2023

Accepted 05.09.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.317.39
DOI 10.26583/gns-2023-03-04
EDN GKFSGB



Цифровая модель вибропреобразователя на основе эффекта левитации

А.Н. Шилин , С.В. Макартичян ✉, И.С. Барашков 

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия
✉ hymir@mail.ru

Аннотация. В настоящее время для безопасного использования АЭС необходимо внедрять системы раннего диагностирования состояния реакторных установок. Поскольку вибрации всегда были угрозой безопасного использования АЭС, решение вопросов повышения точности виброшумовой диагностики реакторных установок АЭС, особенно в области ультранизких частот, является актуальной задачей. Наиболее перспективным направлением решения проблемы гибких направляющих в электромеханических вибропреобразователях является эффект левитации, который позволяет полностью исключить механический контакт и, соответственно, уменьшить порог чувствительности преобразователя. В статье проведен анализ существующих вибропреобразователей и предложена аналоговая и цифровая математическая модели системы магнитной левитации, учитывающие тот факт, что электромагнитная сила, воздействующая на чувствительный элемент вибродатчика, изменяется в зависимости от перемещения этого элемента и тока в катушке по нелинейному закону. Изучены характеристики такой нелинейной системы с использованием метода гармонической линеаризации, позволяющего получить эквивалентную линейную систему. При этом учтены слагаемые третьего порядка разложения электромагнитной силы в ряд Тейлора, что позволило получить более точную аналоговую модель вибропреобразователя. Для разработанной цифровой модели вибропреобразователя при помощи метода z-форм получена системная функция и соответствующее разностное уравнение. Как для аналоговой, так и для цифровой модели вибропреобразователя выведены выражения и построены графики переходной, импульсной и частотных характеристик, которые позволяют сделать вывод о точности и адекватности разработанной цифровой модели. Использование полученных цифровых моделей вибропреобразователя позволит более просто моделировать его работу и обоснованно выбирать исходные параметры вибропреобразователя.

Ключевые слова: вибродигностика, электромагнитный подвес, гармоническая линеаризация, передаточная функция, частотные характеристики, импульсная и переходная характеристики, устойчивость, эффект левитации, разностное уравнение, цифровая модель.

Для цитирования: Шилин А.Н., Макартичян С.В., Барашков И.С. Цифровая модель вибропреобразователя на основе эффекта левитации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):37–50. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-04>

Vibroconverter mathematical model based on the levitation effect

Alexander N. Shilin , Sergey V. Makartichyan ✉, Ilya S. Barashkov 

FSFEI HE Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
✉ hymir@mail.ru

Abstract. Modern requirements for the safe operation of nuclear power plants dictate the need to introduce systems for early reactor plants state diagnosis. Vibrations have always been a threat to the safe nuclear power plants operation, therefore, solving the issues of improving the nuclear power plants vibronoise diagnostics accuracy, especially in the field of ultra-low frequencies, is an urgent task. The most promising way to solve the

problem of flexible guides in electromechanical vibration transducers is the levitation effect, which makes it possible to completely eliminate mechanical contact and, accordingly, reduce the sensitivity threshold of the transducer. The article presents an analysis of existing vibration transducers and offers analogue and digital mathematical models of the magnetic levitation system, taking into account the influence of the electromagnetic force nonlinearity. The characteristics of such a nonlinear system are studied using the method of harmonic linearization, which makes it possible to obtain an equivalent linear system. At the same time, the third order terms of the electromagnetic force expansion in the Taylor series are taken into account, which made it possible to obtain a more accurate analogue the vibration transducer model. For the developed vibration transducer digital model, using the z-form method, a system function and the corresponding difference equation were obtained. Expressions and graphs of transient, pulse and frequency characteristics are derived for both analogue and digital vibration converter models, which allow us to conclude about the accuracy and adequacy of the developed digital model. Using obtained vibration transducer digital models will make it easier to model its operation and reasonably select the vibration transducer initial parameters.

Keywords: vibration diagnostics, electromagnetic suspension, harmonic linearization, transfer function, frequency characteristics, impulse and transient characteristics, stability, levitation effect, difference equation, digital model.

For citation: Shilin A.N., Makartichyan S.V., Barashkov I.S. Vibroconverter mathematical model based on the levitation effect. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):37–50 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-04>

Введение

Современные условия безопасного использования атомных электростанций предполагают внедрение систем ранней диагностики. Виброшумовая диагностика реакторных установок атомных электростанций предназначена для виброконтроля внутрикорпусных устройств, корпуса реактора, тепловыделяющих сборок и элементов главного циркуляционного контура по результатам обработки информации с различных вибродатчиков.

Вибрации всегда были угрозой безопасного использования электростанций. Например, в 1970-1980 годах в США доля аварийных ситуаций на атомных электростанциях, вызванных различного рода вибрациями оборудования, достигала 10%. Именно поэтому компании-производители оборудования для атомных станций по всему миру стали проявлять повышенное внимание к вибродиагностике на различных этапах жизненного цикла производимого оборудования. Стали быстро развиваться информационно-измерительные системы контроля вибраций. Сейчас компьютерные системы вибрационного контроля присутствуют практически на любой атомной электростанции [1].

На практике существует проблема диагностики объектов с ультразвуковой частотой. Вибродатчики ультразвуковой частоты широко используются в различных отраслях промышленности, например, в электроэнергетической, аэрокосмической, устанавливаются в комплексах мониторинга землетрясений и др. В работе «Теоретические и экспериментальные исследования сверхнизкочастотного датчика вибрации на магнитной подвеске» [2] проведен подробный анализ существующих вибродатчиков и даны рекомендации по сфере их применения. Как показали исследования, главной причиной, ограничивающей применение таких датчиков для измерения низкочастотных вибраций, являются силы сухого трения в подвесе вибродатчика. Эти силы действуют на ферромагнитную массу датчика, обуславливая малую чувствительность преобразователя в области ультразвуковых частот. Как показывают исследования [3-7], порог чувствительности существующих на сегодняшний день вибродатчиков ограничен значением порядка 0,5 Гц.

В настоящее время широко развивается теория и практика применения измерительных преобразователей с электромагнитным подвесом. Преимуществами таких преобразователей являются широкий частотный диапазон измерения с

возможностью измерения ультранизкочастотных вибраций, сравнительная простота управления параметрами таких датчиков, хорошие метрологические характеристики. Кроме того, использование вибродатчиков с электромагнитным подвесом позволяет устранить проблему сухого трения в подвижной части датчика и тем самым увеличить чувствительность и точность измерений в области ультранизких частот [2-9].

Прибор для измерения вибраций на базе эффекта левитации

Разработанный авторами прибор для измерения виброперемещений, позволяющий расширить границу измерений в области ультранизких частот до 0,1 Гц, состоит из датчика виброперемещений (рис. 1а) и системы преобразования и обработки информации (рис. 1б) [10]. При помощи микроконтроллера 14, управляющего током в катушке 6, постоянный магнит 4 перемещается в центр катушки. При работе корпус прибора 3, находящегося на объекте контроля, воспринимает его вибрации. Инертная масса (постоянный магнит 4 и шторка 12) совершает колебания относительно катушки. Постоянные кольцевые магниты 5 предназначены для центрирования постоянного магнита 4 при его смещении вдоль вертикальной оси. Колебания инертной массы меняют световой поток светодиода, который преобразуется в цифровой сигнал, пропорциональный вибрациям инертной массы. Через усилитель 13 сигнал с выхода фотоприемника обрабатывается микроконтроллером. Сигнал обратной связи по положению инертной массы относительно катушки поступает в катушку через усилитель тока. Сигнал с выхода микроконтроллера, пропорциональный вибрациям объекта измерений, поступает на устройство отображения информации.

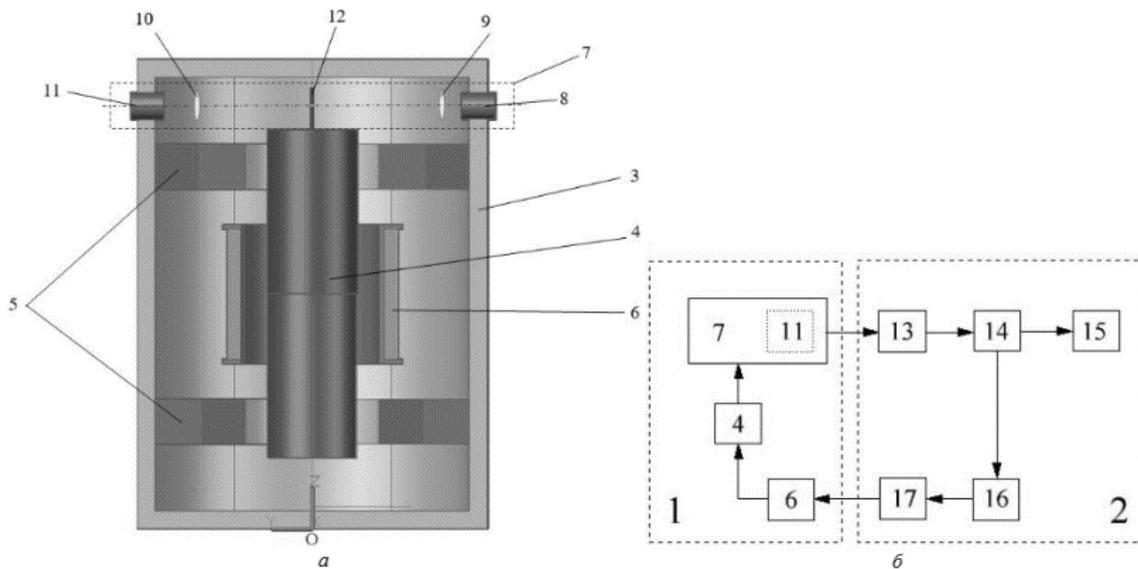


Рисунок 1. Прибор для измерения вибраций на основе эффекта левитации: а – конструкция датчика виброперемещений; б – структурно-функциональная схема прибора: 1 – чувствительный элемент; 2 – схема обработки информации; 3 – корпус; 4 – постоянный магнит; 5 – кольцевые постоянные магниты; 6 – катушка; 7 – датчик перемещений; 8 – светодиод; 9 – конденсор; 10 – объектив; 11 – фотоприемник; 12 – шторка; 13 – усилитель сигнала; 14 – микроконтроллер; 15 – устройство отображения информации; 16 – ЦАП; 17 – усилитель тока

Figure 1. Device for vibration measurement based on the levitation effect: a – vibration displacement sensor structure; b – structural and functional scheme of the device: 1 – sensitive element; 2 – information processing circuit; 3 – housing; 4 – permanent magnet; 5 – ring permanent magnets; 6 – coil; 7 – displacement sensor; 8 – LED; 9 – condenser; 10 – lens; 11 – photodetector; 12 – curtain; 13 – signal amplifier; 14 – microcontroller; 15 – information display device; 16 – DAC; 17 – current amplifier

Построение математической модели вибропреобразователя с использованием электромагнитного подвеса

Дифференциальное уравнение предложенной системы магнитной левитации имеет следующий вид (1):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg - F(x, i) - m \frac{d^2y}{dt^2}, \quad (1)$$

где m – масса постоянного магнита;

$F(x, i)$ – электромагнитная сила, приложенная к инертной массе;

x – воздушный зазор между постоянным магнитом и катушкой;

y – смещение, вызванное внешней вибрацией.

Выражение электромагнитной силы, приложенной к инертной массе имеет следующий вид (2):

$$F(x, i) = \frac{\mu_0 S N^2}{4} \left(\frac{i}{x} \right)^2, \quad (2)$$

где i – ток в катушке;

S – площадь поперечного сечения воздушного зазора;

N – число витков катушки,

магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Обозначим $k_f = \mu_0 S N^2 / 4$, тогда выражение электромагнитной силы примет следующий вид (3):

$$F(x, i) = k_f \left(\frac{i}{x} \right)^2. \quad (3)$$

Связь нелинейного характера между электромагнитной силой, воздушным зазором и током в катушке приводит к нестабильности системы магнитной левитации [11]. Для изучения характеристик системы такой нелинейной системы можно воспользоваться методом гармонической линеаризации [12], позволяющим получить эквивалентную линейную систему.

Пусть электромагнитная сила в точке равновесия равна $F(x_0, i_0)$. Поскольку изменения величин тока и смещения невелики, разложим зависимость $F(x, i)$ в ряд Тейлора (4), пренебрегая слагаемыми четвертого порядка и выше:

$$F(x, i) = F(x_0, i_0) + \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{(x_0, i_0)} \Delta i + \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{(x_0, i_0)} \Delta x + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial i^2} \Big|_{(x_0, i_0)} \Delta i^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \Big|_{(x_0, i_0)} \Delta x^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} \Big|_{(x_0, i_0)} \Delta x^3. \quad (4)$$

Здесь соответствующие частные производные имеют следующий вид (5):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{(x_0, i_0)} &= \frac{2k_f i_0}{x_0^2} = k_i, & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial i^2} \Big|_{(x_0, i_0)} &= \frac{k_f}{x_0^2} = k_{i2}, \\ \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{(x_0, i_0)} &= -\frac{2k_f i_0^2}{x_0^3} = -k_{x1}, & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \Big|_{(x_0, i_0)} &= \frac{3k_f i_0^2}{x_0^4} = k_{x2}, \\ \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} \Big|_{(x_0, i_0)} &= -\frac{4k_f i_0^2}{x_0^5} = -k_{x3}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Кроме того, положим, что изменения тока и смещения имеют синусоидальный характер. Тогда, воспользовавшись методом гармонической линеаризации, будем иметь выражение (6):

$$F(x, i) = \left[q_i(A_i) + \frac{q'_i(A_i)}{\omega} p \right] \Delta i + \left[q_x(A_x) + \frac{q'_x(A_x)}{\omega} p \right] \Delta x, \quad \left(p = \frac{d}{dt} \right), \quad (6)$$

где с учетом выражения (5):

$$\left. \begin{aligned} q_i &= \frac{1}{\pi A_i} \int_0^{2\pi} F(A_i \sin \psi_i, y) \sin \psi_i d\psi_i = k_i, \\ q'_i &= \frac{1}{\pi A_i} \int_0^{2\pi} F(A_i \sin \psi_i, y) \cos \psi_i d\psi_i = 0, \\ q_x &= \frac{1}{\pi A_x} \int_0^{2\pi} F(i, A_x \sin \psi_x) \sin \psi_x d\psi_x = -\left(k_{x1} + \frac{3}{4} k_{x3} A_x^2 \right) = -k_x, \\ q'_x &= \frac{1}{\pi A_x} \int_0^{2\pi} F(i, A_x \sin \psi_x) \cos \psi_x d\psi_x = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Тогда, принимая во внимание обозначения в выражениях (7), формула электромагнитной силы (6) преобразуется к виду (8):

$$F(x, i) = k_i \Delta i - k_x \Delta x. \quad (8)$$

Электромагнитная сила и сила тяжести равны в точке равновесия. Подстановка (8) в (1) позволяет получить дифференциальное уравнение (9) системы магнитной левитации в точке (x_0, i_0) :

$$m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} = -k_i \Delta i + k_x \Delta x - m \frac{d^2 \Delta y}{dt^2}. \quad (9)$$

Передаточная функция по смещению y и току в катушке i получается из (9) и имеет вид (10):

$$W_i(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta I(s)} = \frac{-k_i}{ms^2 - k_x}. \quad (10)$$

У передаточной функции (10) имеется полюс в правой части комплексной плоскости, что по критерию Рауса говорит о неустойчивости системы магнитной левитации. Вводя в систему ПД-регулирование с обратной связью, возможно получить устойчивую систему (рис. 2).

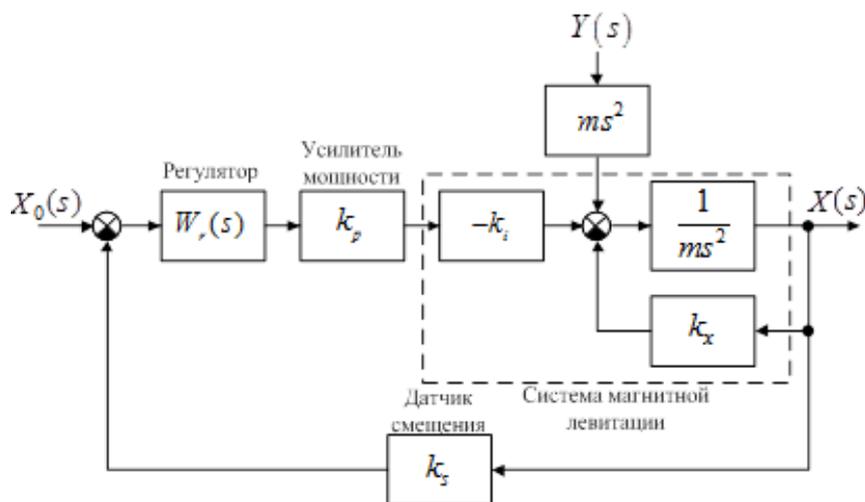


Рисунок 2. Структурно-функциональная схема системы магнитной левитации с обратной связью по смещению «y»

Figure 2. Structural and functional diagram of the magnetic levitation system with "y" displacement feedback

Введение пропорционально-дифференцирующего регулятора с передаточной функцией $W_r(s) = k_r + T_r s$ позволяет переместить полюс передаточной функции в левую полуплоскость комплексной плоскости и сделать систему устойчивой.

Выражение передаточной функции системы магнитной левитации с обратной связью по смещению имеет вид (11):

$$W_y(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta Y(s)} = \frac{ms^2}{ms^2 - k_x + k_i k_a k_s W_r(s)}. \quad (11)$$

Подставим $s=j\omega$ в уравнение (11) и получаем (12):

$$W_y(j\omega) = \frac{-m\omega^2}{(k_i k_a k_s k_r - k_x - m\omega^2) + j\omega(k_i k_a k_s T_r)}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) можно получить выражения для коэффициента жесткости k_e и коэффициент демпфирования c_e (13):

$$k_e = k_i k_a k_s k_r - k_x, \quad c_e = k_i k_a k_s T_r. \quad (13)$$

Собственная угловая частота датчика равна (14):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_e}{m}}, \quad (14)$$

а коэффициент затухания составляет (15):

$$D = \frac{c_e}{2\sqrt{mk_e}}. \quad (15)$$

Как видно из (13), k_e и c_e определяются исходными параметрами вибродатчика, а также системы регулирования. Поэтому если параметры вибродатчика не изменяются, то можно получить необходимые характеристики системы путем изменения параметров системы регулирования.

Выражение передаточной функции системы (11) с учетом выражений (13)-(15) принимает вид (16):

$$W_x(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\omega_0 Ds + \omega_0^2}. \quad (16)$$

Для разработки цифровой модели вибропреобразователя и обоснованного выбора ее параметров необходимо по передаточной функции аналоговой модели (16) получить системную функцию цифровой модели. Для этого воспользуемся тремя следующими z-формами (17), (18) и (19):

$$s \approx \frac{1-z^{-1}}{\Delta \cdot z^{-1}} \quad (\text{метод прямой разности}); \quad (17)$$

$$s \approx \frac{1-z^{-1}}{\Delta} \quad (\text{метод обратной разности}); \quad (18)$$

$$s \approx \frac{1-z^{-1}}{\Delta \cdot z^{-1}} \quad (\text{метод Тустена или билинейное z-преобразование}). \quad (19)$$

Использование z-форм (17), (18), (19), позволяет перейти в выражении (16) от преобразования Лапласа к z-преобразованию (20):

$$W_x(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2}}. \quad (20)$$

Здесь для прямой разности (17) актуально (21):

$$a_0 = 1, \quad a_1 = -2, \quad a_2 = 1, \quad b_1 = 2 - 2\omega_0 D\Delta, \quad b_2 = -(1 - 2\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2); \quad (21)$$

для обратной разности (18) актуально (22):

$$a_0 = \frac{1}{1 + 2\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}, \quad a_1 = -\frac{2}{1 + 2\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}, \quad a_2 = \frac{1}{1 + 2\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2},$$

$$b_1 = \frac{2 + 2\omega_0 D\Delta}{1 + 2\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}, \quad b_2 = -\frac{1}{1 + 2\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}; \quad (22)$$

для билинейного z-преобразования (19) актуально (23):

$$a_0 = \frac{4}{4 + 4\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}, \quad a_1 = -\frac{8}{4 + 4\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}, \quad a_2 = \frac{4}{4 + 4\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2},$$

$$b_1 = \frac{8 - 2\omega_0^2 \Delta^2}{4 + 4\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}, \quad b_2 = -\frac{4 - 4\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}{4 + 4\omega_0 D\Delta + \omega_0^2 \Delta^2}. \quad (23)$$

Системной функции (20) соответствует разностное уравнение (24) и структурная схема цифровой модели, представленная на рис. 3:

$$y_k = a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + b_1 y_{k-1} + b_2 y_{k-2}. \quad (24)$$

Как видно из полученных результатов, трем цифровым моделям соответствует одна и та же по структуре системная функция (20) и разностное уравнение (24), отличие заключается лишь в значении коэффициентов (21), (22), (23).

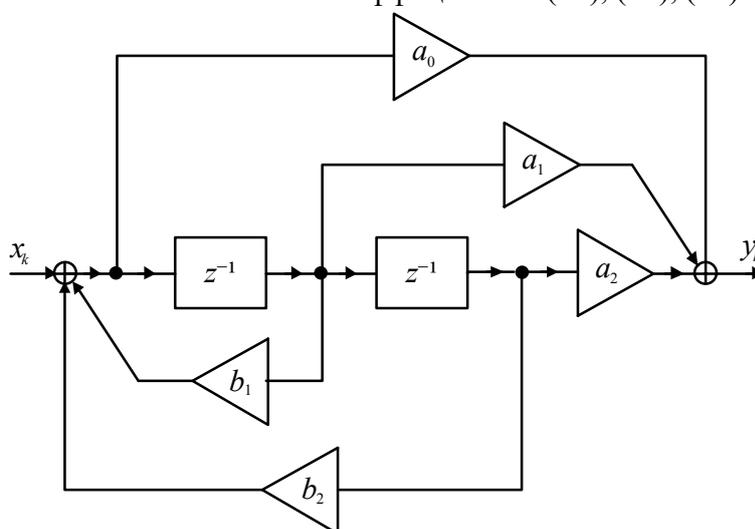


Рисунок 3. Каноническая структурная схема рекурсивной цифровой модели системы
Figure 3. Canonical structural diagram of the recursive digital model of the system

Для исследования устойчивости полученных цифровых моделей заметим, что преобразование вида (25):

$$z = \frac{w+1}{w-1} \quad (25)$$

взаимно-однозначно отображает левую полуплоскость комплексной переменной w на единичный круг в комплексной плоскости z с центром в точке $z=0$.

Возьмем характеристическое уравнение, полученное из (20),

$$z^2 - b_1 z - b_2 = 0$$

и, подставив в него переменную z , выраженную через переменную w согласно формуле (25), получим:

$$(1 - b_1 - b_2)w^2 + 2(1 + b_2)w + (1 + b_1 - b_2) = 0.$$

С учетом выражений (21), (22), (23) это уравнение можно записать в виде:

для прямой разности:

$$\omega_0^2 \Delta^2 w^2 + 2(2\omega_0 D \Delta - \omega_0^2 \Delta^2) w + (4 - 4\omega_0 D \Delta + \omega_0^2 \Delta^2) = 0;$$

для обратной разности:

$$\omega_0^2 \Delta^2 w^2 + 2(2\omega_0 D \Delta + \omega_0^2 \Delta^2) w + (4 + 4\omega_0 D \Delta + \omega_0^2 \Delta^2) = 0;$$

для билинейного z -преобразования:

$$\omega_0^2 \Delta^2 w^2 + 4\omega_0 D \Delta \cdot w + 4 = 0.$$

Согласно критерию Рауса-Гурвица цифровая модель устойчива, если выполняются неравенства:

для прямой разности (26):

$$\begin{cases} \omega_0^2 \Delta^2 > 0, \\ 2\omega_0 D \Delta - \omega_0^2 \Delta^2 > 0, \\ 4 - 4\omega_0 D \Delta + \omega_0^2 \Delta^2 > 0. \end{cases} \quad (26)$$

для обратной разности (27):

$$\begin{cases} \omega_0^2 \Delta^2 > 0, \\ 2\omega_0 D \Delta + \omega_0^2 \Delta^2 > 0, \\ 4 + 4\omega_0 D \Delta + \omega_0^2 \Delta^2 > 0. \end{cases} \quad (27)$$

для билинейного z -преобразования (28):

$$\begin{cases} \omega_0^2 \Delta^2 > 0, \\ \omega_0 D \Delta > 0. \end{cases} \quad (28)$$

Так как $\Delta > 0$ и $\omega_0 > 0$ то для прямой разности неравенства (26) могут быть переписаны в виде (29)

$$\begin{cases} D < 1, \\ \Delta < \frac{2D}{\omega_0}. \end{cases} \quad (29)$$

Для обратной разности и билинейного z -преобразования неравенства (27) и (28) выполняются при любых значениях ω_0 и D .

Таким образом, при выборе z -формы (17) полученная цифровая модель является устойчивой при выполнении неравенств (29), накладывающих ограничения на выбор коэффициента затухания D и периода дискретизации Δ . При выборе же z -форм (18) или (19) цифровая модель является устойчивой при любых значениях ω_0 и D .

Анализ характеристик предложенного вибродатчика и его цифровых моделей выполнялся для приведенных далее параметров вибропреобразователя и системы регулирования: $m = 0,014$ кг; $N = 280$; $S = 3$ см²; $i_0 = 500$ мА; $x_0 = 6$ мм; $k_a = 6,27$ А/м; $k_s = 2,11$; $A_x = 0,05$ мм; $k_r = 6,3$; $T_r = 1,89 \cdot 10^{-3}$ с; $\omega_0 = 0,273$ рад/с; $D = 0,671$; $\Delta = 0,01$ с.

По передаточной функции (16) аналоговой модели вибропреобразователя были получены выражения переходной $h(t)$, импульсной $g(t)$ и амплитудно-частотной $W_x(\omega)$ характеристик (30):

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= e^{-\omega_0 t D} \cdot \left(\cos(\omega_0 t \sqrt{1-D^2}) - \frac{D}{\sqrt{1-D^2}} \cdot \sin(\omega_0 t \sqrt{1-D^2}) \right); \\ g(t) &= \delta(t) - e^{-\omega_0 t D} \cdot \left(2\omega_0 D \cdot \cos(\omega_0 t \sqrt{1-D^2}) + \frac{\omega_0 (1-2D^2)}{\sqrt{1-D^2}} \cdot \sin(\omega_0 t \sqrt{1-D^2}) \right); \\ W_x(\omega) &= \frac{(\omega / \omega_0)^2}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + 4D^2 (\omega / \omega_0)^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

По системной функции цифровой модели вибропреобразователя (20) и соответствующему ей разностному уравнению (24) были получены выражения переходной, импульсной и амплитудно-частотной характеристик (31):

$$\left. \begin{aligned} h_k &= a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + b_1 h_{k-1} + b_2 h_{k-2}, \\ \text{где } t_k &= k\Delta; x_k = \begin{cases} 1, & k \geq 0; \\ 0, & k < 0; \end{cases} \\ g_k &= a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + b_1 g_{k-1} + b_2 g_{k-2}, \\ \text{где } t_k &= k\Delta; x_k = \begin{cases} 1/\Delta, & k = 0; \\ 0, & k \neq 0; \end{cases} \\ W_x(\omega) &= \left| \frac{a_0 + a_1 e^{-j\omega\Delta} + a_2 e^{-2j\omega\Delta}}{1 - b_1 e^{-j\omega\Delta} - b_2 e^{-2j\omega\Delta}} \right|. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

На рисунках 4, 5 и 6 построены графики переходных, импульсных и амплитудно-частотных характеристик вибропреобразователя по выражениям (30) и (31). На рисунках 7, 8 и 9 приведены графики соответствующих абсолютных погрешностей моделирования. Из графиков на рисунке 6 видно, что применение системы магнитной левитации в устройствах измерения и контроля вибраций позволяет уменьшить порог чувствительности прибора и расширить границу в области ультразвуковых частот до 0,1 Гц.

Из сравнительного анализа построенных характеристик следует, что все три разработанные цифровые модели вибропреобразователя являются достаточно точными, погрешность моделирования не превышает 0,1%. Однако наибольшей точностью, как видно из рис. 7, 8 и 9, обладает цифровая модель, построенная с использованием билинейного z-преобразования (на рисунках 8 и 9 график практически сливается с горизонтальной осью). Кроме того, эта модель является устойчивой при любом выборе собственной частоты ω_0 и коэффициента затухания D . Однако следует отметить, что выбор собственной частоты ω_0 определяет низкочастотную границу диапазона измерения.

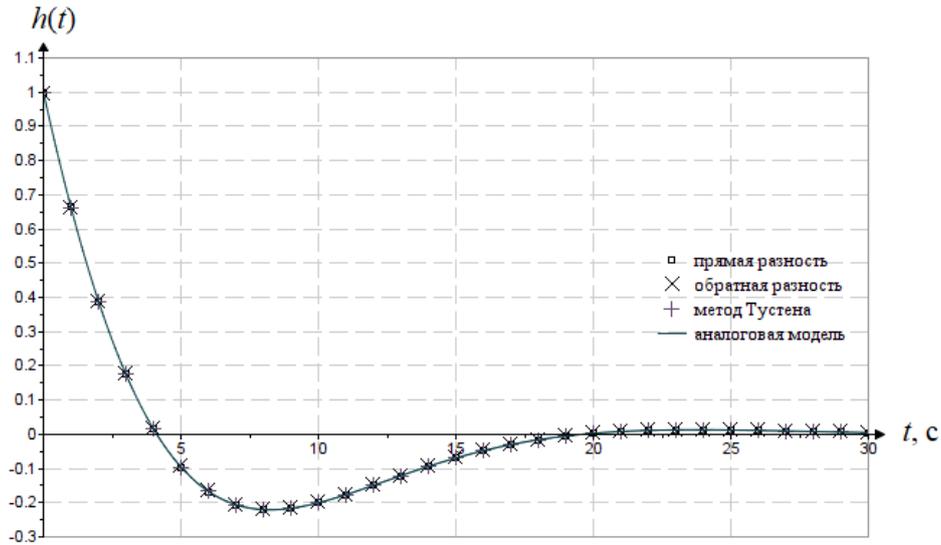


Рисунок 4. Переходные характеристики вибропреобразователя
Figure 4. Transient characteristics of the vibration transducer

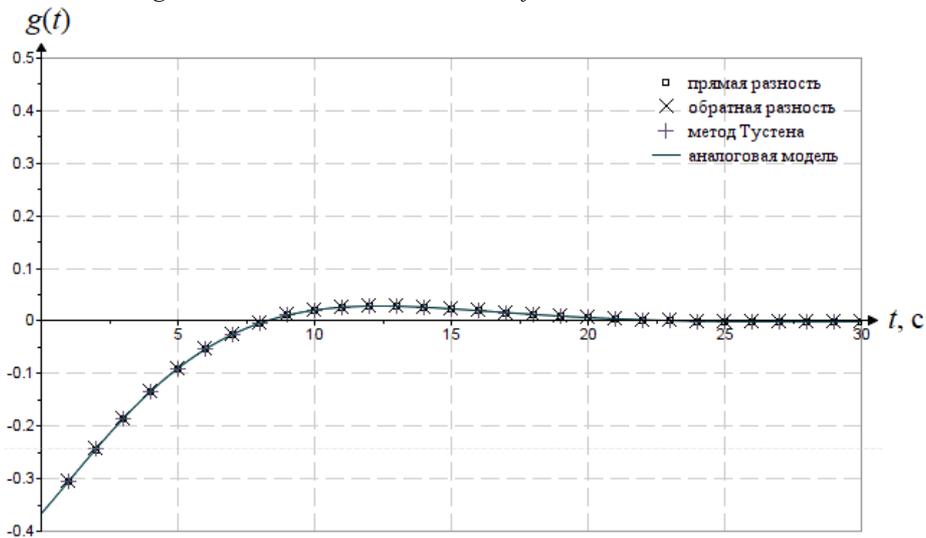


Рисунок 5. Импульсные характеристики вибропреобразователя
Figure 5. Pulse characteristics of the vibration transduce

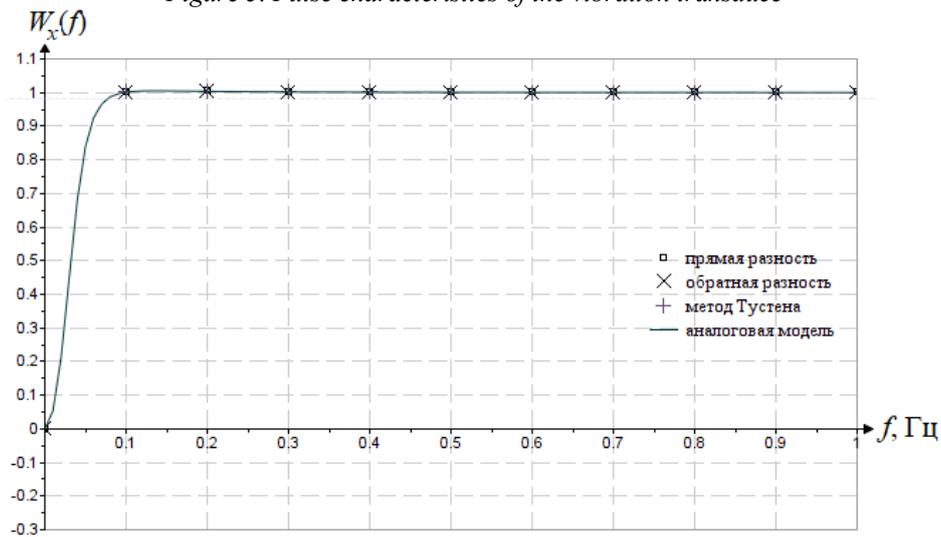


Рисунок 6. Амплитудно-частотные характеристики вибропреобразователя
Figure 6. Amplitude-frequency characteristics of the vibration transducer

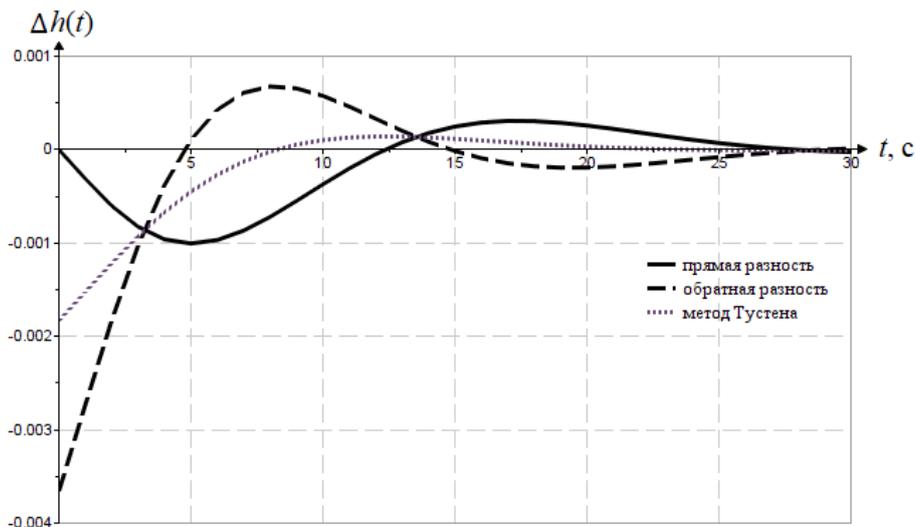


Рисунок 7. Абсолютная погрешность моделирования переходных характеристик вибропреобразователя
Figure 7. Absolute error of modeling of transient characteristics of vibration transducer

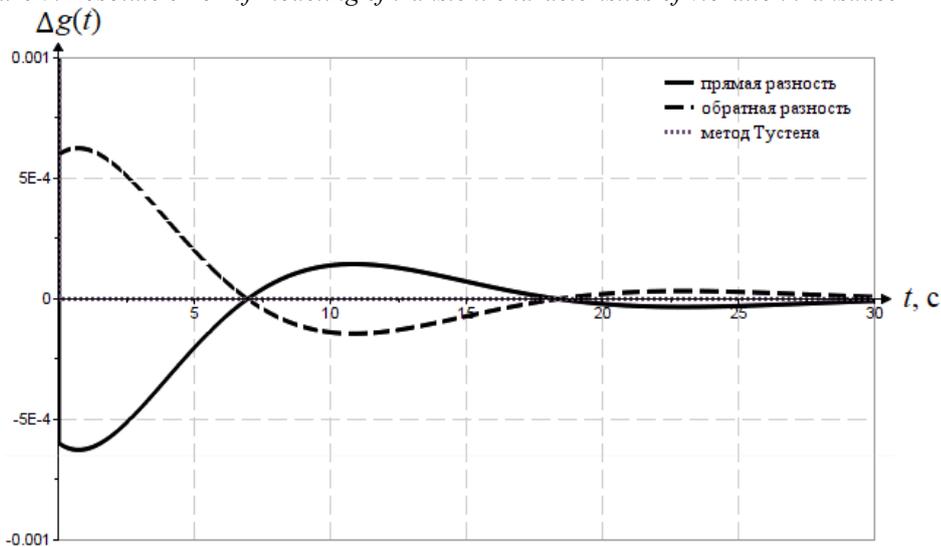


Рисунок 8. Абсолютная погрешность моделирования импульсных характеристик вибропреобразователя
Figure 8. Absolute error of modeling of impulse characteristics of vibration transducer

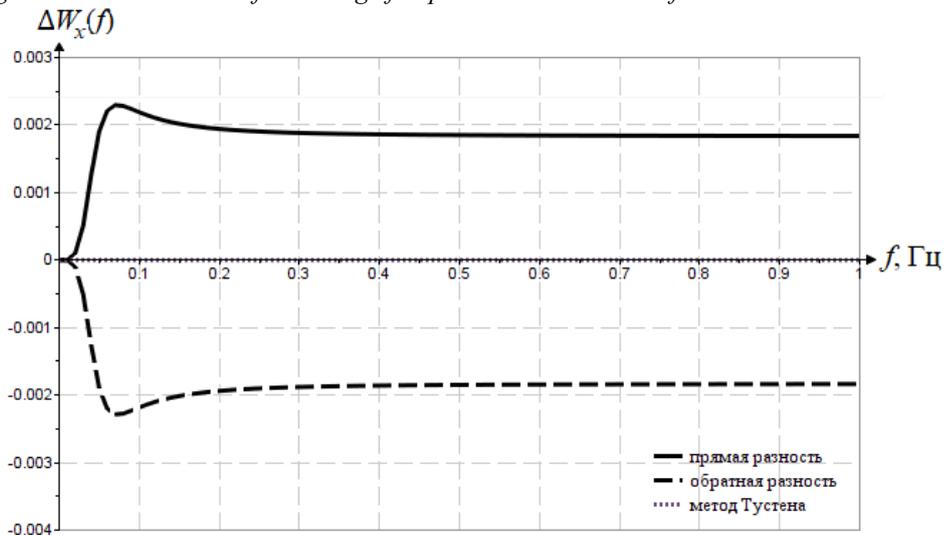


Рисунок 9. Абсолютная погрешность моделирования амплитудно-частотные характеристик вибропреобразователя
Figure 9. Absolute error of modeling of amplitude-frequency characteristics of the vibration transducer

Заключение

Применение системы магнитной левитации в устройствах измерения и контроля вибраций позволяет исключить сухое трение в подвижных частях преобразователя, уменьшить порог чувствительности прибора и расширить границу в области ультранизких частот до 0,1 Гц.

Повышенная точность представленных математических моделей обусловлена учетом нелинейного характера электромагнитной силы. Полученные в статье цифровые модели вибропреобразователя являются рекурсивными цифровыми фильтрами второго порядка, для которых получены системные функции и соответствующие разностные уравнения. Как для аналоговой, так и для цифровых моделей вибропреобразователя выведены выражения и построены графики переходных, импульсных и частотных характеристик. Проведен сравнительный анализ погрешностей моделирования, который позволяет сделать вывод о точности и адекватности разработанной цифровой модели, погрешность моделирования не превышает 0,1%. Как показал проведенный анализ, наибольшей точностью обладает цифровая модель, построенная с использованием билинейного z-преобразования. Кроме того установлено, что эта модель является устойчивой при любом выборе исходных параметров системы.

Использование полученных цифровых моделей вибропреобразователя позволит более просто моделировать его работу при различного рода входных воздействиях и обоснованно выбирать исходные параметры вибропреобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР ; под ред. А.А. Абагяна. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с.
2. Zheng D., Liu Y., Guo Z., Zhao X., Fan S. Theory and experiment research for ultra-low frequency maglev vibration sensor. *The Review of scientific instruments*. 2015;(86)10:105001. <https://doi.org/10.1063/1.4931692>
3. Seo H., Lim J., Choe G.-H., Choi J.-Y., Jeong J.-H. Algorithm of linear induction motor control for low normal force of magnetic levitation train propulsion system. *IEEE Transactions on magnetics*. 2018;54(11):1–4. Art no. 8207104. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2842222>.
4. Yoo S.J., Kim S., Cho K.H. et al. Data-driven self-sensing technique for active magnetic bearing. *International Journal of precision engineering and manufacturing*. 2021;22:1031–1038. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00525-x>
5. Lei Y.J., Li R.J., Chen R.X., Zhang L.S., Hu P.H., Huang Q.X. A high-precision two-dimensional micro-accelerometer for low-frequency and micro-vibrations. *Precision Engineering*. 2021(67):419-427. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.10.011>
6. Li R.J., Lei Y.J., Chang Z.X., Zhang L.S., Fan K.C. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement. *Sensors*. 2018;18(9):2910. <https://doi.org/10.3390/s18092910>
7. Tummalapalli M., Kommula S.R., Sagiraju P., Vantakula V., Murty A.S. A review of principles and illustration of the physical working model of magnetic levitation. *International Journal of theoretical and applied mechanics*. 2017;(12)4:741–758. URL: <https://dokumen.tips/documents/a-review-of-principles-and-illustration-of-the-physical-maglev-derived-from.html?page=1> (дата обращения: 12.05.2023).
8. Шилин А.Н., Седов М.Н. Моделирование вибропреобразователя с электромагнитным подвесом. *Приборы*. 2008;12:41–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11712067> (дата обращения: 12.05.2023).
9. Шилин А.Н., Седов М.Н. Определение погрешности вибропреобразователя с электромагнитным подвесом. *Контроль. Диагностика*. 2010;5:60–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14998501> (дата обращения: 12.05.2023).
10. Шилин А.Н., Макартичян С.В., Мустафа М.Н. Математическая модель электромеханических вибропреобразователей на основе эффекта левитации. *Контроль. Диагностика*. 2023;1:22–29. URL: <http://www.td-j.ru/index.php/component/content/article/298-2023-01--january/2995-022-029> (дата обращения: 12.05.2023).
11. Yu Y., Sun X., Zhang W. Modeling and decoupling control for rotor system in magnetic levitation wind turbine, *IEEE Access*. 2017;5:15516–15528. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2732450>
12. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. Москва: Наука, 1988. 256 с.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Шилин А.Н. – научное руководство проектом, общее руководство и планирование исследований;

Макартичан С.В. – разработка методической части исследований, обработка и анализ результатов исследований, подготовка текста научной статьи к опубликованию;

Барашков И.С. – обработка и анализ результатов исследований, подготовка и согласование заключения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Николаевич Шилин, д.т.н., профессор кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6416-4357>

e-mail: eltech@vstu.ru

Сергей Валерьевич Макартичан, к.т.н., доцент кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5840-9932>

e-mail: hymir@mail.ru

Илья Сергеевич Барашков, студент ИИТ-473, Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0943-9689>

e-mail: ilyasharab9845@gmail.com

Поступила в редакцию 21.06.2023

После доработки 21.08.2023

Принята к публикации 29.08.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Shilin A.N. – scientific research supervision, overall project management and research planning;

Makartichyan S.V. – development of the methodological part of research, processing and analysis of research results, preparation of the text of a scientific article for publication;

Barashkov I.S. – processing and analysis of research results, preparation and coordinating the conclusion.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexander N. Shilin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6416-4357>

e-mail: eltech@vstu.ru

Sergey V. Makartichyan, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5840-9932>

e-mail: hymir@mail.ru

Ilya S. Barashkov, student ИИТ-473, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0943-9689>

e-mail: ilyasharab9845@gmail.com

Received 21.06.2023

Revision 21.08.2023

Accepted 29.08.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.384.039
DOI 10.26583/gns-2023-03-05
EDN PGYCOF



Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР

К.Н. Проскуряков  , М.С. Хвостова , Р.М. Исмаил , К.А. Яковлев 

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

 proskuriakovkn@mpei.ru

Аннотация. Экспериментально доказано, что главной причиной возбуждения вибраций оборудования и внутрикорпусных устройств главного циркуляционного контура (ГЦК) являются акустические стоячие волны (АСВ), которые образуются, как результат сложения двух бегущих в противоположных направлениях волн и главные циркуляционные насосы (ГЦН). Использование междисциплинарного подхода позволило создать цифровую акустическую модель системы компенсации давления (КД) с присоединёнными к нему трубопроводами и доказать, что он представляет собой автоколебательную систему, генерирующую акустические стоячие волны (АСВ) подобно одновременному функционированию нескольких резонаторов Гельмгольца. Каждый резонатор Гельмгольца в КД способен подавить определенную частоту АСВ, генерируемых реактором, которая зависит от температуры теплоносителя. Расчёт частот акустических волн, иначе говоря, собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ), в системе компенсации давления проведенный по формуле Томсона основан на методе электроакустической аналогии. Акустическая податливость КД и акустическая масса различных сочетаний подключаемых к нему трубопроводов позволяют рассчитать СЧКДТ, в рассматриваемой системе, по формуле, представленной в виде акустических аналогов индуктивности и емкости. Рассчитаны акустические параметры системы резонаторов Гельмгольца образованных КД и соединительным трубопроводом с горячей ниткой третьей петли в номинальном режиме эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000. Разработана и верифицирована технология, преимуществом которой является использование КД, для демпфирования АСВ, частоты которых попадают в полосу пропускания вибрации конструктивных элементов первого контура. Приведено расчётное и экспериментальное доказательство ранее неизвестной способности КД демпфировать в широком диапазоне частот АСВ генерируемые реактором и обоснована возможность предотвращать резонансы с вибрациями оборудования и конструкциями АЭС.

Ключевые слова: система компенсации давления, демпфирование АСВ, АСПМ пульсаций давления, резонатор Гельмгольца, собственная частота колебаний, вибрации срок службы, маневренный режим, оборудование, акустическое поле.

Для цитирования: Проскуряков К.Н., Хвостова М.С., Исмаил Р.М., Яковлев К.А. Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):51–61. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-05>

Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER

Konstantin N. Proskuryakov , Marina S. Khvostova ,
Ragy M. Ismail , Kirill A. Yakovlev 

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

 proskuriakovkn@mpei.ru

Abstract. It is experimentally proven that the main cause of vibration excitation of equipment and internals of the main circulation circuit (MCC) are acoustic standing waves (ASW) and main circulation pumps (MCP). Usage of an interdisciplinary approach made it possible to create a digital acoustic model of pressurizer system with pipelines attached to it and prove that it is a self-oscillating system capable of generating acoustic standing waves (ASW) similar to simultaneous operation of several Helmholtz resonators. Each Helmholtz resonator in

pressurizer is able to suppress a certain frequency of ASW generated by the reactor, which depends on coolant temperature. Determination of natural frequencies of coolant pressure oscillations (NFCPO) in pressurizer using Thomson formula is based on method of electroacoustic analogy. Acoustic compliance of pressurizer and acoustic mass of various combinations of pipelines connected to it make it possible to calculate NFCPO, in the system under consideration, according to the formula presented in the form of acoustic analogues of inductance and capacitance. Acoustic parameters of a system of Helmholtz resonators formed by a pressurizer and a connecting pipeline with hot leg of the third loop in nominal operating mode of NPP with WWER-1000 are calculated. A technology has been developed and verified, advantage of which is usage of a pressurizer for damping ASW, frequencies of which fall within vibration bandwidth of primary circuit structural elements. Calculation and experimental proof of previously unknown ability of pressurizer to damp ASW generated by the reactor in a wide frequency range is given, and possibility of preventing resonances with vibrations of equipment and NPP structures is substantiated.

Keywords: pressurizer system, ASW damping, ASPD of pressure pulsations, Helmholtz resonator, natural oscillation frequency, vibration life, maneuvering mode, equipment, acoustic field.

For citation: Proskuryakov K.N., Khvostova M.S., Ismail R.M., Yakovlev K.A. Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):51–61 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-05>

Введение

Одной из приоритетных проблем является создание методов, технических средств и программного обеспечения для раннего выявления и предотвращения условий эксплуатации, приводящих к совпадению резонансному или близкому к резонансному взаимодействию колебаний и вибраций внутрикорпусных устройств (ВКУ) оборудования, тепловыделяющих сборок (ТВС) и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) с СЧКДТ. Источниками колебаний давления теплоносителя являются: ГЦН, вращение которых приводит к появлению в спектре пульсаций давления частот комбинационных и кратных его оборотной частоте, турбулентность потока, вихреобразования в зонах изменения проходных сечений и направлений движения потока, а также СЧКДТ, поскольку теплоноситель обладает, как и любой конструктивный элемент, массой и упругостью. Эти колебания, фиксирующиеся датчиками, расположенными в различных точках проточной части первого контура вызывают вибрации оборудования и отдельных его элементов. Вибрации могут стать причиной повреждения трубных систем, ВКУ оборудования и ТВС [1-6].

В настоящее время во всех передовых странах процессы резонансного взаимодействия вибраций оборудования и колебаний теплоносителя в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) исследованы недостаточно и требования их предотвращения не предусмотрены нормативной документацией. Резонансное разрушение конструкций происходит в тех случаях, когда СЧКДТ возникающие при авто генерации АСВ начинают сравниваться с собственными частотами колебаний конструкции. Если СЧКДТ попадет в полосу пропускания собственных колебаний оборудования или его конструктивных элементов, то эти колебания усиливаются, что может привести к механическим повреждениям оборудования [7-9]. Однако, исследованию механизма генерации АСВ и их подавления не уделено должного внимания.

Предотвращение условий эксплуатации, приводящих к повышению вибраций из-за возникновения виброакустических резонансов (ВАР) в первом контуре АЭС с ВВЭР-1000 должно быть обеспечено внесением дополнений в регламент эксплуатации и осуществлено средствами штатных систем АСУТП АЭС с ВВЭР. При этом повышается эффективность и срок службы основного оборудования, а также обеспечивается безотказная работа энергоустановок в маневренных режимах, которая относится к числу приоритетных требований к АЭС нового поколения.

Современные аналитические математические модели базируются на результатах расчетов распределения масс и жесткости при определенных граничных условиях. Эти

расчеты обычно выполняются по методу конечных элементов и в результате выводится система большого числа дифференциальных уравнений, которые рассчитываются с помощью специального программного обеспечения типа ANSYS [4,5,10,11]. При этом отсутствует возможность распознавания источников авто генерации пульсаций давления в ядерном реакторе.

В работе К.Н. Проскурякова «Верификация цифровой акустической модели реактора в пусковых и штатных режимах работы АЭС с реакторами ВВЭР» [7] показано, что реактор является автоколебательной системой, с отрицательной диссипацией, генерирующей акустические волны, параметры которых, не зависят от начальных условий и определяются только геометрическими характеристиками оборудования первого контура и термодинамическими характеристиками теплоносителя.

Недостатком ANSYS, при решении задач в области акустики и динамики жидкости, является отсутствие математического моделирования механизма возникновения автоколебаний в акустической системе первого контура и анализа, возникающих в нём системных эффектов, при которых акустические свойства системы не сводятся к сумме свойств колебательных процессов в отдельных составляющих её акустических элементах, но придают системе новые свойства, отсутствующие у отдельно взятых элементов.

Следствием этого является непригодность ANSYS не только для прогнозирования и предотвращения ВАР в эксплуатационных режимах, но, что особенно важно, при авариях и воздействии сейсмических и ударных нагрузок.

Создание в НИУ «МЭИ» Цифровой акустической модели компенсатора давления АЭС с ВВЭР (ЦАМКД ВВЭР) стало возможным благодаря объединению трех фундаментальных научных результатов, полученных за период более ста лет: формулы Томсона-Кельвина для разряда конденсатора, полученной в 1853 г.; открытия свойства акустического резонатора, сформулированных Гельмгольцем в 1869 г.; доказательство К.Н. Проскуряковым в 1984 г. обоснованности применимости метода электроакустических аналогий для исследования пульсирующих течений однофазной и двухфазной среды при наличии отрицательной диссипации.

В публикации К.Н. Проскурякова «Создание цифровой акустической модели компенсатора давления атомной электрической станции с водо-водяным энергетическим реактором и ее практическое применение» [12] приведена информация о теоретическом и расчётном обосновании ранее неизвестных свойств компенсатора давления, как акустического фильтра, способного подавлять акустические волны, частоты которых попадают в полосу пропускания вибраций оборудования, внутрикорпусных устройств и опорных конструкций. В работах «Верификация цифровой акустической модели реактора в пусковых и штатных режимах работы АЭС с реакторами ВВЭР» и «Цифровая акустическая модель водо-водяного реактора» [7,8] дано описание механизма возникновения АСВ и определения их частот, проведенное с помощью идеализированных моделей в виде резонаторов Гельмгольца, а также результаты верификации ЦАМЯР ВВЭР-440, свидетельствующие о её достоверности и применимости для прогнозирования акустического поля РУ ВВЭР иных модификаций, с достаточной для практического применения точностью. Созданная цифровая акустическая модель компенсатора давления не имеет аналогов, её практическая значимость заключается в совершенствовании процессов проектирования и эксплуатации АЭС путём учета влияния конструкций водо-водяного энергетического реактора, компенсатора давления, трассировки трубопроводов на сейсмостойкость, безопасность, эффективность и срок службы, оборудования.

Целью работы является обоснование правомерности гипотезы К.Н. Проскурякова о существовании ранее неизвестного свойства системы компенсации давления ВВЭР, которое проявляется в том, что акустическое поле системы компенсации давления,

образованное стоячими волнами, адекватно воспроизводится одновременным функционированием нескольких резонаторов Гельмгольца. Эти резонаторы демпфируют соответствующую часть акустического поля остального оборудования первого контура АЭС с ВВЭР.

Система компенсации давления

Система КД (рис. 1) обеспечивает поддержание давления в первом контуре в стационарных режимах и ограничение отклонений давления в переходных и аварийных режимах. Система КД включает в себя паровой компенсатор давления с комплектом электронагревателей для испарения воды, импульсно-предохранительные устройства (ИПУ), барботер, трубопроводы и арматуру.

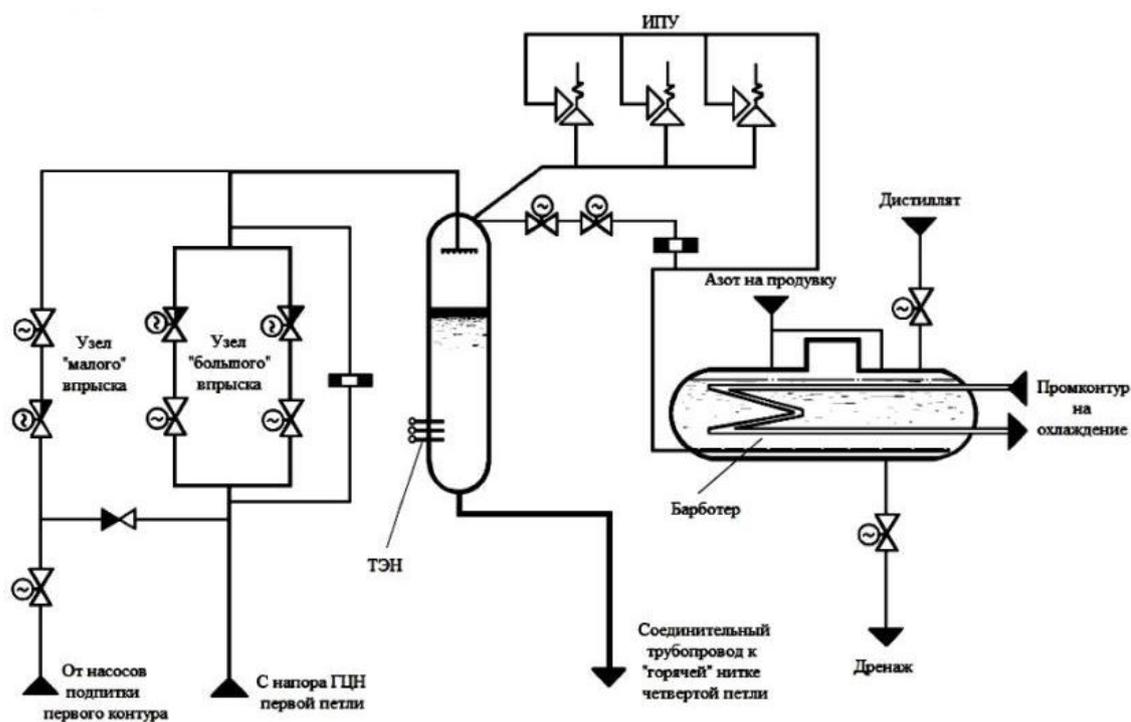


Рисунок 1. Система компенсации давления
Figure 1. Pressurizer system

Ограничение отклонений давления от заданного значения достигается за счет сжатия или расширения паровой подушки в КД. При увеличении давления паровая подушка сжимается, в результате чего происходит конденсация пара и ограничивается рост давления в первом контуре. В верхнее днище КД вварен трубопровод впрыска, соединяющий главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) первой петли с парогазовым объемом КД. Впрыск предназначен для снижения давления в КД и, следовательно, в ГЦТ, а также для расхолаживания КД. Трубопровод через штуцер впрыска соединяется внутри сосуда компенсатора с коллектором распылителей. Впрыск условно разделяется на узел «большого» и «малого» впрыска. «Большой» впрыск имеет две идентичных параллельных нитки с запорной и запорно-регулирующей арматурой.

Линия «большого» впрыска имеет байпас диаметром 18 мм, обеспечивающий, при четырех работающих ГЦН перепад давления 0,6 МПа и расход $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Байпасная линия обеспечивает постоянную циркуляцию теплоносителя через трубопровод впрыска, с целью поддержания разогретого состояния и перемешивания среды для выравнивания концентрации борной кислоты и реагентов в первом контуре и в КД. ИПУ предназначены для сброса пара из КД в случае превышения давления в I контуре

выше заданного при неисправности впрыска или недостаточной его эффективности. ИПУ состоит из главного предохранительного клапана, импульсных клапанов, электротехнических устройств и трубопроводов связи.

Барботер представляет собой горизонтальный цилиндрический сосуд, заполненный «чистым» конденсатом. Внутри барботера размещены 2 раздающих коллектора, к ним по трубопроводу подводится пар от импульсного предохранительного клапана (ИПК) КД. По длине каждого коллектора расположены сопла, которые повышают эффективность конденсации пара.

КД (рис. 2) – это вертикальный сосуд, который установлен на цилиндрической опоре. В верхнем днище имеется люк для осмотра внутренних конструкций. Люк имеет штуцер под трубопровод сброса парогазовой смеси в барботер и под уровнемеры.

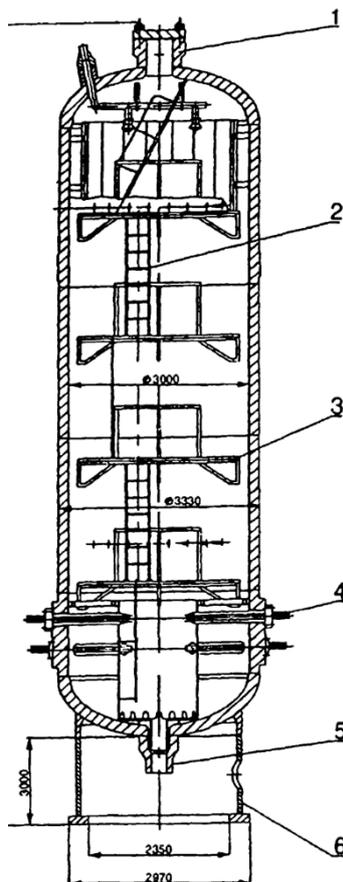


Рисунок 2. КД ВВЭР-1000: 1 – горловина; 2 – лестница; 3 – площадка; 4 – блок трубчатых электронагревателей; 5 – патрубок; 6 – опора

Figure 2. WWER-1000 pressurizer: 1 – neck; 2 – ladder; 3 – platform; 4 – block of tubular electric heaters; 5 – branch pipe; 6 – support

Механизм генерации акустических волн

Рассмотрим компенсатор давления, как резонатор Гельмгольца, способный генерировать несколько АСВ, частоты которых зависят от термодинамических параметров теплоносителя в системе компенсации давления и её геометрических размеров. Частота АСВ рассчитывается с учётом допустимой погрешности определения температуры и давления теплоносителя.

Определение СЧКДТ образующиеся в рассматриваемой, системе резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом проведено по формуле Томсона, представленной в виде акустических аналогов индуктивности и емкости (1) и полученной при использовании метода электроакустической аналогии [7]. Акустическая податливость КД и акустическая

масса различных сочетаний подключаемых к нему трубопроводов позволяют рассчитать СЧКДТ:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC}}, \quad (1)$$

где f_0 – расчетное значение СЧКДТ, Гц;

C – акустическая податливость среды, $\text{м}^4 \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$;

m – сумма акустической массы системы, состоящей из акустических масс (акустической массой теплоносителя внутри КД пренебрегаем) подсоединенных к ней трубопроводов, $\text{кг}/\text{м}^4$, и ее расчет производится по формулам (2) и (3), а акустическая податливость рассчитывается по формуле (4):

$$m = \frac{\rho L}{S}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{m_n} = \sum_i^n \frac{1}{m_i}, \quad (3)$$

$$C = \frac{L \cdot S}{\rho \cdot a^2}, \quad (4)$$

где L – длина сечения;

S – площадь поперечного сечения;

ρ – плотность среды;

a – средняя скорость звука, рассчитанная по формуле Н.Е. Жуковского (5) с учетом деформации труб и сжимаемости среды:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{D}{E_m \cdot \delta} + \frac{1}{\rho \cdot c^2} \right)}}, \quad (5)$$

где D – диаметр сечения;

E_m – объемный модуль упругости материала сечения;

δ – толщина стенки сечения;

c – скорость звука в среде.

Схема соединительного трубопровода КД и горячей нитки третьей петли показана на рисунке 3.

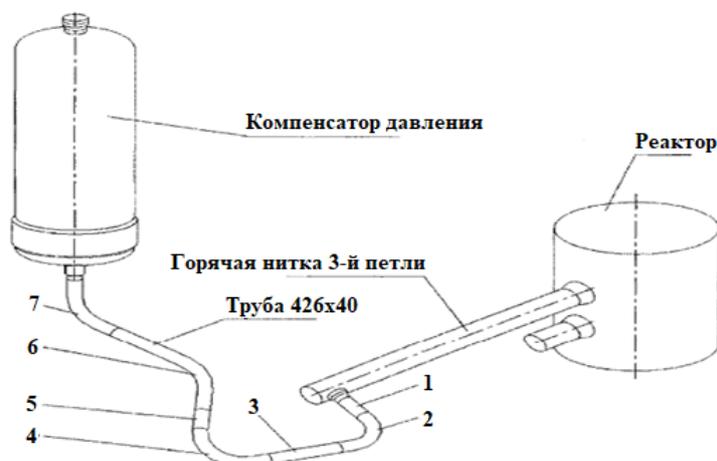


Рисунок 3. Схема соединительного трубопровода КД с горячей ниткой третьей петли
Figure 3. Scheme of pressurizer connecting pipeline with the hot leg of the third loop

КД соединен с горячей ниткой четвертой петли не имеющей арматуры трубопроводом, диаметр которого 400 мм. Через него теплоноситель перетекает из первого контура в компенсатор давления и обратно при изменениях температуры первого контура. В таблице 1 приведены значения СЧКДТ в участках соединительного трубопровода КД с горячей ниткой третьей петли при номинальном режиме работы реактора.

Таблица 1. СЧКДТ при номинальном режиме работы реактора

Table 1. NFCPO at the nominal mode of operation of the reactor

Участок	СЧКДТ, f Гц
1	6.855
2	19.83
3	67.653
4	34.544
5	42.488
6	39.812
7	77.016
8	36.7
9	40.837
10	50.123
11,12	148.059
13,14	112.891

Расчет трубопровода «холодного» впрыска

В верхней части днища компенсатора давления установлен трубопровод «холодного» впрыска, который соединяет напорный трубопровод насоса первой петли ГЦК с верхним паро-газовым объемом КД. Впрыскиваемая жидкость снижает давление в КД и, соответственно, в первом контуре реактора, а также охлаждает КД. «Холодный» впрыск разделен на две части: «малый» впрыск с трубопроводом 100 мм и «большой» впрыск с трубопроводом 200 мм. На рисунке 4 показана схема трубопровода «холодного» впрыска, обозначены участки, представляющие собой отдельные соответствующие им резонаторы. Всего в трубной системе «холодного» впрыска 14 резонаторов. СЧКДТ конкретных трубопроводов, изображенных на рисунке, можно рассчитать по формуле Проскурякова (6):

$$f = \frac{a}{2 \cdot \pi \cdot l}, \quad (6)$$

где a – скорость распространения ударной волны в упругом трубопроводе, м/с;

l – длина трубопровода, м;

f – частота собственных колебаний давления теплоносителя, Гц.

При различных режимах работы, узлы «большого» и «малого» впрысков могут быть заполнены как водой (переходный процесс), так и паром (останов).

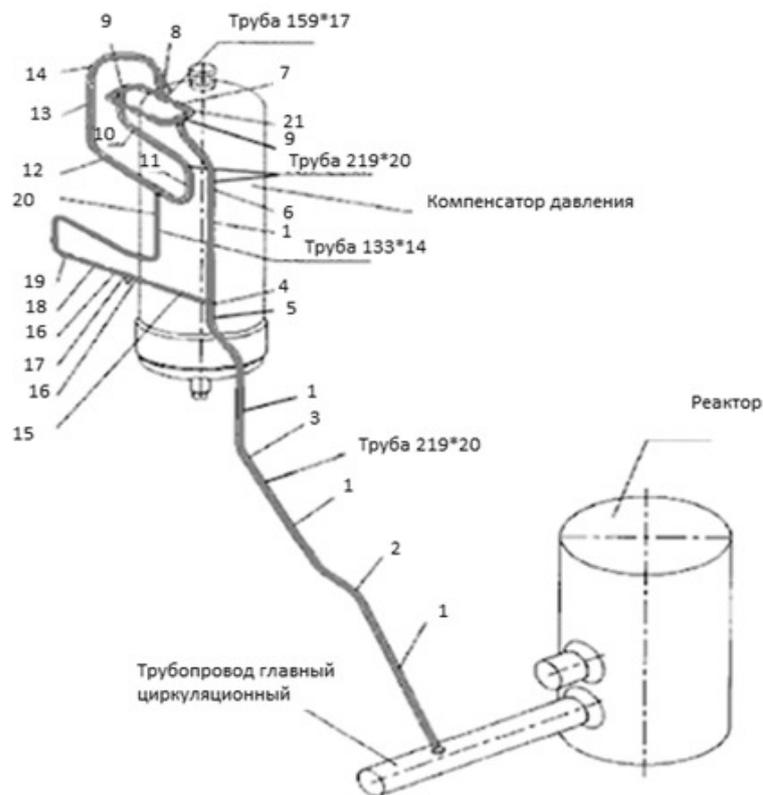


Рисунок 4. Схема трубопровода «холодного» впрыска
Figure 4. Scheme of the "cold" injection pipeline

На рисунке 5 [13] представлены автоспектральные плотности мощности (АСПМ) пульсаций давления теплоносителя, полученные при обработке сигналов от ДПД, установленных в первом контуре.

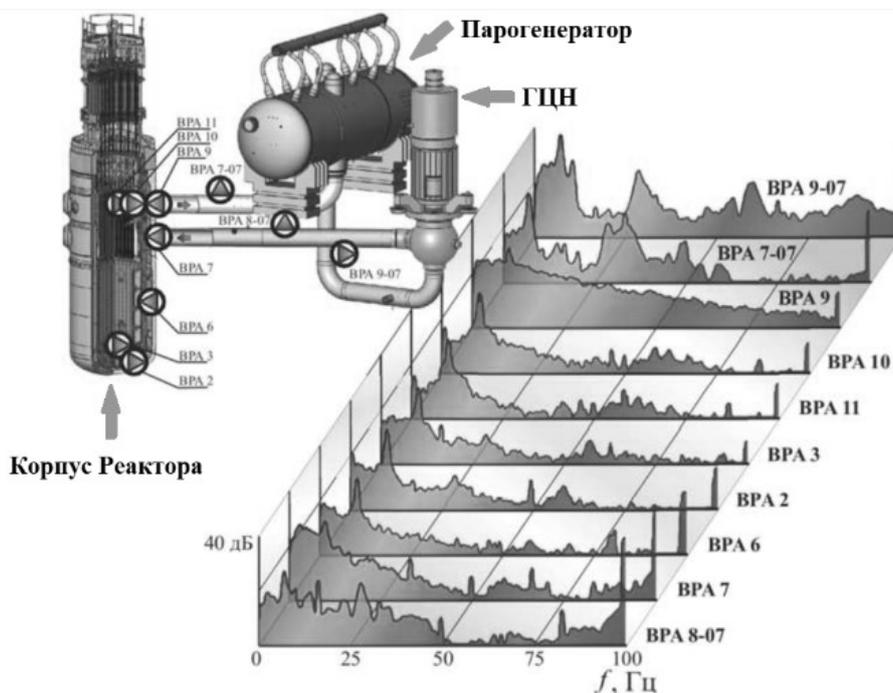


Рисунок 5. Распределение автоспектральной плотности мощности пульсаций давления по контуру РУ серии В-320 при работе четырёх ГЦН на номинальных параметрах [13]
Figure 5. Distribution of the autospectral power density of pressure pulsations along the circuit of the V-320 series reactor plant when four MCPs are operating at nominal parameters [13]

ДПД ВРА 7-07 установлен на петле №4, соединяющей реактор с парогенератором и с помощью дыхательного трубопровода с КД. При сопоставлении АСПМ ВРА-9 с АСПМ ВРА 7-07 видно демпфирование компенсатором давления пульсаций в диапазоне от 50 до 100 Гц (см. рис. 5). На рисунке 6 представлено соответствующее демпфирование динамических напряжений.

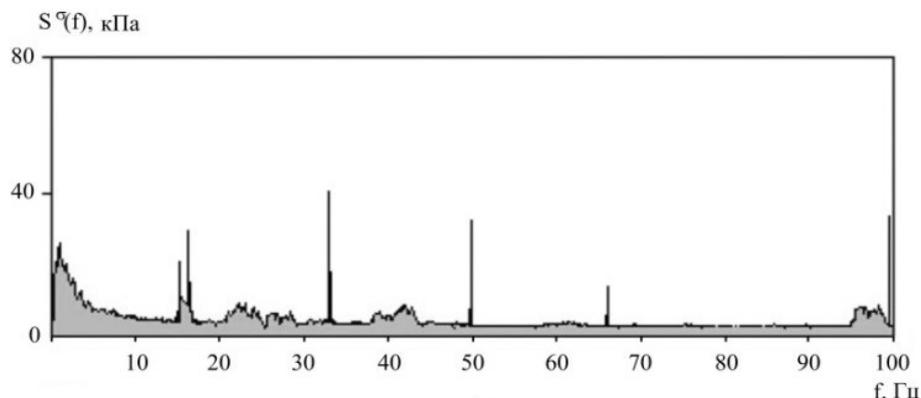


Рисунок 6. Спектрограмма динамических напряжений в шахте реактора на блоке 1 Балаковской АЭС
Figure 6. Spectrogram of dynamic stresses in the reactor shaft at Unit 1 of the Balakovo NPP

В таблице 2 представлены размеры и акустические параметры в номинальном режиме системы резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом с горячей ниткой петли 3, рассчитанные по соответствующим методикам¹ [7].

Таблица 2. Акустические параметры в системе резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом при давлении 16,0 МПа, температура на входе 289 °С, на выходе 322

Table 2. Acoustic parameters in the system of Helmholtz resonators, formed by the NPP pressurizer with WWER-1000 and connecting pipeline at a pressure of 16.0 MPa, inlet temperature 289 °C, outlet temperature 322

Резонатора Гельмгольца	Длина, м	Диаметр, м	Толщина стенки, м	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Скорость звука, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$M, \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$	$C, \frac{\text{м}^4 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}}$	СЧКДТ $f_0, \text{Гц}$
Участок 1 трубопровода	1,253	0,426	0,02	676,3	834,8	5945	3,9E-10	103
Участок 2 трубопровода	3,069	0,426	0,02	676,3	834,8	14562	9,7E-10	42
Участок 3 трубопровода	1,065	0,426	0,02	676,3	834,8	5053	3,3E-10	121
Участок 4 трубопровода	3,8697	0,426	0,02	676,3	834,8	18361	1,2E-09	33
Участки трубопровода 5+6+7	2,3	0,426	0,02	676,3	834,8	46801	3,2E-10	40
	3,8835							
	3,6799							
КД вода	9,167	3	0,165	585	597,7	759	3,1E-07	10
КД пар	3,833	3	0,165	107,4	429,2	58	1,3E-06	17
КД вода и пар	13	3	0,165	-	-	817	1,6E-06	4
Система (КД и трубопровод)	-	-	-	-	-	91541	9,6E-11	53

¹ Александров А.А., Очков А.В., Орлов К.А., Очков В.Ф. Программный комплекс WaterSteamPro. URL: <http://www.wsp.ru/ru/documentation/wsp/6.0/about.htm> (дата обращения: 02.08.2023).

Сопоставление значений СЧКДТ (см. табл. 2) с АСПМ от датчика БПА 9, БПА 9-07, установленного на выходе из реактора и датчика БПА 7-07 (см. рис. 5), а также всех остальных датчиков, показывает гашение СЧКДТ системой резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом с горячей ниткой петли 3. Видны «провалы» АСПМ (см. рис. 5) при следующих значениях СЧКДТ: 42,33,40,10,17,4,53 (Гц).

Заключение

Разработана оригинальная цифровая акустическая модель КД (ЦАМКД), которая является ценным дополнением к ранее разработанным цифровым акустическим моделям оборудования первого контура.

Компенсатор давления и трубопроводы представляют собой несколько одновременно работающих резонаторов Гельмгольца, генерирующих серию АСВ.

Доказано, что акустическое поле системы компенсации давления АЭС с ВВЭР, образованное стоячими волнами, генерируемыми несколькими резонаторами Гельмгольца, демпфирует акустическое поле остального оборудования первого контура АЭС с ВВЭР и обеспечивает безопасность эксплуатации, эффективность работы и срок службы оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Егоров Ю.В. Экспериментальные исследования вибрации твэлов ТВС- 2М и ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя в обоснование вибрационной прочности. *XV Научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ «Гидропресс», 20-21 марта 2013 года : сборник трудов.* ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2013. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2013/documents/kms2013-002.pdf> (дата обращения: 02.08.2023).
2. Bhattachary A., Yu S.D., Kawall G. Numerical simulation of turbulent flow through a 37 element CANDU fuel bundle. *Annals of nuclear energy.* 2012;40(1):87–105. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.10.017>
3. Delafontaine S., Ricciardi G. Fluctuating pressure calculation induced by axial flow through mixing grid. *Nuclear engineering and design.* 2012;(242):233–246. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.09.033>
4. Lui Z.G., Liu Y., Lu J. Numerical simulation of the fluid-structure interaction for two simple fuel assemblies. *Nuclear engineering and design.* 2013;(258):1–12. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.029>
5. Mohany A., Hassan M., Modeling of fuel bundle vibration and the associated wear in a CANDU fuel channel. *Nuclear engineering and design.* 2013;(264):214–222. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.039>
6. Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации. *V Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «Гидропресс», 29 мая - 1 июня 2007 года : сборник трудов.* ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2007. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article56-ru.htm> (дата обращения: 02.08.2023).
7. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E. Verification of a reactor's digital acoustic model in the startup and nominal operation modes of NPPs equipped with VVER reactors. *Thermal engineering.* 2021;68(11):834–840. <https://doi.org/10.1134/S0040601521100049>
8. Proskuryakov K.N. The digital acoustic model of a pressurized water reactor. *Thermal Engineering.* 2021;68(9):673-678. <https://doi.org/10.1134/S0040601521090068>
9. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Ismail R.M. Digital technology for constructing the acoustic field of reactor plants of the VVER type. *2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE).* Moscow, Russian Federation. 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086792>
10. Бугаева В.А., Олексюк Д.А., Киреева Д.Р. Моделирование с помощью CFD-кода поля температуры теплоносителя в головках ТВС АЭС-2006 и ВВЭР-1000. *Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения», 16-18 мая 2018 года, г. Обнинск: сборник трудов.* Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского. Обнинск, 2018. С. 331–341. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37193067> (дата обращения: 02.08.2023).
11. Рябов А.А., Скибин А.П., Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В. Создание цифрового двойника АЭС на основе вычислительной теплогидравлики. *CAD/CAM/CAE Observer.* 2018;7(123):41-45. URL: <http://www.cadcamcae.lv/N123/41-45.pdf> (дата обращения: 02.08.2023).

12. Проскуряков К.Н. Создание цифровой акустической модели компенсатора давления атомной электрической станции с водо-водяным энергетическим реактором и её практическое применение. *Вестник МЭИ*. 2022;(6):126–127. URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/887> (дата обращения: 02.08.2023).

13. Аникин А.А., Хайретдинов В.У. Исследование вибронпряженного состояния внутриреакторного оборудования ВВЭР-1000 при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Ростовской АЭС. *XII Научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ «Гидропресс», 17-18 марта 2010 года : сборник трудов*. ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2010. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2010/documents/kms2010-004.pdf> (дата обращения: 02.08.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Проскуряков К.Н. – создание цифровой акустической модели системы, состоящей из компенсатора давления и присоединённых к нему трубопроводов; анализ результатов расчёта собственных частот колебаний давления теплоносителя;

Хвостова М.С. – разработка программы исследований, систематизация опубликованных результатов экспериментальных исследований вибраций и вибронпряженного состояния реакторного оборудования ВВЭР-1000;

Исмаил Р.М. – систематизация проектной информации, анализ результатов расчётов и оформление материалов статьи;

Яковлев К.А. – проведение расчётов акустического поля системы компенсации давления адекватной нескольким резонаторам Гельмгольца.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Константин Николаевич Проскуряков, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1884-5576>
Wos Researcher ID: I-3583-2017
e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

Марина Сергеевна Хвостова, к.г.н., начальник отдела экологии, радиационной и промышленной безопасности; и.о. зав. кафедрой АЭС, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0239>
e-mail: KhvostovaMS@mpei.ru

Раги Мухаммед Наср Хассанин Исмаил, аспирант кафедры АЭС, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2082-8322>
Wos Researcher ID: IAR-0530-2023
e-mail: IsmailIK@mpei.ru

Кирилл Алексеевич Яковлев, магистр, инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7672-7042>
e-mail: YakovlevKA@mpei.ru

Поступила в редакцию 08.07.2023
После доработки 01.09.2023
Принята к публикации 05.09.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Proskuryakov K.N. – creation of a digital acoustic model of a system consisting of a pressure compensator and pipelines connected to it; based on the results of calculating the natural frequencies of fluctuations in the pressure of the coolant;

Khvostova M.S. – development of a research program, systematization of published results of experimental studies of vibrations and vibration-stressed state of WWER-1000 reactor equipment;

Ismail R.M. – systematization of project information, analysis of calculation results and design of article materials;

Yakovlev K.A. – calculations of the acoustic field of a pressure compensation system adequate to several Helmholtz resonators.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Konstantin N. Proskuryakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1884-5576>
Wos Researcher ID: I-3583-2017
e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

Marina S. Khvostova, Head of the Department of Ecology, Radiation and Industrial Safety, Acting head Department of Nuclear Power Plant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0239>
e-mail: KhvostovaMS@mpei.ru

Ragy M. Ismail, graduate student of the Department of Nuclear Power Plant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2082-8322>; Wos Researcher ID: IAR-0530-2023 ; e-mail: IsmailIK@mpei.ru

Kirill A. Yakovlev, M.Sc., Engineer, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7672-7042>
e-mail: YakovlevKA@mpei.ru

Received 08.07.2023
Revision 01.09.2023
Accepted 05.09.2023

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.54
DOI 10.26583/gns-2023-03-06
EDN QENCPD



Применение метода вакуумного увода инертных радиоактивных газов для контроля герметичности оболочек твэлов ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР при работе на мощности

С.Н. Калмыков  , **С.Д. Полозков** , **А.И. Курина** , **Е.И. Голубев** 

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Россия

 *KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Аннотация. В настоящее время развивается комплексный подход по контролю герметичности оболочек твэлов ТВС на реакторных установках типа ВВЭР. Одним из главных этапов является этап достоверной регистрации наличия негерметичного твэла(ов) ТВС в составе активной зоны реактора при работе энергоблока на мощности. В представленной работе рассмотрены общие тенденции изменения активностей радионуклидов-продуктов деления в теплоносителе 1-го контура реакторных установок типа ВВЭР разных поколений и проектов. Рассмотрен опыт Нововоронежской АЭС по способу отбора и выделению инертных радиоактивных газов из теплоносителя первого контура. Проведено сравнение методов измерения инертных радиоактивных газов в теплоносителе первого контура: методом прямой спектрометрии, криогенным методом и методом вакуумного увода. Рассмотрен вопрос достоверной регистрации момента разгерметизации твэла во время работы реакторной установки на мощности на примере энергоблока №5 Нововоронежской АЭС. Приведены сравнительные результаты анализа состояния активной зоны на герметичность твэлов ТВС по основным реперным радионуклидам. Наиболее достоверные результаты, свидетельствующие о факте разгерметизации твэла, были получены по результатам контроля удельных активностей и анализа изменения соотношения инертных радиоактивных газов, выполненного с применением метода вакуумного увода ИРГ. Контроль удельной активности инертных радиоактивных газов в теплоносителе первого контура позволяет с высокой достоверностью оценивать состояние физических барьеров. Предложенный метод отбора и выделения ИРГ, имеет высокую достоверность и сходимость результата, что является дополнительным инструментом при проведении контроля герметичности оболочек твэлов при работе энергоблока на мощности. Имея представительные данные по удельным активностям инертных радиоактивных газов, можно достоверно говорить о состоянии твэлов ТВС в активной зоне реактора.

Ключевые слова: инертные радиоактивные газы, радионуклиды, выделение инертных радиоактивных газов, разгерметизация твэла, контроль герметичности оболочек твэла, физические барьеры, ВВЭР, АЭС.

Для цитирования: Калмыков С.Н., Полозков С.Д., Курина А.И., Голубев Е.И. Применение метода вакуумного увода инертных радиоактивных газов для контроля герметичности оболочек твэлов ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР при работе на мощности. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):62–71. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-06>

Application of the method of vacuum withdrawal inert radioactive gases to control of fuel rods leaking of nuclear reactors WWER types while operation

Sergey N. Kalmykov  , **Sergey D. Polozkov** , **Anna I. Kurina** ,
Evgeny I. Golubev 

Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russia

 *KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Abstract. Currently, a comprehensive approach is being developed for the integrity control of fuel rod claddings in pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants. One of the key stages is the reliable detection of leaking fuel rods within the reactor's active zone during power operation. This study examines the general trends in the activity of fission product radionuclides in the primary coolant of various generations and designs of PWRs. The experience of Novovoronezh Nuclear Power Plant is considered regarding the method of sampling and separation of inert radioactive gases from the primary coolant. A comparison is made between different methods of measuring inert radioactive gases in the primary coolant: direct spectrometry, cryogenic method, and vacuum extraction method. The issue of reliable detection of fuel rod leakage during reactor operation is discussed, using the example of Unit 5 at Novovoronezh Nuclear Power Plant. Comparative results are presented for the analysis of the integrity of fuel rod claddings based on key reference radionuclides. The most reliable results indicating fuel rod leakage were obtained through the control of specific activities and analysis of changes in the ratio of inert radioactive gases using the vacuum extraction method. Control of the specific activity of inert radioactive gases in the primary coolant enables a highly reliable assessment of the condition of physical barriers. The proposed method of sampling and separation of inert radioactive gases demonstrates high reliability and convergence of results, serving as an additional tool for integrity control of fuel rod claddings during power operation. Having representative data on the specific activities of inert radioactive gases allows for a reliable assessment of the condition of fuel rod claddings within the reactor core.

Keywords: inert radioactive gases, radionuclides, extraction of inert radioactive gases, fuel rod breaches, fuel assembly cladding integrity control, physical barriers, VVER, nuclear power plant.

For citation: Kalmykov S.N., Polozkov S.D., Kurina A.I., Golubev E.I. Application of the method of vacuum withdrawal inert radioactive gases to control of fuel rods leaking of nuclear reactors WVER types while operation. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):62–71 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-06>

Имеющийся опыт эксплуатации в рамках контроля герметичности оболочек твэл Нововоронежской АЭС свидетельствует, что в некоторых случаях установление факта наличия в активной зоне РУ негерметичных твэлов по величине удельной активности радионуклидов йода в теплоносителе весьма затруднительно. В подобных случаях дополнительной, а иногда единственной информацией, делать однозначное заключение о наличии или отсутствии в активной зоне РУ негерметичных твэлов, может являться информация об удельной активности радионуклидов инертных радиоактивных газов (ИРГ) в теплоносителе 1-го контура [1].

Образующиеся в процессе деления ядерного топлива ИРГ являются наиболее динамичными продуктами деления и при этом инертны в химическом плане, что делает их источником ценной информации о состоянии физических барьеров на АЭС [2].

Использование данных по активности ИРГ в теплоносителе 1-го контура для оценки состояния твэлов в активной зоне РУ до недавнего времени сдерживалось отсутствием надежных методик подготовки счетных образцов (СОБ), обеспечивающих требуемое качество измерений.

Основные проблемы при контроле ИРГ связаны с большими потерями газа на промежутке от пробоотбора до выполнения измерений, а именно:

- с потерями ИРГ при пробоотборе открытой струей в пробоотборную емкость;
- с дегазацией во время доставки пробы в лабораторию;
- с потерями ИРГ при подготовке СОБ.

На Нововоронежской АЭС разработаны две методики, позволяющие осуществлять качественную подготовку СОБ для проведения гамма-спектрометрических измерений удельной активности радионуклидов ИРГ в технологических средах АЭС. Методики аттестованы и успешно применяются при контроле герметичности оболочек твэл на работающем реакторе, а также при решении других задач, возникающих в ходе эксплуатации энергоблоков. Методики различаются по физическим принципам, используемым в ходе подготовки СОБ из отобранной жидкой пробы:

- криогенный метод применяется с 2008 года;
- метод вакуумного увода применяется с 2010 года.

Достоверное измерение активности ИРГ в жидких средах возможно, если при пробоподготовке обеспечивается полный переход ИРГ (не менее 95%), растворенных в жидкой пробе СОБ, в котором присутствие при этом других радионуклидов минимизировано. В разработанных методиках МВК 7.2.13.(2) 22¹ требуемое качество подготовки СОБ реализуется следующим образом: для исключения потери ИРГ при проведении пробоотбора, жидкая проба контролируемой среды перемещается в герметичную пробоотборную емкость (ПЕ) (рис. 1) закрытой струей с разбрызгиванием (дегазацией жидкости при отборе пробы). Герметичная пробоотборная емкость представляет собой сосуд из нержавеющей стали с вваренными в верхнюю крышку запорными вентилями:

1 Вентиль «Б» – «Барботаж» предназначен для выравнивания давления в емкости и проведения дополнительного барботажа отобранной пробы. К вентилю «Б» приваривается нержавеющая трубка, оканчивающаяся на расстоянии 5 мм от дна герметичной пробоотборной емкости;

2 Вентиль «В» – «Впрыск» предназначен для подключения герметичной пробоотборной емкости к пробоотборной линии. К вентилю «В» крепится нержавеющая трубка с форсункой длиной $\frac{1}{2}$ высоты пробоотборной емкости;

3 Вентиль «С» – «Слив» используется для вакуумирования (создания разряжения) пробоотборной емкости, слива жидкой пробы и вентилизации пробоотборной емкости.

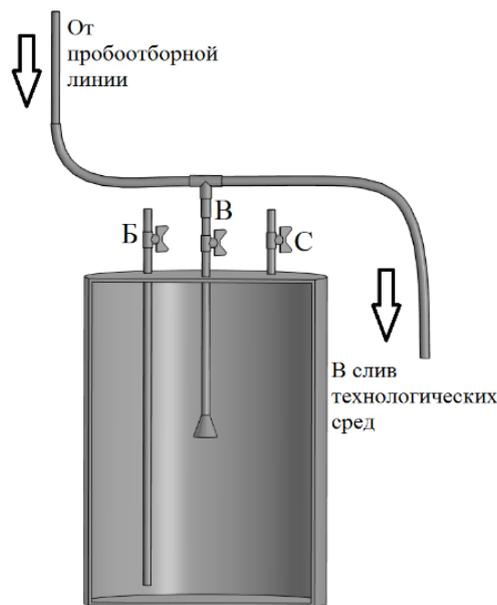


Рисунок 1. Пробоотборная емкость
Figure 1. Sampling capacity

Перед проведением пробоотбора, герметичная пробоотборная емкость предварительно вакуумируется до $\sim 0,85$ ати для создания разряжения.

ПЕ при помощи силиконового или гибкого шланга через «тройник» подключается к штатной пробоотборной линии, расположенной в камере отбора проб (КОП). Настраивается расход и выполняется дренирование теплоносителя в КОП мимо пробоотборной емкости. После проведения дренирования пробоотборной линии для поступления теплоносителя в пробоотборную емкость необходимо открыть вентиль «В». При поступлении теплоносителя через вентиль «В» происходит его дегазация с переходом растворенных в пробе теплоносителя газов в свободный газовый объем

¹ Методика измерения удельной активности инертных радиоактивных газов в теплоносителе первого контура и воде пеналов СОДС на Нововоронежской АЭС. МВК 7.2.13.(2) 22. Нововоронежская АЭС, 2022.

пробоотборной емкости. За счет заранее созданного разряжения в пробоотборной емкости и форсунки расположенной на конце трубки вентиля «В» происходит более интенсивная дегазация теплоносителя.

Объем ПЕ составляет 0,6 л. Время отбора пробы подбирается индивидуально для каждого трубопровода, исходя из необходимой отобранной массы теплоносителя 100÷150 мл. После истечения пробоотбора вентиль «В» закрывают, обмывают пробоотборную емкость и извлекают из КОП.

Для подготовки СОБ используются две методики.

1. Методика с использованием вакуумного увода выделившегося газа.

Для подготовки счетного образца по методу вакуумного увода используется вакуумный газосборник (ГВ) (рис. 2).

ГВ представляет собой герметичную емкость из нержавеющей стали, выполненной по типу сосуда Маринелли, объемом в несколько раз большим, чем объем пробоотборной емкости с двумя вентилями:

- Вентиль «Вход» предназначен для подключения к пробоотборной емкости;
- Вентиль «Выход» предназначен для вентиляции «вакуумного газосборника».



Рисунок 2. Газосборник для выполнения измерений
Figure 2. Gas collector for measurements

Предварительно отвакуумированные до $\sim -0,85$ ати вакуумный газосборник и пробоотборная емкость с отобранной пробой соединяются между собой силиконовым шлангом. Перенос выделившихся газов из пробоотборной емкости в ГВ осуществляется поочередным кратковременным (3÷5 сек.) попеременным сообщением вакуумного газосборника с пробоотборной емкостью и атмосферой.

При закрытых вентилях «В» на пробоотборной емкости и «Выход» на ГВ поочередно открываются-закрываются вентили «С» и «Б». Использование вентиля «Б» для связи пробоотборной емкостью с атмосферой исключает выход газа из пробоотборной емкости в помещение, а также обеспечивает дополнительное барботирование жидкой пробы. Опыт показывает, что при соотношении объемов пробоотборной емкости и ГВ как 1:5 после пяти таких переключений в вакуумный газосборник уводится более 99 % выделившихся в газовый объем пробоотборной емкости газообразных радионуклидов. Подготовленный СОБ (смесь газов в вакуумном газосборнике) передается на измерение.

2. Методика с использованием криогенной конденсации выделившегося газа.

Сконструированный на НВ АЭС криогенный газосборник представляет собой компактный герметичный теплообменник в виде тонкостенной металлической трубы (рис. 3), в которую входят две трубки с вентилями: «Вход» и «Выход». Трубка «Вход» проходит в нижнюю часть теплообменника; на ее конце установлен тепловой затвор –

массивный металлический цилиндр, при помощи которого обеспечивается автоматическое прекращение формирования СОБ при достижении фиксированного объема. Для визуального контроля за процессом формирования СОБ и отслеживания момента его прекращения на входе в криогенного газосборника установлен ротаметр.

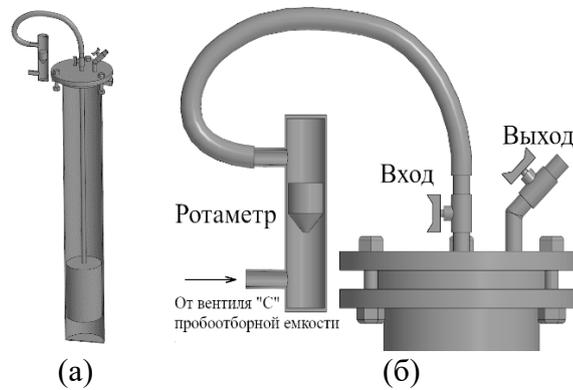


Рисунок 3. Криогенный газосборник
Figure 3. Cryogenic gas collector

Криогенный газосборник соединяется при помощи шланга с пробоотборной емкостью через вентиль «С» (рис. 4). Криогенный газосборник помещается в сосуд с жидким азотом, в качестве которого используется бытовой металлический термос. После остывания криогенного газосборника открывают вентиль «Вход» на криогенном газосборнике и вентили «Б» и «С» на пробоотборной емкости и начинается процесс перетока газо-воздушной смеси из пробоотборной емкости в криогенный газосборник и ее конденсация на внутренней поверхности криогенного газосборника при охлаждении до температуры жидкого азота. Для ускорения формирования СОБ процесс теплосъема от криогенного газосборника интенсифицирован за счет применения пористого покрытия на наружной поверхности нижней части криогенного газосборника (марля, ткань). Тепловой затвор функционирует следующим образом: при увеличении объема сжиженного воздуха до нижнего торца теплового затвора, который имеет температуру выше, чем температура сжижения, часть воздуха испаряется, повышая давление в криогенном газосборнике, и поступление газо-воздушной смеси прекращается. После завершения формирования СОБ вентиль «Вход» на криогенном газосборнике закрывается, и СОБ в газосборнике вместе с термосом передается для спектрометрических измерений.

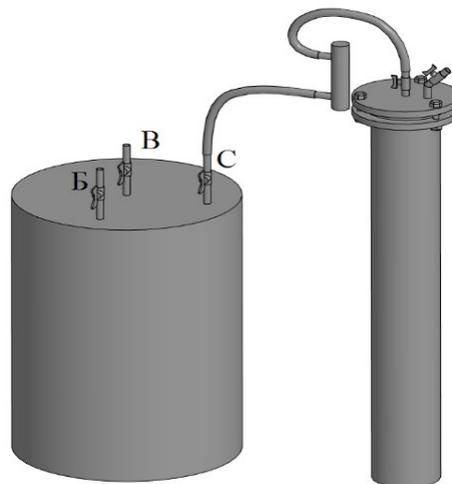


Рисунок 4. Схема подключения криогенного газосборника
Figure 4. Connection diagram of cryogenic gas collector

Сопоставляя достоинства и недостатки двух описанных выше методик формирования СОБ, можно сказать следующее:

- методика с вакуумным уводом ИРГ – очень проста и легко реализуема;
- формирование СОБ по этой методике вакуумного увода занимает не более 5 мин;
- к недостатку метода вакуумного увода можно отнести ограниченность использования (только при отборе газа из жидкой пробы с применением ПЕ).

Методика с использованием криогенной конденсации газа является более универсальной и позволяет контролировать содержание ИРГ как в жидких средах, так и воздушных объемах. Однако формирование СОБ по данной методике предполагает наличие специальных приспособлений (жидкий азот, термос, каркас для установки на детектор). Время на формирование СОБ с объемом $V=25 \text{ см}^3$ составляет ~ 25 мин.

Результаты использования методик измерения

В настоящее время контроль состояния оболочек твэлов во время работы энергоблоков с ВВЭР осуществляется в соответствии с РД ЭО 1.1.2.10.0522-2008 (ВВЭР-440)², РД ЭО 1.1.2.10.0521-2008³ (ВВЭР-1000) и ТМТ 1.1.3.04.1769-2020 (ВВЭР-1200)⁴. Оценка наличия негерметичных твэлов в активной зоне проводится по удельной активности в теплоносителе 1-го контура РУ радионуклидов йода ^{131}I – ^{135}I . Рассчитываются нормированные значения удельной активности радионуклидов йода, пересчитанные к 100 % кумулятивному выходу нуклида на деление ядра ^{235}U и отсутствию выведения йода из теплоносителя первого контура за счет системы СВО.

При разгерметизации твэла в активной зоне реактора в первую очередь еще до заметного роста удельной активности радионуклидов йода в теплоносителе 1-го контура происходит рост активности ИРГ, при этом изменяются не только значения удельной активности радионуклидов, но и их соотношения. Особенно информативны отношения удельных активностей $A_{\text{уд.}}(^{133}\text{Xe})/A_{\text{уд.}}(^{135}\text{Xe})$.

Для решения задачи по проведению контроля герметичности на работающем реакторе по удельным активностям ИРГ в теплоносителе первого контура на Нововоронежской АЭС применяется методика вакуумного увода ИРГ.

Ввиду большой загруженности энергетического спектра и высокой неопределенности результатов измерений, отследить изменение удельных активностей ИРГ методом прямой спектрометрии невозможно, тогда как при подготовке счетного образца методом вакуумного увода четко прослеживается динамика изменения удельной активности ИРГ (рис. 5,6) и изменение соотношения $^{133/135}\text{Xe}$ (рис. 7), что позволяет однозначно зафиксировать факт разгерметизации твэла ТВС.

² Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07. 2007. <https://docs.cntd.ru/document/902083695#>

³ Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-1000. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009. Москва: Концерн «Росэнергоатом», 2009. file:///C:/Users/User/Downloads/РД_ЭО_1.1.2.10.0521-2009_С_изм.1_копия_копия.pdf

⁴ Сборки тепловыделяющие ядерных реакторов типа ВВЭР-440. Типовая методика контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов. РД ЭО 1.1.2.10.0522-2008. Москва: Концерн «Росэнергоатом», 2009. file:///C:/Users/User/Downloads/РД_ЭО_1.1.2.10.0522-2008_с_изм.1_2_копия_копия.pdf

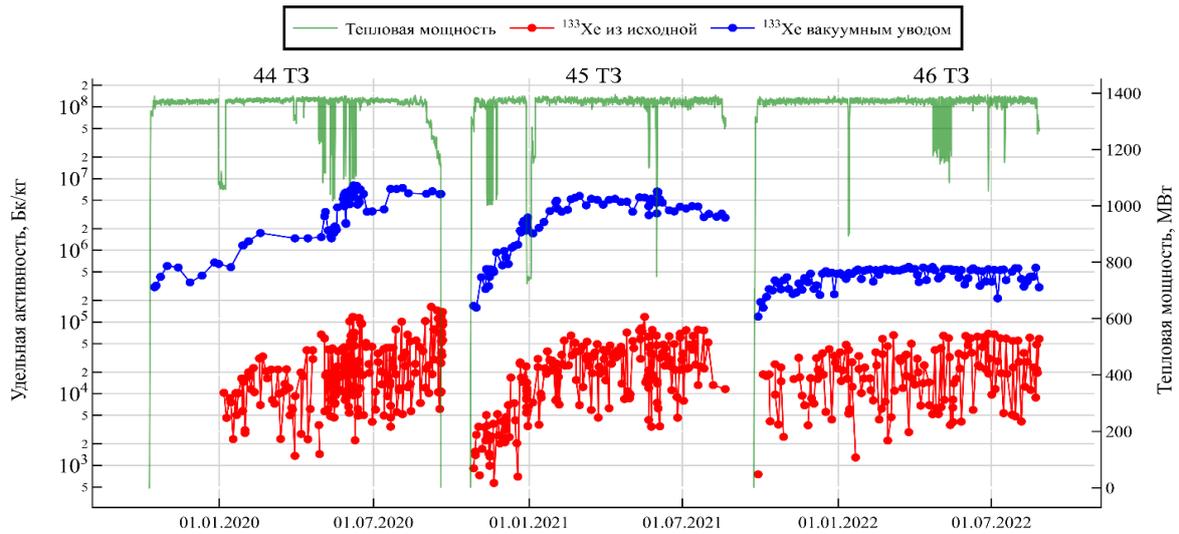


Рисунок 5. График измерений удельной активности ^{133}Xe методом прямой спектрометрии и методом вакуумного увода
 Figure 5. Chart of specific activity measurements ^{133}Xe by direct spectrometry and vacuum recovery

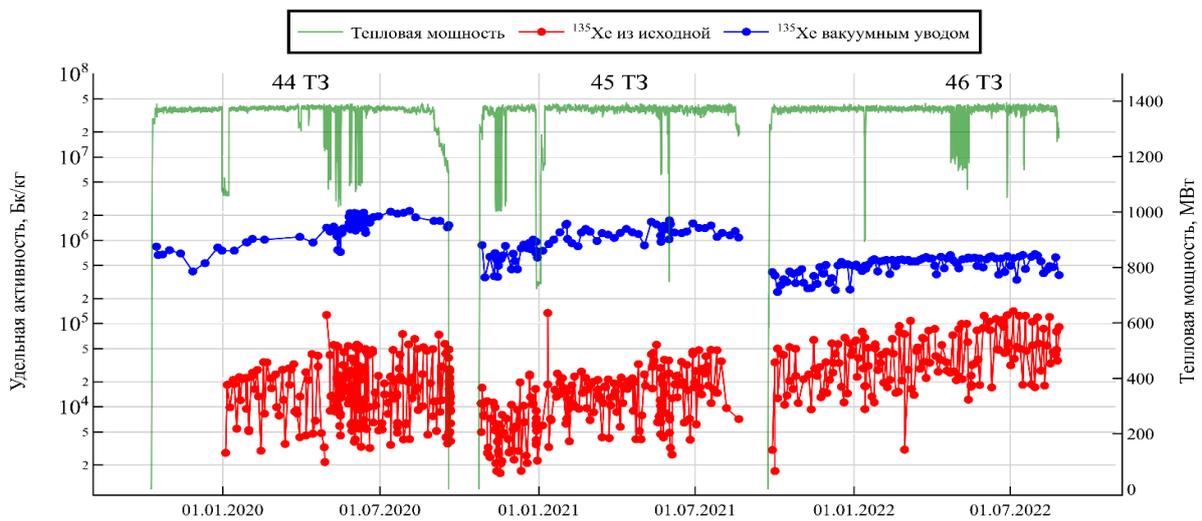


Рисунок 6. График измерений удельной активности ^{135}Xe методом прямой спектрометрии и методом вакуумного увода
 Figure 6. Chart of specific activity measurements ^{135}Xe by direct spectrometry and vacuum recovery

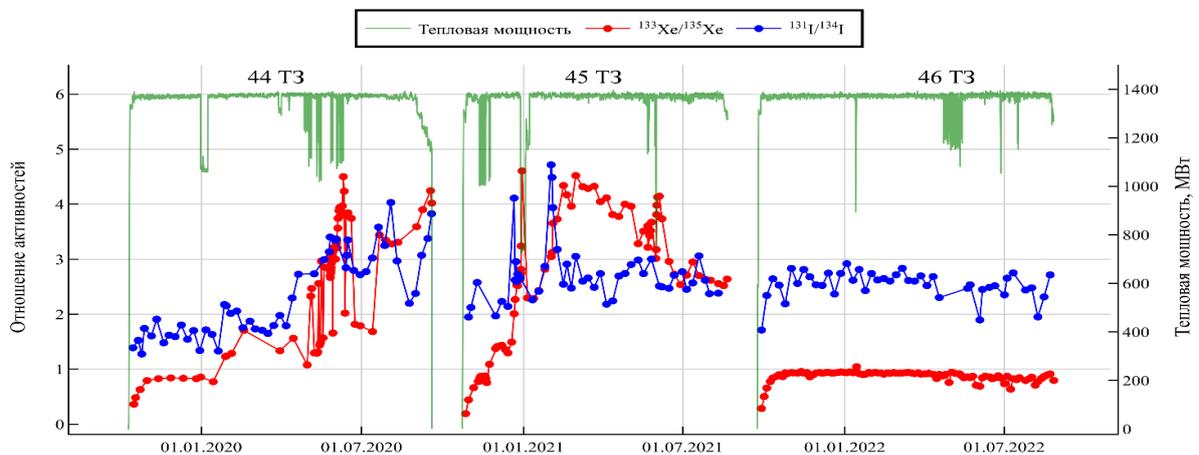


Рисунок 7. График изменения соотношений удельных активностей
 Figure 7. Chart of changes in the ratios of specific activities

В 29 ТЗ энергоблока № 5 в момент разгерметизации было зафиксировано максимальное значение отношения нормированных активностей ^{131}I к ^{134}I , составляющие 3,65 (рис. 8). На протяжении всей кампании, анализируя соотношения нормированных активностей йодов в соответствии с Типовой методикой контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов РД ЭО 1.1.2.10.0521-2009 ($^{131}\text{I}_{\text{норм}}/^{134}\text{I}_{\text{норм}} > 5$ для негерметичной ТВС) и удельную активность радионуклидов йода (рис. 9) (в частности по отсутствию spike-эффекта при разгрузке энергоблока на 50 % от номинальной мощности), невозможно сделать однозначный вывод о наличии негерметичных ТВЭЛов в составе топливной загрузки.

Дополнительным инструментом контроля при регистрации негерметичного ТВЭЛА являлся анализ изменения отношения удельных активностей ИРГ ($^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$) в теплоносителе 1-го контура.

По увеличению активности ^{133}Xe и изменению отношения активностей $^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$, которое изменилось и находилось на высоком уровне на протяжении всей дальнейшей кампании, можно сделать однозначный вывод о появлении негерметичного ТВЭЛА в активной зоне.

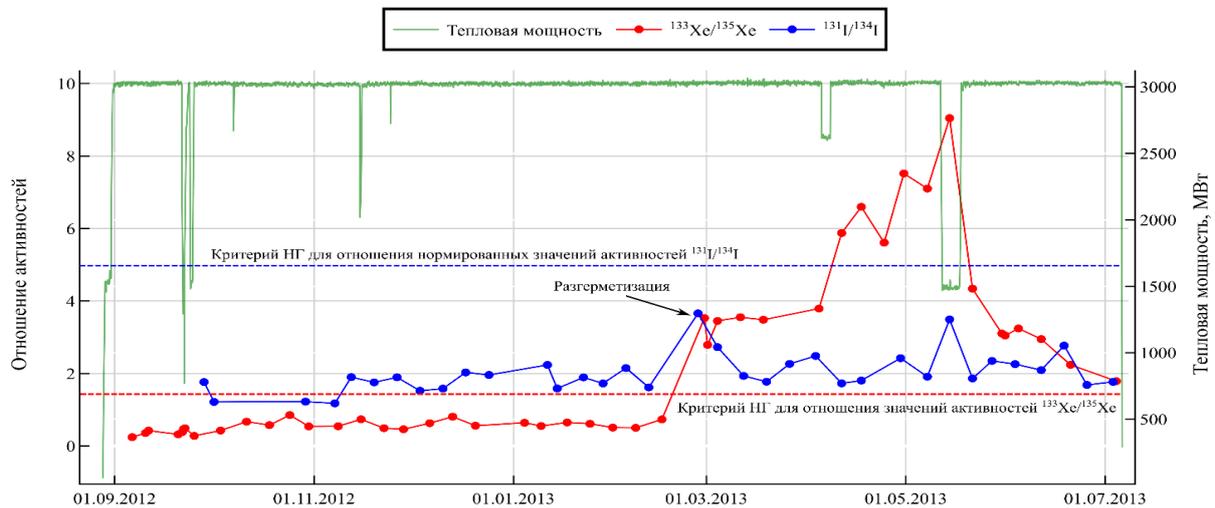


Рисунок 8. График изменения соотношений удельных активностей
Figure 8. Chart of changes in the ratios of long-term activities

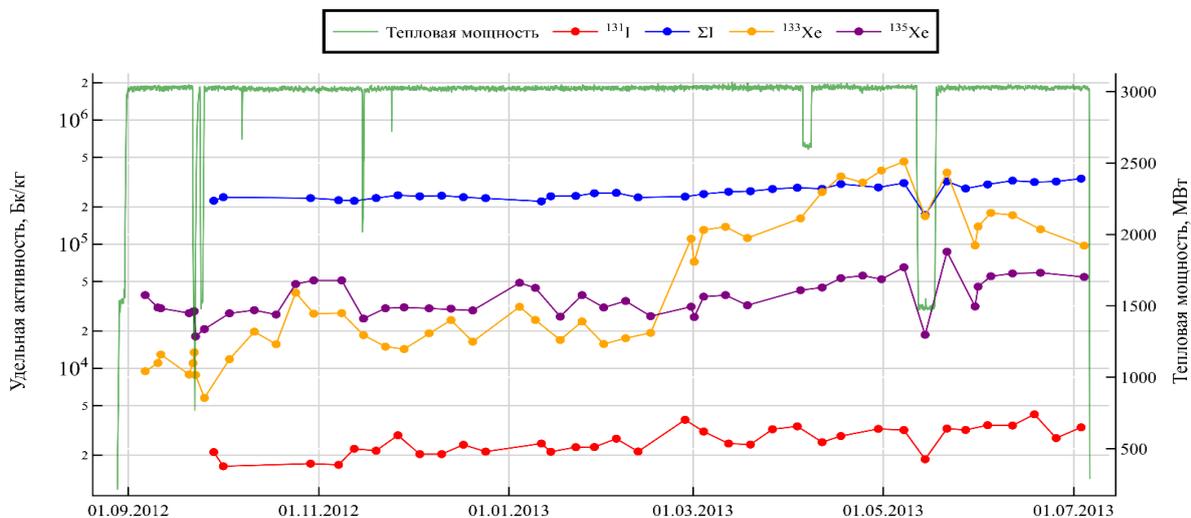


Рисунок 9. График удельных активностей
Figure 9. Chart of specific activities

После окончания топливной загрузки во время перегрузки АЗ реактора был проведен КГО всех твэлов ТВС в системе обнаружения дефектных сборок (СОДС). По результатам КГО СОДС была выявлена одна негерметичная ТВС.

При отсутствии негерметичных твэлов в составе активной зоны, удельные активности йодов и ИРГ, а также их соотношения находятся на стабильном уровне на протяжении всей топливной загрузки (рис. 10).

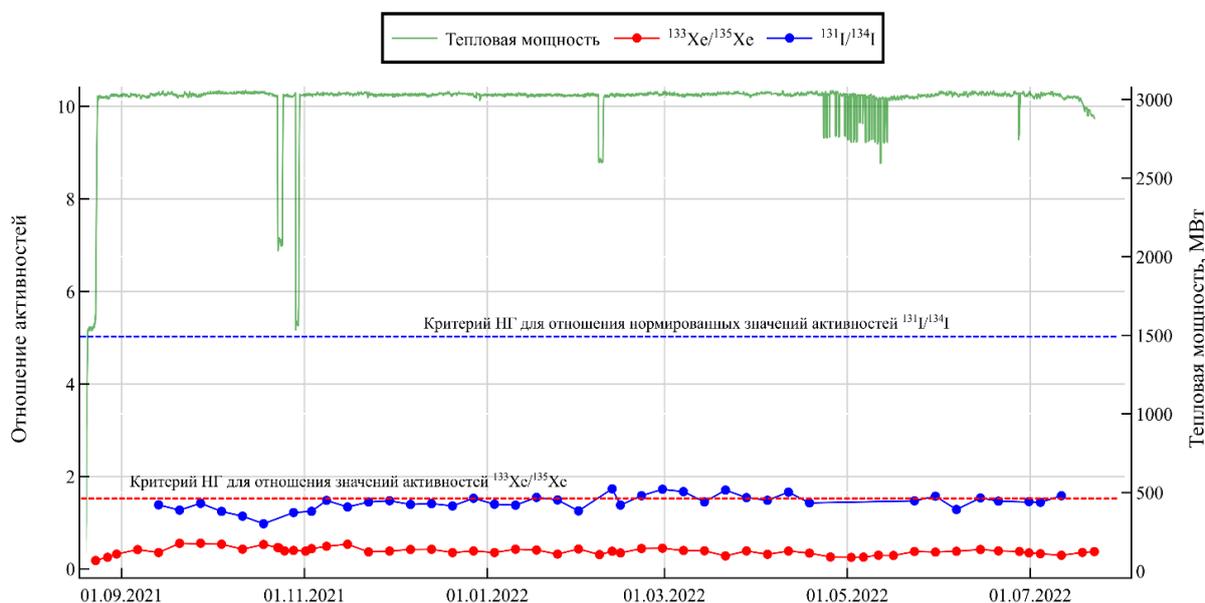


Рисунок 10. График удельных активностей
Figure 10. Chart of specific activities

Выводы

Появление в активной зоне РУ негерметичных твэлов всегда сопровождается ростом активности ИРГ в «стационарных» условиях.

В «герметичной» активной зоне появление негерметичных твэлов меняет отношение активностей радионуклидов ИРГ в сторону увеличения доли долгоживущих.

Для выполнения задач по контролю ИРГ в теплоносителе 1-го контура на Нововоронежской АЭС применяется метод вакуумного увода. Предложенная и применяемая методика измерений ИРГ в теплоносителе 1-го контура позволяет достоверно определять удельные активности ИРГ в теплоносителе 1-го контура, что достигается за счет минимизации потери газа при пробоотборе, транспортировании и пробоподготовке.

Контроль удельной активности ИРГ позволяет с высокой достоверностью регистрировать момент разгерметизации.

В ряде случаев, именно информация по удельным активностям ИРГ в 1-м контуре позволяет достоверно говорить о наличии негерметичных твэлов ТВС.

Регистрация факта наличия негерметичного твэла в составе активной зоны во время работы на мощности дает возможность своевременно предоставить информацию для планирования работ по перегрузке АЗ по время проведения ППР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Быков В.И., Горобцов Л.И., Калмыков С.Н. Опыт Нововоронежской АЭС по использованию данных по активности ИРГ в теплоносителе 1-го контура при контроле состояния 2 го физического барьера при работе энергоблоков на мощности. *Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом*. Сборник тезисов Международной научно-технической конференции. Нововоронеж: Нововоронежская АЭС, 2014. С. 3710.

2. Поваров В.П., Терещенко А.Б., Кравченко Ю.Н. и др. Развитие и применение современных методов контроля герметичности и оценки состояния топлива на НВ АЭС. *Теплоэнергетика*. 2014;2:54–58. <https://doi.org/10.1134/s004036361402009x>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Калмыков С.Н. – концепция исследования, организация экспериментов, написание текста статьи;

Полозков С.Д. – проведение экспериментов, составление графиков, подготовка технического задания;

Курина А.И. – проведение исследования, анализа данных, проведение аналитики полученных результатов, проведение статистического анализа;

Голубев Е.И. – изучение, ресурсное обеспечение экспериментов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Николаевич Калмыков, начальник лаборатории спектрометрии и КГО отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0352-768X>

e-mail: KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Сергей Дмитриевич Полозков, инженер лаборатории спектрометрии и КГО отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7938-4208>

e-mail: PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Анна Игоревна Курина, инженер 1 категории лаборатории спектрометрии и КГО отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2841-8394>

e-mail: KurinaAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Евгений Иванович Голубев, начальник отдела ядерной безопасности и надежности, Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3886-5126>

e-mail: GolubevEI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kalmykov S.N. – research concept, organization of experiments, writing the text of the article;

Polozkov S.D. – conducting experiments, drawing up schedules, terms of reference preparation;

Kurina A.I. – conducting research, analyzing data, analyzing the results, conducting statistical analysis;

Golubev E.I. – study, resource support of experiments

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey N. Kalmykov, Head of the Laboratory of Spectrometry and FFD of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0352-768X>

e-mail: KalmykovSN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Sergey D. Polozkov, Engineer, Laboratory of Spectrometry and FFD of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7938-4208>

e-mail: PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Anna I. Kurina, Engineer (Category 1), Laboratory of Spectrometry and FFD of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2841-8394>

e-mail: KurinaAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Evgeny I. Golubev, Head of the Department of Nuclear Safety and Reliability, Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3886-5126>

e-mail: GolubevEI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023

После доработки 01.08.2023

Принята к публикации 10.08.2023

Received 05.06.2023

Revision 01.08.2023

Accepted 10.08.2023

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039: 621.311.25
DOI 10.26583/gns-2023-03-07
EDN WOBBVC



Совершенствование методов анализа технического состояния
электромеханического оборудования АЭС

Е.А. Абидова

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
e-abidova@mail.ru*

Аннотация. В статье анализируется проблема диагностики электроприводной арматуры АЭС. Выход из строя данного вида оборудования может стать исходным событием для проектной или запроектной аварии. Поэтому в период планово-предупредительных ремонтов на АЭС проводится диагностирование до 2000 единиц арматуры в основном путем регистрации и анализа сигнала тока двигателя в процессе открытия и закрытия. Однако применяемые статистические и частотные методы анализа не всегда обеспечивают необходимое качество диагностирования. В статье указывается на недостаток применяемых методов – нечувствительность к динамике электромеханического оборудования с точки зрения нелинейных проявлений дефектов. В качестве инструмента анализа указанных проявлений предложен фазово-плоскостной метод и изложены его теоретические основы. Диагностический сигнал описывается как векторная диаграмма гармонического ряда, подвергаемого амплитудной и фазовой модуляции. Показаны наиболее характерные формы фазовых траекторий – кардиоиды, нефроиды, эпициклоиды. Основные преимущества фазово-плоскостного метода перед традиционными частотными методами, – чувствительность, возможность идентификации вида модуляции, сдвига фаз, динамических и хаотических проявлений, – продемонстрированы примерами обработки диагностических сигналов оборудования АЭС. Немаловажным преимуществом, которое дает представление сигнала в виде фазового портрета является наглядность отображения динамических особенностей сигнала. Результатом работы является новый метод, позволяющий извлекать дополнительную информацию о состоянии объекта за счет анализа нестационарной составляющей исходных данных. Предложено внедрение фазово-плоскостного метода в практику обработки диагностических сигналов электроприводной арматуры и другого электромеханического оборудования, эксплуатируемого на АЭС.

Ключевые слова: диагностический сигнал, фазовая траектория, гармонические ряды, глубина модуляции, хаос, эпициклоида.

Для цитирования: Абидова Е.А. Совершенствование методов анализа технического состояния электромеханического оборудования АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):72–81. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-07>

Improvement of methods for analyzing the technical condition of electromechanical
equipment of nuclear power plants

Elena A. Abidova ¹

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russia
e-abidova@mail.ru*

Abstract. The article analyzes the problem of diagnostics of NPP electric drive valves. Failure of this type of equipment can become the initial event for design or beyond design accident. Therefore, during the period of preventive maintenance at NPPs diagnostics of up to 2000 units of valves is carried out mainly by registration and analysis of the motor current signal during opening and closing. However, the applied statistical and frequency analysis methods do not always provide the necessary quality of diagnostics. The article points out the disadvantage of the applied methods – insensitivity to the dynamics of electromechanical equipment in terms of

nonlinear manifestations of defects. As a tool for analyzing these manifestations the phase-plane method is proposed and its theoretical basis is outlined. The diagnostic signal is described as a vector diagram of a harmonic series subjected to amplitude and phase modulation. The most characteristic forms of phase trajectories - cardioids, nephroids, epicycloids – are shown. The main advantages of the phase-plane method over traditional frequency methods – sensitivity, possibility to identify the type of modulation, phase shift, dynamic and chaotic manifestations – are demonstrated by examples of processing diagnostic signals of NPP equipment. An important advantage of signal representation in the form of phase portrait is the visualization of dynamic features of the signal. The result of the work is a new method that allows to extract additional information about the object state by analyzing the non-stationary component of the initial data. It is proposed to introduce the phase-plane method into the practice of processing diagnostic signals of electric drive valves and other electromechanical equipment operated at NPPs.

Keywords: diagnostic signal, phase trajectory, harmonic series, modulation depth, chaos, epicycloid.

For citation: Abidova E.A. Improvement of methods for analyzing the technical condition of electromechanical equipment of nuclear power plants. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):72–81 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-07>

1. Актуальность проблемы

Техническая диагностика в атомной энергетике является одной из основных технологий, обеспечивающих поддержку безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС [1]. Обслуживание электроприводного оборудования занимает до 70% по объёму выполняемых работ в период планово-предупредительных ремонтов (ППР) [2]. К электроприводному оборудованию относятся электроприводная арматура (ЭПА), насосы, приводы системы управления и защиты, перегрузочная машина, дизель-генераторы.

На блоке АЭС эксплуатируется более 2000 единиц арматуры, из нее свыше 30 % приходится на высокоответственную запорную и запорно-регулирующую. С арматурой АЭС связано до 25 % простоев энергоблока, до 40 % отказов оборудования, до 50 % затрат на ремонт и до 85 % всего заменяемого оборудования¹. Отказ ЭПА может стать исходным событием для проектной или запроектной аварии.

Проблемой диагностирования оборудования АЭС является то, что полноценную диагностику можно проводить в период ППР (один раз в 12 или 18 месяцев), и по результатам диагностирования устанавливается возможность безотказной эксплуатации данного оборудования в межремонтный период. Повышение чувствительности применяемых методов диагностирования к зарождающимся дефектам является задачей, актуальность которой повышается в связи с увеличением мощности реакторной установки (на 104% для ВВЭР-1000), сокращением сроков ремонта.

2. Существующие методы анализа диагностических сигналов

Обработка диагностических сигналов в штатных системах диагностики заключается в использовании статистических методов, а также методов анализирующих детерминированную составляющую сигнала, – преобразования Фурье, вейвлет-преобразование, – широко представленными в работах Баркова Н.А. [3], Русова В.А., Адаменкова А.К. и др. Однако в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей [4-6] показано, что электромеханическое оборудование при наличии отклонений в его техническом состоянии демонстрирует хаотическое поведение, что отражается в характере диагностических сигналов. Такие нерегулярные составляющие сигнала не могут быть эффективно идентифицированы традиционными методами.

¹ СТО 1.1.1.01.002.0069-2017 Правила организации технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739253.pdf> (дата обращения: 04.04.2022).

Расширение спектра выделения диагностической информации из экспериментальных данных базируется на фундаментальных идеях Л. Больцмана, К. Шеннона и А. Колмогорова, представивших информацию универсальной первичной категорией, объединяющей понятие энтропия. В этом случае энтропия может использоваться в качестве количественной меры оценки неопределенности и хаотичности процессов в динамических объектах и, обладая инвариантностью к таким особенностям сигналов, как нестационарность и негладкость, может служить инструментом при осмысливании и интерпретации результатов диагностических процедур [5,7]. Недостатком подхода является то, что для различных проявлений деградации в сигнале (усложнение, самоорганизация, хаос) целесообразно применять различные способы расчета энтропийных индексов, что требует предварительной экспертной оценки исходной информации.

Повышение чувствительности анализа диагностической информации в работах Reza Golafshan, Al Bugharbee Hussein, Trendafilova Irina [6,8] предлагается осуществить на основе использования метода главных компонент. Метод главных компонент позволяет за счет выделения наиболее существенной информации уменьшать размерность данных, осуществлять сжатие объемов информации с минимальным искажением структуры исходных данных. Однако широкое практическое внедрение метода [9,10], усложняется неоднозначностью представления и интерпретации результатов.

Теоретическим анализом процессов взаимодействия элементов электромеханического оборудования идентифицированы фазово-динамические характеристики диагностических сигналов [8]. Настоящее исследование направлено на параметризацию нелинейных и хаотических генераций в диагностических сигналах ЭПА путем использования фазово-плоскостного метода (ФПМ).

3. Методика

3.1 Суть фазово-плоскостного метода

Применительно к анализу сигналов суть ФПМ: представление гармоник диагностического сигнала как совокупности фазоров на комплексной плоскости. Фазор – вращающийся вектор, исходящий из центра координат комплексной плоскости, длина которого соответствует амплитуде гармоники, начальное положение фазе, скорость вращения частоте (рис. 1).

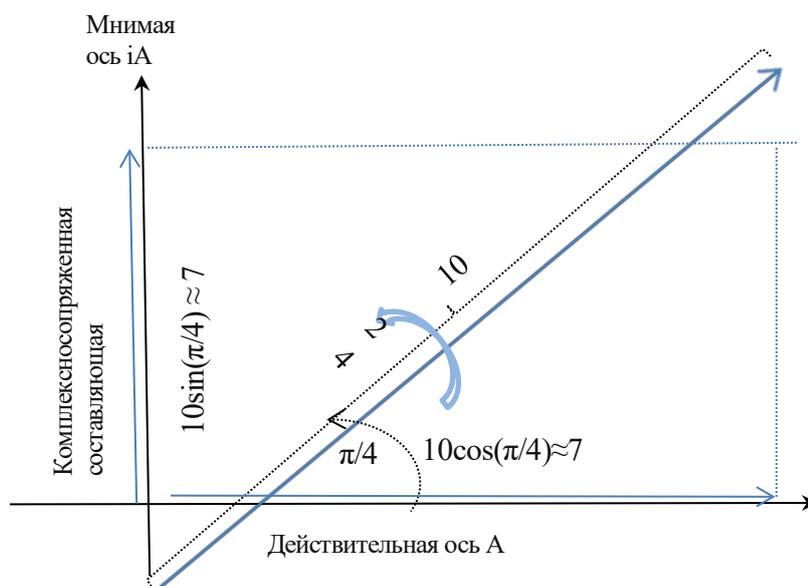


Рисунок 1. Пример векторной диаграммы колебания $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$
Figure 1. Example vector diagram of oscillation $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$

Проекция фазора на действительную ось соответствует текущей амплитуде. Проекция фазора на мнимую ось соответствует текущей амплитуде комплексно-сопряженной составляющей. Комплексно-сопряженная составляющая может быть получена путем преобразования Гилберта:

$$\tilde{i}(t) = H[i(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i(u)}{\pi(t-u)} du$$

Физический смысл преобразования Гилберта – смещение всех гармоник сигнала на $\pi/2$. То есть положение фазора определяется более «ранним» и более «поздним» значением сигнала. Совокупность (мгновенная сумма) действительной и мнимой составляющих называется аналитическим сигналом. Проекцию аналитического сигнала на комплексную плоскость, как показано на рисунке 2, можно рассматривать как фазовый портрет (ФП).

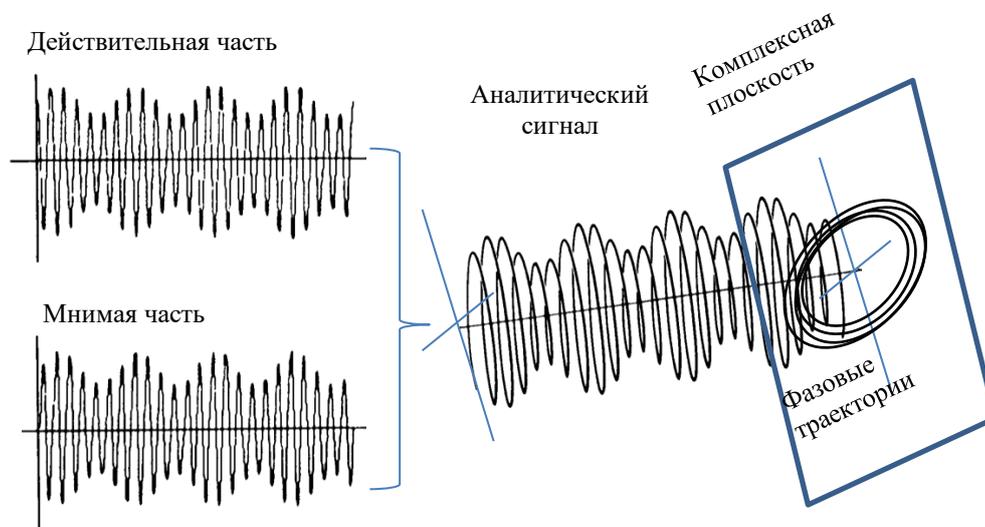


Рисунок 2. Проекция аналитического сигнала на комплексную плоскость
Figure 2. Projection of analytical signal on the complex plane

Реальный сигнал содержит большое число гармоник-фазоров, которые складываются в результирующий вектор, мгновенное положение которого определяются геометрической суммой всех элементарных фазоров. Конец результирующего вектора описывает фазовую траекторию, которая является замкнутой, если сигнал периодический. Реальный диагностический сигнал не обладает строгой периодичностью (в большинстве случаев они являются квазипериодическими т.е. период изменения является случайной функцией), однако за определенный период наблюдений можно выделить устойчивую совокупность траекторий, которые почти не меняют положения на комплексной плоскости. Таким образом, фазовый портрет (ФП) сигнала – это полная совокупность фазовых траекторий.

3.2 Формирование ФП диагностического сигнала

3.2.1 Проявление гармонических рядов. Итак, гармоника диагностического сигнала представляется фазором на комплексной плоскости. Фаза задает начальное положение данного вращающегося вектора. Например, в момент времени $t=0$ проекция фазора на действительную ось – произведение амплитуды на косинус фазы, а проекция фазора на мнимую ось – произведение амплитуды на синус фазы. Единственный фазор своим концом описывает, естественно, окружность.

Как известно [3], особенностью диагностических сигналов является формирование гармонических рядов. Это значит, что помимо вектора основной

гармоники будут присутствовать фазоры, которые вращаются в 2, 3, 4 и более раз быстрее, чем фазор основной. Векторы складываются в результирующий вектор, мгновенное положение которого определяются геометрической суммой всех элементарных фазоров.

Например, построим векторную диаграмму сигнала, определяемого аналитическим выражением (рис. 3). Для этого из точки пересечения координат отложим векторы, длины которых соответствуют амплитудам, а поворот фазам гармоник, векторы сложим по правилу параллелепипеда. В данном примере результирующий вектор длиннее любого из исходных. Вращаясь, эти два вектора будут то «нагонять» друг друга, то расходиться, а их сумма то увеличиваться, то уменьшаться, результирующий вектор будет чертить фигуру, которую принято называть кардиоида.

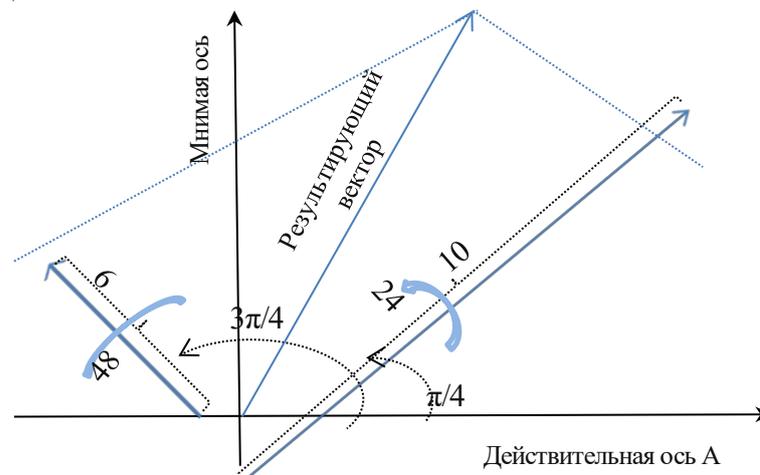


Рисунок 3. Пример векторной диаграммы гармонического колебания $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))+6\cos(2\pi 48t+(3\pi/4))$

Figure 3. Example vector diagram of a harmonic oscillation $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))+6\cos(2\pi 48t+(3\pi/4))$

Кардиоиды (фигура в виде сердца) в зависимости от разности фаз поворачивается вокруг центра. Если появится фазор, скорость которого в 3 раза больше основной, то результирующий вектор очертит нефроиду (фигура в виде почки). В класс нефроид попадает большое разнообразие форм фигур. Вид конкретной нефроиды зависит от соотношения амплитуд фазоров и разности фаз. Характерно, что один и тот же спектр может соответствовать разным формам фигуры данного типа.

Кардиоиды (рис. 4а) и нефроиды (рис. 4б) являются частным случаем эпициклоид. Если фигуры формируются фазорами числом более трех, то будем называть их сложными эпициклоидами. В большинстве случаев на практике увеличение размера и усложнение формы (переход от окружности к кардиоиде) принято трактовать как признак ухудшения состояния.

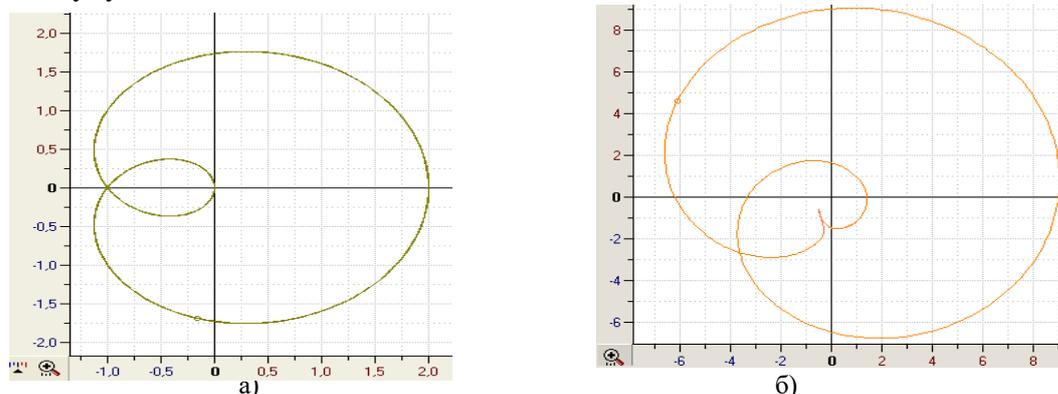


Рисунок 4. Фазовые портреты гармонических рядов: а) кардиоиды; б) нефроиды

Figure 4. Phase portraits of harmonic series: a) cardioid; b) nephroid

Чаще всего ФП диагностического сигнала ЭПА близок к кардиоиду. При чем сдвиг фаз между кратными гармониками не влияет на размер ФП, но влияет на проекцию на действительную ось. Пользуясь известными – статистическими – методами, наблюдая за поведением только действительной составляющей, констатируем как бы уменьшение или как бы увеличение диагностических параметров, хотя на самом деле состояние объекта не меняется. Анализ размера портрета в целом позволяет избежать ошибок и выявить истинные тенденции изменения состояния. Различным состояниям могут соответствовать близкие значения диагностических параметров и почти одинаковые спектры, при этом портреты будут различаться

3.2.2 Проявление модуляции. Другая особенность диагностических сигналов – модуляция [3]. Различают амплитудную, фазовую и частотную модуляцию. Фазовая модуляция показана на рисунке 5.

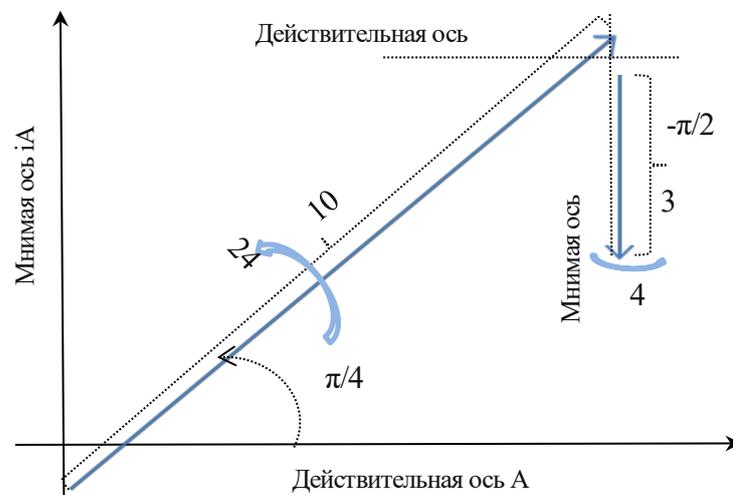


Рисунок 5. Пример диаграммы фазовой модуляции вида $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))+3\cos(2\pi 4t+(-\pi/2))$
Figure 5. An example of a phase modulation diagram of the form $A(t)=10\cos(2\pi 24t+(\pi/4))+3\cos(2\pi 4t+(-\pi/2))$

Рассмотрим, как эти виды модуляции проявляются в форме фазовых портретов. Начнем с фазовой. В этом случае вектор, соответствующий модулирующей гармонике, вращается в плоскости, центр координат которой находится на конце несущего вектора. Получается, что несущий вектор «несет» модулирующую гармонику. Модулирующий вектор, вращаясь со своей частотой, складывается с несущим вектором, из-за чего результирующий вектор то увеличивается и «разгоняется» вперед, то уменьшается и «отбегает» назад. В результате фазовая траектория приобретает петляющий вид.

Проявление амплитудной модуляции (рис. 6), описать несколько сложнее, чем фазовой. При амплитудной модуляции два вектора, соответствующие модулирующей гармонике, вращаются в комплексной плоскости, центр координат которой находится на конце несущего вектора. При чем, действительная ось совпадает с направлением несущего вектора. Длины обоих модулирующих векторов соответствуют амплитуде. Оба вектора вращаются в противоположных направлениях со скоростью, соответствующей частоте модуляции. Оба вектора в начальный момент времени сдвинуты фазе в противоположные стороны. Сумма модулирующих векторов в любой момент времени параллельна несущему вектору, и по направлению то совпадает с ним, то направлена противоположно.

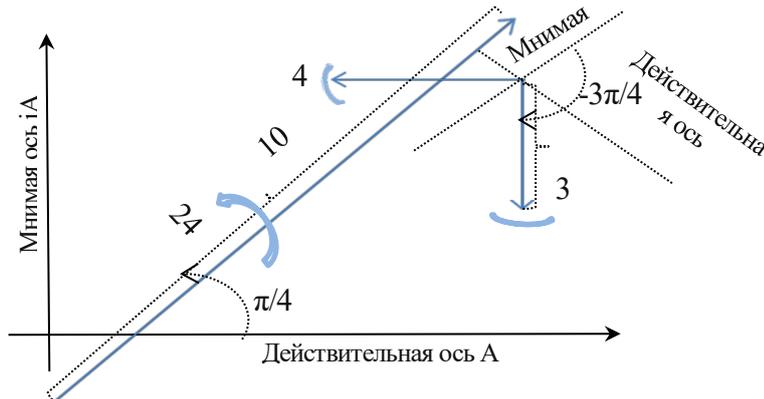


Рисунок 6. Диаграмма амплитудной модуляции $A(t)=10(1+3\cos(2\pi 4t+(-3\pi/4)))\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$
Figure 6. Amplitude modulation diagram $A(t)=10(1+3\cos(2\pi 4t+(-3\pi/4)))\cos(2\pi 24t+(\pi/4))$

Таким образом, гармоника, которая получилась в результате суммирования несущей с модулирующей, вращается равномерно, то увеличиваясь, то укорачиваясь. Конец результирующего вектора очерчивает гладкие спиралеобразные линии.

3.2.3 Проявление дефектов. Форма портрета диагностического сигнала зависит от числа несущих гармоник и глубины модуляции. Глубина модуляции зависит от амплитуды и числа модулирующих гармоник. Развитие дефекта как раз может проявляться увеличением глубины модуляции. В практике анализа диагностических сигналов встречаются окружности, кардиоиды, нефроиды, эпициклоиды, сформированные петляющими траекториями. Следует обратить внимание, что в большинстве реальных сигналов несущими являются гармоники двигателя, а модулирующими гармоники дефектных деталей. Фазовая модуляция характерна для дефектов типа затирание (рис. 7а,в). Амплитудная модуляция характерна для дефектов типа скол (рис. 7б,г).

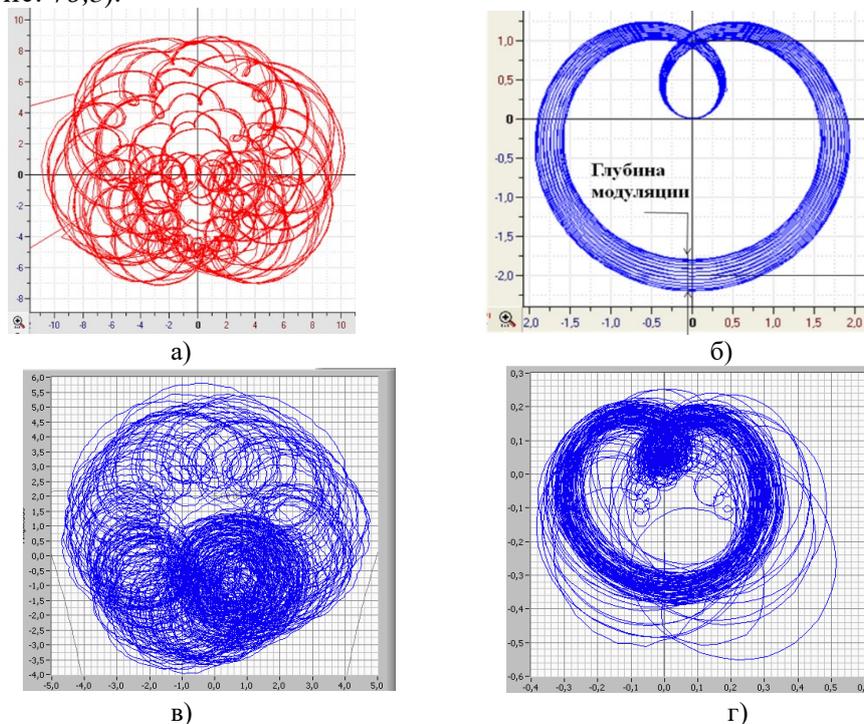


Рисунок 7. ФП при модуляции: а) фазовая модуляция (сгенерированный сигнал); б) амплитудная модуляция (сгенерированный сигнал); в) фазовая модуляция (диагностический сигнал); г) амплитудная модуляция (диагностический сигнал)

Figure 7. Phase portraits at modulation: a) phase modulation (generated signal); b) amplitude modulation (generated signal); c) phase modulation (diagnostic signal); d) amplitude modulation (diagnostic signal)

Если диагностическим является сигнал тока [2,7], то ФП исходного сигнала электромеханического оборудования почти всегда представляют собой амплитудно-модулированную окружность, анализ которой малоинформативен (несущие гармоники тока по амплитуде на порядок выше других). Поэтому целесообразно подвергнуть сигнал тока демодуляции и рассматривать ФП огибающей.

4. Примеры диагностики ЭПА с использованием ФПМ

Итак, при анализе ФП следует обращать внимание на следующие особенности:

- 1) на фигуру, сформированную несущими составляющими: окружность, кардиоида, нефроида, сложная эпициклоида;
- 2) на глубину и характер модуляции.

Если в объекте протекает неустановившейся процесс, то фигура может и не сформироваться. Фигура также может быть хаотической. При оценке тенденции обращают внимание на изменение размера, изменение сложности фигуры и увеличение глубины модуляции.

Рассмотрим пример. На рисунке 8 представлен ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 13ВЦ-36 при выполнении операции открытие. По изменению фигуры можно видеть: размер ФП увеличился, форма стала более сложной, сохранился петляющий характер линии. Численно форма портрета может быть оценена шенноновской энтропией H_{sh} , которая принята как мера сложности и хаотичности. В данном случае рост H_{sh} указывает на ухудшение состояния ЭПА 13ВЦ-36.

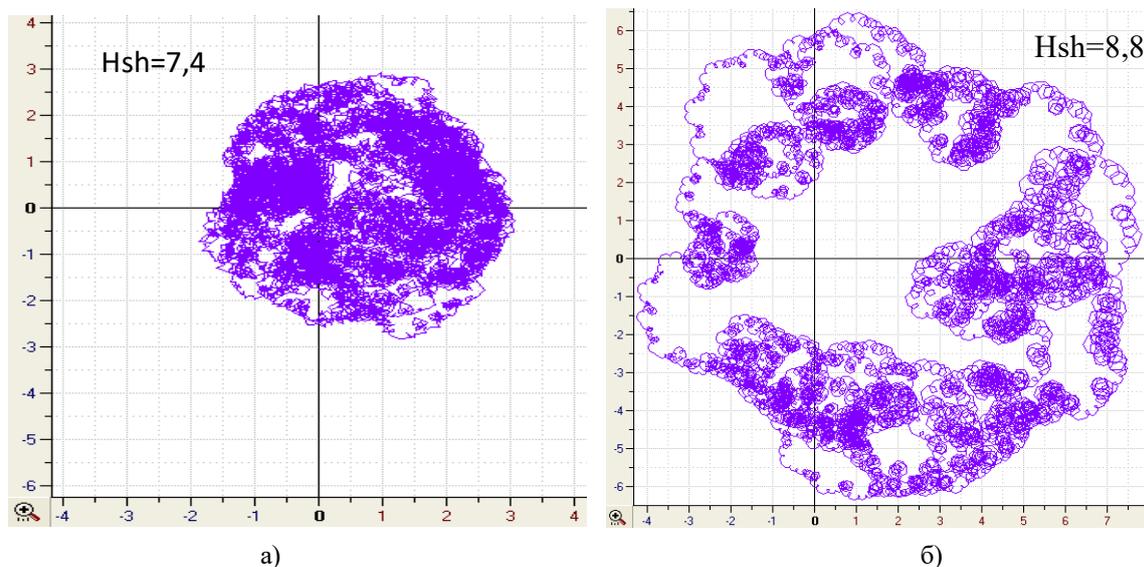


Рисунок 8. ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 13ВЦ-36: а) 17.06.2016; б) 05.07.2016
Figure 8. Phase portraits of the current signal of the electric actuator valve with technological position 13VC-36: а) 17.06.2016; б) 05.07.2016

Другой пример. На рисунке 9 представлен ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 1ВТ-56 при выполнении открытия и закрытия. Можно заключить: размер стал меньше при открытии и закрытии, форма эпициклоидическая при открытии и закрытии (изменилась разность фаз), гладкие линии указывают на амплитудную модуляцию, глубина которой снизилась. В целом наблюдается улучшение.

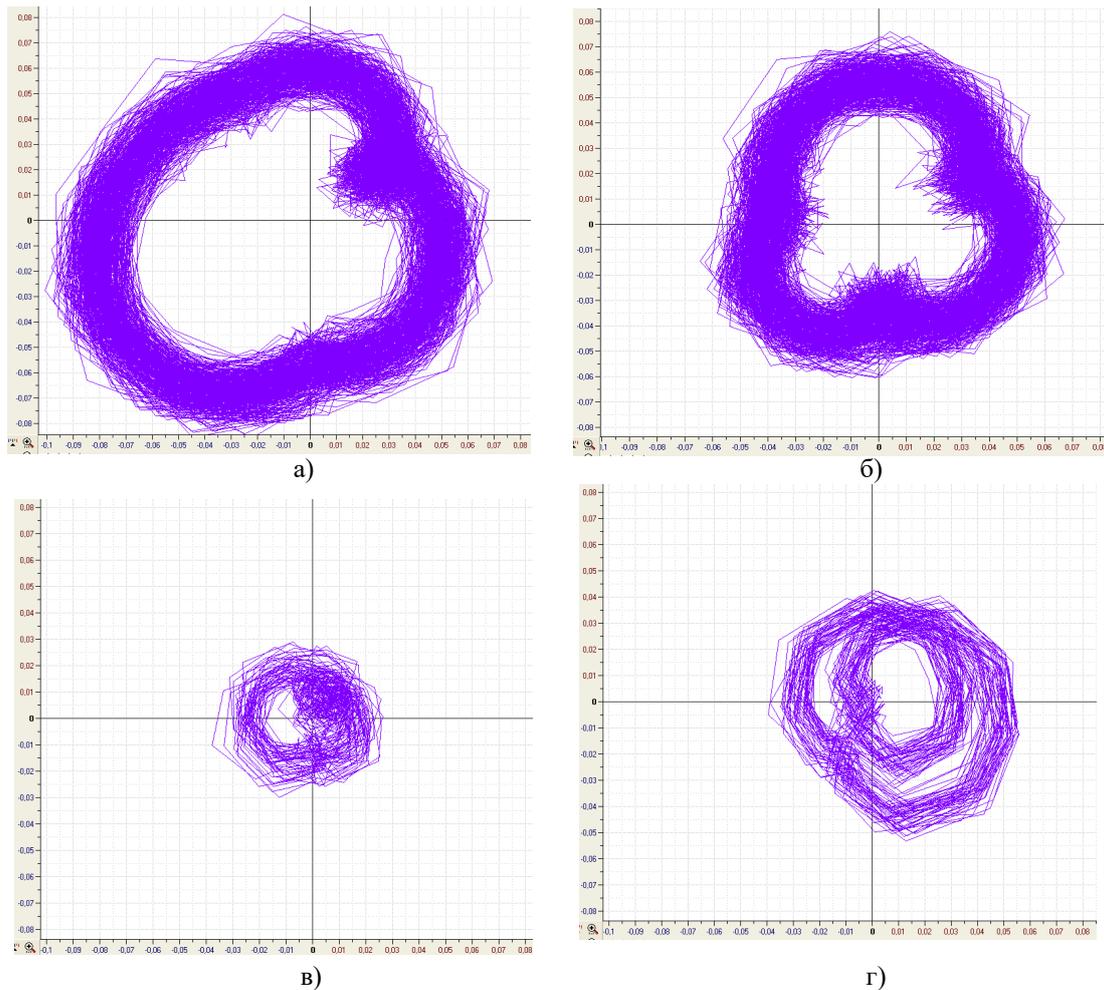


Рисунок 9 – ФП сигнала тока ЭПА с технологической позицией 1VT-56: а) открытие; б) закрытие;
в) открытие; з) закрытие

Figure 9. Phase Portraits of the current signal of the electric actuator valve with technological position 1VT-56:
a) opening; b) closing; c) opening; d) closing

Таким образом, основным преимуществом, которое дает представление сигнала в виде ФП является наглядное отображение динамических особенностей сигнала. Важными преимуществами перед традиционными, – статистическими и частотными [3] методами, – является возможность представление фазовой информации и возможность отличить фазовую и амплитудную модуляцию (тем самым уточнить вид дефекта). Следует отметить высокую чувствительность метода.

5. Результаты и выводы

Для повышения эффективности существующих методов обработки диагностических сигналов предлагается использование новых алгоритмов позволяющих извлекать дополнительную информацию о состоянии объекта за счет анализа нестационарной составляющей исходных данных.

Анализ динамики электромеханического оборудования с точки зрения нелинейных проявлений дефектов в диагностических сигналах обосновывает необходимость использования ФПМ. Диагностический сигнал описывается как фазор на комплексной плоскости, подвергаемый амплитудной и фазовой модуляции. Изложены теоретические основы фазово-плоскостного представления диагностических сигналов. Приводятся примеры применения метода к диагностическим сигналам ЭПА и показаны наиболее характерные формы фазовых траекторий из класса эпициклоид. Примерами из практики диагностирования продемонстрированы такие преимущества

фазово-плоскостного метода, как чувствительность, наглядность возможность идентификации вида модуляции, сдвига фаз, динамических и хаотических проявлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Федоров А.И., Витковский С.Л. Некоторые аспекты повторного продления срока эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-440 на примере энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2019;2:91–104. doi 10.26583/np.2019.2.08
2. Саубанов О.М., Валеев А.Р., Акимов В.И., Харисов Р.М., Ташбулатов Р.Р. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насоснокомпрессорного оборудования. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2019;2:330–35. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2019-10206>
3. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Санкт-Петербург: Севзапучцентр, 2013. 158 с.
4. Гаглоева И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов. *Инженерный вестник Дона*. 2013;3:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1842 (дата обращения: 28.04.2023).
5. Белов О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов. *Вестник Астраханского государственного университета. Серия: Морская техника и технология*. 2015;3:96–102. URL: <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/31410/view#article-info> (дата обращения: 28.04.2023).
6. Al-Bugharbee H., Trendailova I. A fault diagnosis methodology for rolling element bearings based on advanced signal pretreatment and autoregressive modelling. *Journal of sound and vibration*. 2016;369:246–265. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.12.052>.
7. Chernov A.V., Abidova E.A., Khagai L.S. Diagnostics of rotary equipment by means of entropic indices based on electrical signals. *Russian Engineering Research*. 2018;(38)9:699–701. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18090113>
8. Hassani H., Kalantari M., Beneki C. Comparative assessment of hierarchical clustering methods for grouping in singular spectrum analysis. *AppliedMath*. 2021;1(1):18–36. <https://doi.org/10.3390/appliedmath1010003>
9. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Zarochintseva I.V., Lapkis A.A., Chernov A.V. NPP refueling process monitoring based on the refueling machine current signals. *Journal of physics: Conference series*. September 2020;1679:032016. doi: 10.1088/1742-6596/1679/3/032016
10. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Chernov A.V. Methodology and hardware-software complex for diagnosing diesel generator units of nuclear power plants. *International journal of risk assessment and management*. 2021;24(2/3/4):97–116. doi: 10.1504/IJRAM.2021.126416

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

CONFLICT OF INTEREST:

The author declares no relevant conflicts of interest

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Елена Александровна Абидова, к.т.н., доцент кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543>

e-mail: e-abidova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Elena A. Abidova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543>

e-mail: e-abidova@mail.ru

Поступила в редакцию 13.06.2023

После доработки 29.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Received 13.06.2023

Revision 29.08.2023

Accepted 05.09.2023

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.515
DOI 10.26583/gns-2023-03-08
EDN YBZMTK



**Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200,
состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам
теплоносителя**

С.С. Правосуд^{1,2}  , Д.С. Маслаков² , Я.О. Якубов² , А.А. Овчеренко¹ 

¹ АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

² Северский технологический институт – филиал национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Россия

 SSePravosud@rosatom.ru

Аннотация. В силу того, что современная теория автоматического управления накладывает ограничения на математические модели объекта управления, дальнейшее развитие и верификация математических моделей ядерных энергетических установок, пригодных для синтеза системы автоматического регулирования мощности, является актуальной задачей. В статье рассматривается модель динамики низкого порядка со сосредоточенными параметрами водо-водяного энергетического реактора российского дизайна, а также проводится ее верификация с экспериментальными данными полноразмерного тренажера реактора ВВЭР-1200 в двух тестах, связанных с изменением положения 12 группы ОР СУЗ и изменением входной температуры теплоносителя. Для этого полученная модель была создана в программном пакете MATLAB в качестве S-function lv.2 для возможности обработки любых входных сигналов. В рамках предложенного подхода уравнение для описания процесса нагрева теплоносителя представлено в виде модели двух последовательно соединенных узлов. В представленной работе показано преимущество данного подхода по сравнению с традиционным, где среднее значение температуры теплоносителя определено как полусумма входной и выходной температур на примере теста с резким изменением входной температуры теплоносителя в активную зону. В частотной области авторы приводят анализ устойчивости модели в форме пространства состояний по отношению к различным внешним возмущениям. Сделаны выводы о возможности использования предложенной модели как объекта управления пятого порядка для параметрического синтеза регулятора системы автоматического регулирования мощности ядерной энергетической установки.

Ключевые слова: динамика реакторов, ВВЭР-1200, верификация, передаточная функция, пространство состояний, регулятор мощности, теплогидравлика, модель Манна, ОР СУЗ, MATLAB S-Function lv.2, Simulink.

Для цитирования: Правосуд С.С., Маслаков Д.С., Якубов Я.О., Овчеренко А.А. Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):82–95. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

**Verification of the WVER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit
adjacent to two coolant units**

Sergei S. Pravosud^{1,2}  , Daniil S. Maslakov² , Yaroslav O. Yakubov² ,
Aleksandra A. Ovcherenko¹ 

¹ Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russia

² Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russia

 SSePravosud@rosatom.ru

Abstract. As modern control systems engineering imposes limits on mathematical models of control objects, further development, and verification of the mathematical models suitable for power control system synthesis of nuclear power facilities is an ongoing problem. This article deals with the low-order dynamics model with lumped parameters of the Russian-designed pressurized water reactor, as well as its verification with experimental data from the full-size simulator of the WVER – 1200 nuclear reactor within two tests related to

changing the position of Group 12 of CPS CR and changing the inlet coolant temperature. This model was created as a MATLAB S-function lv.2 model because of its capability to handle any type of signal. Within this approach, the equation describing the coolant heating process is represented as a «two well-stirred tanks in series» model. The article demonstrates the upside of the given approach in comparison with the conventional approach, where the average temperature of the coolant is determined as an arithmetic mean of inlet and outlet coolant temperatures, respectively, on the basis of the test with a sudden change of the reactor inlet coolant temperature. In the frequency domain, the authors carry out stability analyses of the given model in a state-space form in relation to different external disturbances. Conclusions about the suitability of the given model as a fifth-order control object for parametric synthesis of a controller for the power control system of a nuclear power facility are drawn.

Keywords: Reactor dynamics, WWER-1200, verification, transfer function, state space representation, power controller, thermal hydraulics, Mann's model, CPS CR, MATLAB S-Function lv.2, Simulink.

For citation: Pravosud S.S., Maslakov D.S., Yakubov Ya.O., Ovcherenko.A.A. Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit adjacent to two coolant units. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):82–95. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

Введение

Современные нейтронно-физические, теплогидравлические и мультифизические расчетные коды ядерных реакторов постоянно улучшаются и верифицируются с экспериментальными данными; в основе этих кодов лежат нелинейные модели с распределенными по радиусу и высоте активной зоны технологическими параметрами ядерной энергетической установки. Однако, обладая высокой степенью прецизионности, они не могут быть использованы для синтеза систем автоматического регулирования мощности, в парадигме которого лежит предположение, что математическая модель объекта будет задана в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений [1]. Несмотря на то, что современная теория автоматического управления допускает использование нелинейных математических моделей объекта управления, для получения уравнения в пространстве состояний или передаточной функции они должны быть линеаризованы с использованием, например, метода малых отклонений [2], поэтому дальнейшее исследование и верификация математических моделей динамики ядерных реакторов низкого порядка, которые потенциально могут использоваться для такой цели, является актуальной задачей.

Классическая модель динамики низкого порядка

Подход при составлении моделей динамики низкого порядка подразумевает разбиение системы на области с однородными внутренними свойствами (узлы), и взаимодействующие с соседними областями (узлами) по известному закону. В простейшем случае такая модель может быть представлена двумя узлами – узлом нейтронно-физических процессов и узлом теплогидравлических процессов.

Нейтронно-физические процессы в активной зоне ядерного реактора описываются с использованием модели точечной кинетики ядерного реактора, базирующейся, в свою очередь, на односкоростном нестационарном уравнении диффузии нейтронов, дополненным уравнениями для концентраций ядер-предшественников запаздывающих нейтронов и температурными эффектами реактивности. Также при составлении уравнения традиционно используются одна усредненная [3] группа, три обобщенные (Skinner – Cohen model) группы [4-6], или шесть групп [7] для концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.

В свою очередь, качественный анализ теплогидравлических процессов должен включать в себя уравнения, описывающие сохранение энергии, импульса, и массы теплоносителя. Однако, данный подход может быть упрощен в предположении о том, что теплоноситель имеет постоянную плотность, и давление с массовым расходом не изменяются, что позволяет исключить из рассмотрения уравнения для сохранения массы и импульса. Также считается, что изменение температуры теплоносителя,

вызванное его нагревом из-за взаимодействия с тепловыделяющими элементами, происходит в осевом направлении [8], а направление теплопередачи от узла топливных элементов к узлу теплоносителя – в радиальном.

С учетом перечисленных выше допущений для шести групп запаздывающих нейтронов математическая модель динамики реактора ВВЭР может быть записана системой уравнений (1) [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(T, \theta) - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i^*(t) \\ \frac{dC_i^*(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i^*(t) \\ m_T \gamma_T \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}(t)) \\ m_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}} \frac{d\bar{\theta}(t)}{dt} = (1 - \varepsilon) P(t) + K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}(t)) - G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}} (\theta_{\text{вых}} - \theta_{\text{вх}}) \\ \rho(T, \theta) = \rho + \alpha_T^T (\bar{T}(t) - \bar{T}_0) + \alpha_{\text{ТН}}^T (\bar{\theta}(t) - \bar{\theta}_0) \end{array} \right. \quad (1)$$

где P – тепловая мощность ядерного реактора (МВт);

C_i^* – нормированная на мощность концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов (МВт);

\bar{T} – среднее значение температуры топливных элементов ($^{\circ}\text{C}$);

$\bar{\theta}$ – среднее по высоте и ширине каналов теплоносителя значение температуры теплоносителя в активной зоне ($^{\circ}\text{C}$);

Λ – время жизни нейтронов (сек);

ρ – реактивность, вносимая ОР СУЗ;

β – суммарная доля запаздывающих нейтронов $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$;

λ_i – постоянная распада i -ой группы ядер-предшественников запаздывающих нейтронов (сек^{-1});

ε – доля энергии, выделяющаяся непосредственно в топливе ($\sim 97\%$);

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхность теплообмена (м^{-2});

$K_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$);

m_T – масса топливных элементов (кг);

γ_T – удельная теплоемкость топливных элементов ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг } ^{\circ}\text{C}}$);

$G_{\text{ТН}}$ – массовый расход теплоносителя через реактор ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$);

$m_{\text{ТН}}$ – масса теплоносителя в активной зоне (кг);

$\gamma_{\text{ТН}}$ – удельная теплоемкость теплоносителя ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг } ^{\circ}\text{C}}$);

$\theta_{\text{вых}}, \theta_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на выходе из активной зоны и входе в активную зону, усредненные поперек каналов теплоносителя ($^{\circ}\text{C}$);

α_T^T – коэффициент реактивности по температуре топлива ($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$);

$\alpha_{\text{ТН}}^T$ – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя ($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$).

Некоторые величины, входящие в систему уравнений (1), требуют дополнительного пояснения: площадь поверхности теплообмена $S_{\text{пов}}$ была принята равной площади поверхности одного ТВЭЛ $S_{\text{ТВЭЛ}}$, умноженного на число ТВЭЛ $N_{\text{ТВЭЛ}}$ (312 шт.) в ТВС и на число ТВС $N_{\text{ТВС}}$ (163 шт.) в загрузке реактора как (2.1):

$$S_{\text{пов}} = S_{\text{ТВЭЛ}} N_{\text{ТВЭЛ}} N_{\text{ТВС}} \quad (2.1)$$

Масса теплоносителя $m_{ТН}$, находящегося в активной зоне реактора, была определена следующим образом: для известного расстояния h между центрами двух ТВЭЛ, диаметр которых равен D , можно найти приближенное значение площади, занятой теплоносителем, как представлено на рисунке 1 и выражением (2.2):

$$S_{ТН} \approx h^2 - \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2)$$

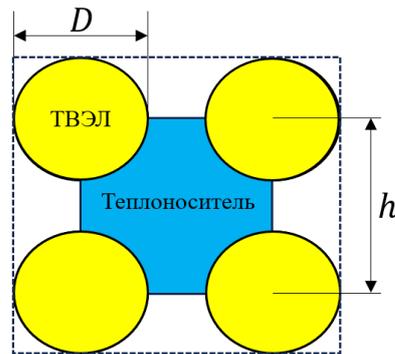


Рисунок 1. К определению площади, занимаемой теплоносителем
Figure 1. Determination of the area occupied by coolant

Зная площадь, занимаемую теплоносителем $S_{ТН}$ и умножая ее на общее число ТВЭЛ $N_{ТВЭЛ}$ и общее число ТВС $N_{ТВС}$ можно получить общую площадь теплоносителя. Тогда умножение полученного значения на длину одного ТВЭЛ $l_{ТВЭЛ}$ и на плотность теплоносителя $\gamma_{ТН}$ позволит определить массу теплоносителя следующим образом как в выражении (2.3):

$$m_{ТН} \approx \left(h^2 - \frac{\pi D^2}{4} \right) N_{ТВЭЛ} N_{ТВС} l_{ТВЭЛ} \gamma_{ТН} \quad (2.3)$$

Значения параметров реактора, используемые при моделировании, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры реактора, использованные при моделировании
Table 1. Nuclear reactor parameters used in the simulation

Параметр	Численное значение
Тепловая мощность реактора P	3200
Массовый расход теплоносителя $G_{ТН}$	19000
Масса топлива m_T	86000
Масса теплоносителя в АЗ $m_{ТН}$	6000
Коэффициент теплопередачи \times площадь поверхности теплообмена $K_{тепл} S_{пов}$	945325
Температура теплоносителя на входе в АЗ	297
Удельная теплоемкость топливных элементов γ_T	277
Удельная теплоемкость теплоносителя $\gamma_{ТН}$	4850

В уравнении теплового баланса для теплоносителя в системе (1) содержится три температуры: средняя $\bar{\theta}$, получаемая непосредственно при моделировании, входная $\theta_{вх}$, задаваемая в качестве начальных условий, и выходная $\theta_{вых}$, для определения которой необходимы некоторые допущения. В работе В.К. Семенова и М.А. Вольман «Обоснование математической модели теплообмена для реактора с сосредоточенными

параметрами» [8] получено теоретическое обоснование для связи трех температур между собой следующим соотношением (2.4):

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_{\text{ВХ}} + \theta_{\text{ВЫХ}}}{m}, \quad (2.4)$$

где параметр $m \approx 2$.

Численные эксперименты, также проведенные в работе В.К. Семенова и М.А. Вольман [8] показывают, что отличие полученной реальной средней температуры от значения полусуммы входной и выходной температур теплоносителя составляет порядка 3 %. Однако, при выражении выходной температуры из (2.4) следует (2.5):

$$\theta_{\text{ВЫХ}} = m\bar{\theta} - \theta_{\text{ВХ}}, \quad (2.5)$$

что, в свою очередь, приводит к противоречивому результату: резкое понижение или повышение температуры теплоносителя на входе в активную зону приведет к резкому повышению или понижению температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, соответственно. Данная особенность при увеличении и уменьшении $\theta_{\text{ВХ}}$ скачком на $\sim 5^\circ\text{C}$ продемонстрирована на рисунке 2.

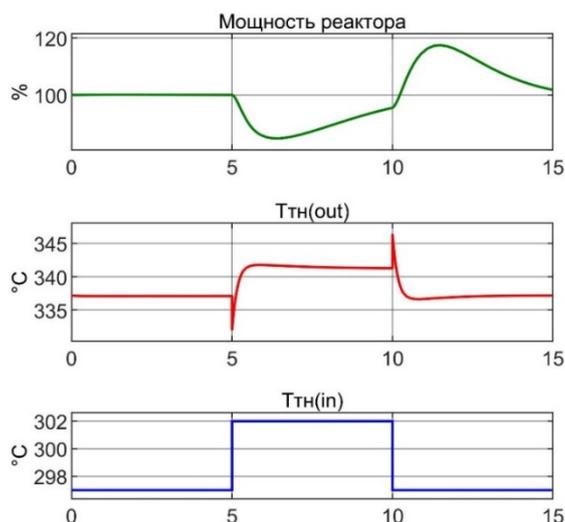


Рисунок 2. Поведение системы (1) при резком изменении $\theta_{\text{ВХ}}$
 Figure 2. Behavior of the system (1) at a sudden change of θ_{in}

$T_{\text{тн}}(\text{out})$ соответствует поведению температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, $T_{\text{тн}}(\text{in})$ соответствует поведению температуры теплоносителя на входе в активную зону (см. рис. 2). При проведении численного моделирования в Simulink MATLAB модель (1) была представлена в виде Level-2 MATLAB S-Function – файла, а изменение температуры теплоносителя на входе в активную зону задавалось блоком Step.

Теплогидравлическая модель Р. Манна

Одним из возможных решений проблемы, вызванной формулой (2.4), является предположение о равенстве выходной температуры теплоносителя $\theta_{\text{ВЫХ}}$ и средней температуры самого узла $\bar{\theta}$. Такое предположение получило название «хорошо перемешанный объем жидкости» («well-stirred tank») [9]. Данная модель может быть записана как (3.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(T, \theta) - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i^*(t) \\ \frac{dC_i^*(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i^*(t) \\ m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}} \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}(t)) \\ m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}} \frac{d\bar{\theta}(t)}{dt} = (1 - \varepsilon) P(t) + K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}(t)) - G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}} (\bar{\theta}(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ \rho(T, \theta) = \rho + \alpha_{\text{T}}^{\text{T}} (\bar{T}(t) - \bar{T}_0) + \alpha_{\text{TН}}^{\text{T}} (\bar{\theta}(t) - \bar{\theta}_0) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Ожидаемо, что такое допущение будет демонстрировать неудовлетворительный результат, касаемый точности измерения значения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, поэтому в качестве дальнейшего развития этой идеи в работе [10] используется подход Р. Манна, в рамках которого также лежит следующее предположение: однофазный теплоноситель находится в двух последовательно соединенных узлах («two well-stirred tanks in series»); это предполагает равенство между выходной температурой теплоносителя из данных узлов и их средней температурой как в (3.2):

$$\theta_{\text{вых}_1} = \bar{\theta}_1; \theta_{\text{вых}_2} = \bar{\theta}_2 \quad (3.2)$$

Оба узла теплоносителя примыкают к одному топливному узлу, а также получают ровно половину от выделяющейся в теплоносителе энергии. В то же время температура на выходе из первого узла теплоносителя обеспечивает движущую силу теплопередачи от топливных элементов и служит входной температурой во второй узел теплоносителя.

Исходя из перечисленных выше допущений, модифицированная система уравнений точечной динамики реактора ВВЭР и PWR [11,12], может быть записана в виде системы уравнений (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(T, \theta) - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i^*(t) \\ \frac{dC_i^*(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i^*(t) \\ m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}} \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}} \frac{d\bar{\theta}_1(t)}{dt} = \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) - G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}} (\bar{\theta}_1(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}} \frac{d\bar{\theta}_2(t)}{dt} = \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) - G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}} (\bar{\theta}_2(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ (T, \theta) = \rho + \alpha_{\text{T}}^{\text{T}} (\bar{T}(t) - \bar{T}_0) + \frac{\alpha_{\text{TН}}^{\text{T}}}{2} (\bar{\theta}_1(t) - \bar{\theta}_{1,0}) + \frac{\alpha_{\text{TН}}^{\text{T}}}{2} (\bar{\theta}_2(t) - \bar{\theta}_{2,0}) \end{array} \right. \quad (4)$$

В модели (4) $m_{\text{TН}}$ в каждом узле равна половине общей массы теплоносителя в активной зоне; также следует отметить, что полученная система (4), как и исходные системы (1) или (3), является «жесткой» [7,13] системой обыкновенных дифференциальных уравнений, расширяемых, по мере необходимости, уравнениями дополнительных процессов, таких как отравление реактора продуктами деления.

Важным преимуществом подхода (4) в сравнении с подходом (1) является то, что резкое понижение или повышение температуры на входе в активную зону не вызывает резкого повышения или понижения температуры на выходе из активной зоны, соответственно. Поведение системы (4) на примере резкого увеличения и затем резкого уменьшения температуры теплоносителя на входе в активную зону $\theta_{\text{вх}}$ скачком на $\sim 5^\circ\text{C}$ представлено на рисунке 3.

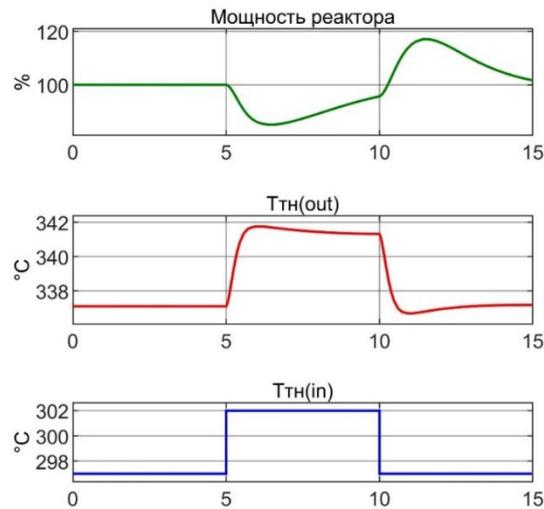


Рисунок 3. Поведение системы (4) при резком изменении $\theta_{\text{вх}}$
Figure 3. Behavior of the system (4) at a sudden change of θ_{in}

Исходя из представленных графиков (см. рис. 3), также можно сделать вывод, что мощность изменяется идентичным образом, как и в модели (1), а в установившемся режиме выходная температура теплоносителя равна значению, представленному на рисунке 2.

Подход, используемый при составлении данной модели, также может быть расширен для большего числа узлов [10]: в случае использования двух узлов топливных элементов к каждому необходимо подводить пару узлов теплоносителя.

Линеаризованная модель и оценка ее устойчивости

Для представления системы (4) в форме, пригодной для синтеза регулятора системы автоматического регулирования мощности, она должна быть линеаризована. Переходя к одной усредненной группе запаздывающих нейтронов и применяя метод малых отклонений, представим переменные (5.1) в виде суммы постоянного значения и отклонения δ от этого значения:

$$\begin{cases} P(t) = P_0 + \delta P(t) \\ \bar{C}(t) = \bar{C}_0 + \delta \bar{C}(t) \\ \bar{T}(t) = \bar{T}_0 + \delta \bar{T}(t) \\ \bar{\theta}_1(t) = \bar{\theta}_{1_0} + \delta \bar{\theta}_1(t) \\ \bar{\theta}_2(t) = \bar{\theta}_{2_0} + \delta \bar{\theta}_2(t) \\ \rho = \rho_0 + \delta \rho_0 \\ \theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{вх}_0} + \delta \theta_{\text{вх}} \end{cases} \quad (5.1)$$

С учетом (5.1) система (4), исключая переменные, описывающие установившийся режим, а также величины второго порядка малости, может быть записана в виде системы уравнений (5.2):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\delta P(t)}{dt} &= \frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} \delta P(t) + \lambda \delta \bar{C}(t) + \frac{\alpha_{\text{T}}^{\text{T}} P_0}{\Lambda} \delta \bar{T}(t) + \frac{\alpha_{\text{TН}}^{\text{T}} P_0}{2\Lambda} \delta \bar{\theta}_1(t) + \frac{\alpha_{\text{TН}}^{\text{T}} P_0}{2\Lambda} \delta \bar{\theta}_2(t) + \frac{P_0}{\Lambda} \delta \rho_0 \\ \frac{d\delta \bar{C}(t)}{dt} &= \frac{\beta}{\Lambda} \delta P(t) - \lambda \delta \bar{C}(t) \\ \frac{d\delta \bar{T}(t)}{dt} &= \frac{\varepsilon}{m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}}} \delta P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}}} \delta \bar{T}(t) - \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}}} \delta \bar{\theta}_1(t) \\ \frac{d\delta \bar{\theta}_1(t)}{dt} &= \frac{1 - \varepsilon}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} \delta P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} \delta \bar{T}(t) - \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + 2G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} \delta \bar{\theta}_1(t) + \frac{G_{\text{TН}}}{m_{\text{TН}}} \delta \theta_{\text{вх}} \\ \frac{d\delta \bar{\theta}_2(t)}{dt} &= \frac{1 - \varepsilon}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} \delta P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} \delta \bar{T}(t) - \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + 2G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} \delta \bar{\theta}_1(t) + \frac{G_{\text{TН}}}{m_{\text{TН}}} \delta \bar{\theta}_2 \end{aligned} \right. \quad (5.2)$$

Система (5.2) представляет собой линеаризованную систему, где входными возмущениями являются внешняя реактивность $\delta\rho_0$ и отклонение температуры теплоносителя на входе $\delta\theta_{\text{вх}}$. Следовательно, уравнение в пространстве состояний принимает вид (5.3):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (5.3)$$

где $x(t)$ – вектор состояния;

$u(t)$ – вектор управления;

$y(t)$ – вектор выходных параметров;

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} & \lambda & \frac{\alpha_{\text{T}}^{\text{T}} P_0}{\Lambda} & \frac{\alpha_{\text{TН}}^{\text{T}} P_0}{2\Lambda} & \frac{\alpha_{\text{TН}}^{\text{T}} P_0}{2\Lambda} \\ \frac{\beta}{\Lambda} & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\varepsilon}{m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}}} & 0 & \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}}} & -\frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{m_{\text{T}} \gamma_{\text{T}}} & 0 \\ \frac{1 - \varepsilon}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} & 0 & \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} & -\frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + 2G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} & 0 \\ \frac{1 - \varepsilon}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} & 0 & \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} & \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + 2G_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}}{2m_{\text{TН}} \gamma_{\text{TН}}} & -\frac{G_{\text{TН}}}{m_{\text{TН}}} \end{bmatrix} \quad \text{– матрица системы,}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{P_0}{\Lambda} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G_{\text{TН}}}{m_{\text{TН}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{– матрица управления,}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{– матрица выхода,}$$

$$D = [0] \quad \text{– матрица прямой связи.}$$

В матрице C в качестве выходных параметров были выбраны отклонение мощности реактора δP , отклонение средней температуры топливных элементов $\delta \bar{T}$ и отклонение выходной температуры теплоносителя $\delta \bar{\theta}_2$ (отклонение температуры второго узла). Для оценки влияния возмущений на поведение системы (4.3) в MATLAB были построены амплитудно-частотные характеристики по отношению ко входным возмущениям $\delta\rho_0$ и $\delta\theta_{\text{вх}}$, представленные на рисунках 4а и 4б.

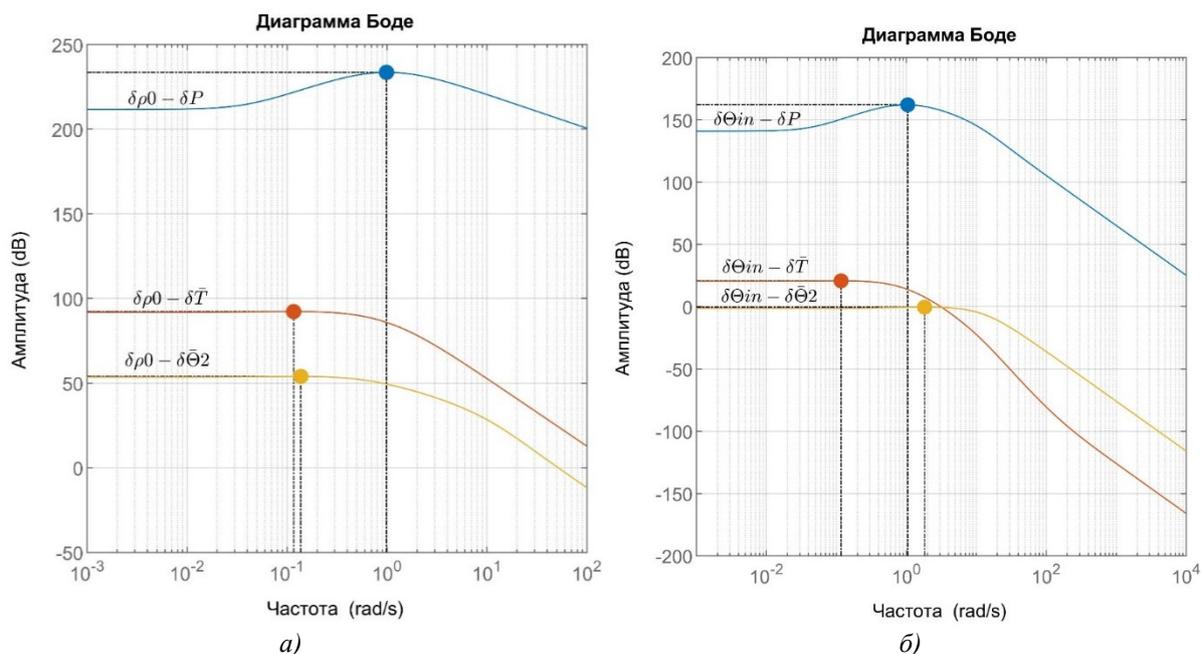


Рисунок 4. Частотные характеристики модели (4.3) по отношению: а) к возмущению $\delta\rho_0$; б) к возмущению $\delta\Theta_{ex}$
 Figure 4. Frequency response of the model (4.3) in relation: a) to the disturbance of $\delta\rho_0$; б) to the disturbance of $\delta\Theta_m$

Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод, что система (4.3) является устойчивой, так как частотные характеристики при малых значениях частоты ω стремятся к постоянному значению независимо от вида возмущающего воздействия. Также из выражения (5.3) можно определить передаточную функцию ядерного реактора к возмущающим воздействиям. Для этого необходимо воспользоваться преобразованием вида (5.4):

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D, \quad (5.4)$$

где I – единичная матрица размерности матрицы A .

Следует отметить, что в случае использования не самих переменных, а их отклонений от стационарного значения, требования к определению передаточной функции – нулевые начальные условия – выполняются. Тогда передаточная функция по каналу «отклонение реактивности – относительное отклонение мощности реактора» при значениях параметров, представленных в таблице 1, имеет следующие численные значения (5.5):

$$W_{\delta\rho_0 - \delta P}(s) = \frac{1,067 \times 10^{12} s^4 + 2,731 \times 10^{13} s^3 + 1,763 \times 10^{14} s^2 + 2,025 \times 10^{13} s + 5,26 \times 10^{11}}{3,2 \times 10^9 s^5 + 8,874 \times 10^{10} s^4 + 7,084 \times 10^{11} s^3 + 1,301 \times 10^{12} s^2 + 6,293 \times 10^{11} s + 4,423 \times 10^{10}}, \quad (5.5)$$

что представляет собой объект управления пятого порядка. Для таких систем в работе «Design of controllers for higher order systems» [14] предложен метод параметрического синтеза ПИД-регулятора на основе модального метода с учетом расположения комплексно-сопряженных полюсов.

Верификация предложенной модели с экспериментальными данными

Верификация полученной модели (4) производилась с экспериментальными данными, полученными с аналитического тренажера реактора ВВЭР-1200 разработки АО ИТЦ «ДЖЭТ» и установленным в АНО ДПО «Техническая академия Росатома», в двух тестах: отслеживалась реакция системы на изменение положения 12 группы ОР СУЗ ($\delta\rho_0$), и изменение температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора путем снижения давления в парогенераторе ($\delta\theta_{вх}$).

Полученную модель (4), созданную в MATLAB в качестве Level-2 S-Function – файла, для проведения первого теста необходимо дополнить математической моделью 12 группы ОР СУЗ, которая может быть получена из теории возмущений, и представлена в виде формулы (6):

$$\rho(z) = \rho_0 \frac{z}{H} \left(1 - \frac{\sin\left(\frac{2\pi z}{H}\right)}{\frac{2\pi z}{H}} \right), \quad (6)$$

где ρ_0 – эффективность в долях реактивности полностью погруженной 12 группы ОР СУЗ;

z – координата 12 группы ОР СУЗ;

H – высота активной зоны реактора ВВЭР-1200.

Результаты расчета, полученные по формуле (6), в диапазоне положения ОР СУЗ 7-150 см показывают заниженный результат; в диапазоне 150-220 см – завышенный. Их сравнение приведено на рисунке 5, где представлены результаты численного эксперимента и результаты расчета по формуле (6) соответственно:

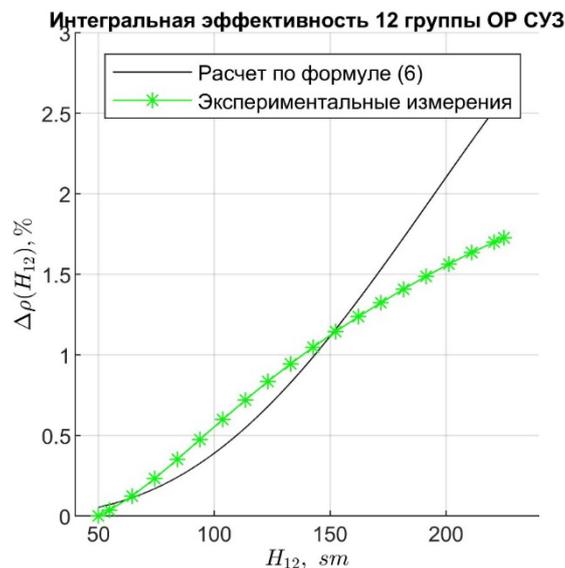


Рисунок 5. Сравнение результатов, полученных по формуле (6) с экспериментальными данными
Figure 5. Comparison of the results obtained by formula (6) with experimental data

Математическая модель 12 группы ОР СУЗ (6) при моделировании в Simulink была представлена в виде MATLAB Function блока. Экспериментальные зависимости приведены на рисунках 6а и 7а; результаты, полученные по модели (4), приведены на рисунках 6б и 7б, соответственно.

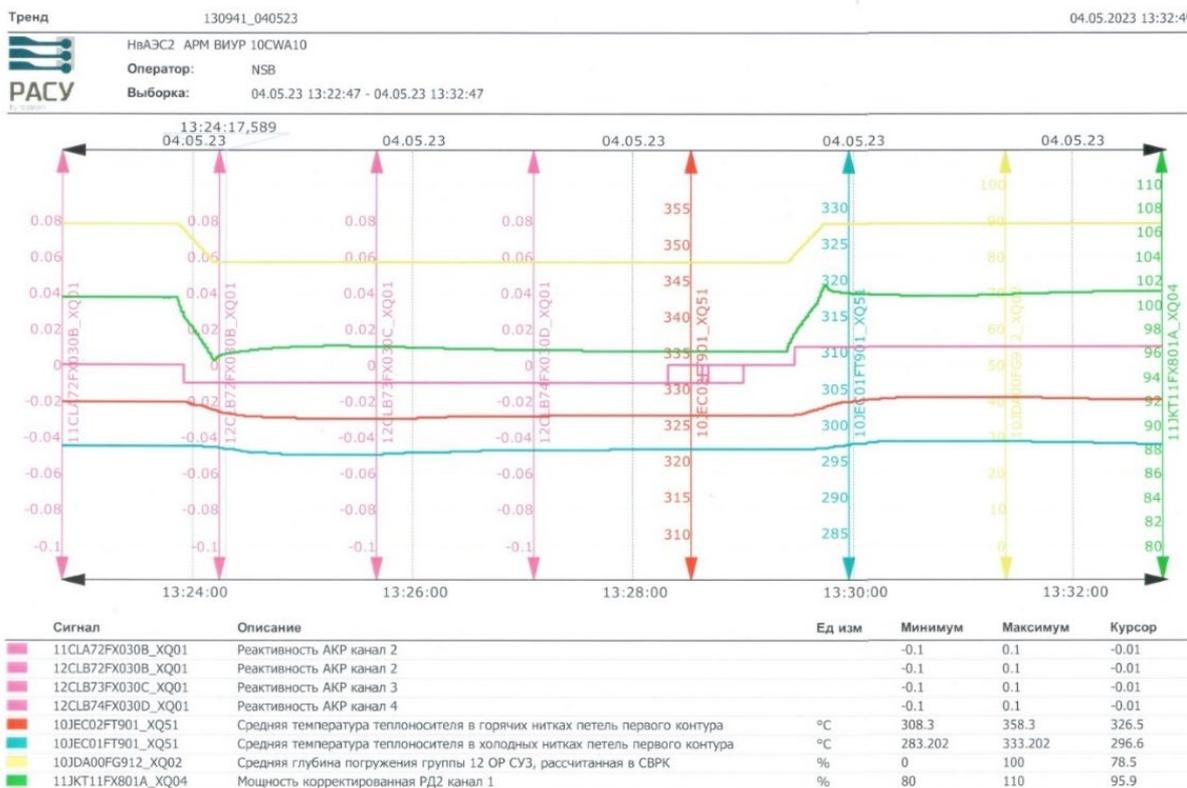


Рисунок 6а. Параметры тренажера при плавном вводе и выводе 12 группы ОР СУЗ
 Figure 6a. Simulator parameters with at a smooth insertion and withdrawal of Group 12 of CPS CR

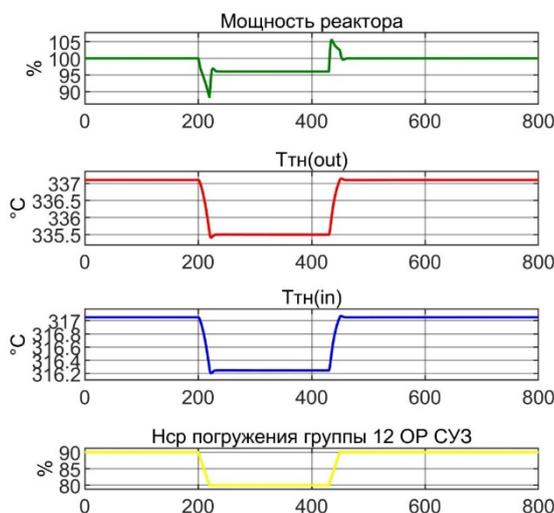


Рисунок 6б. Параметры модели (4) при плавном вводе и выводе модели (6) 12 группы ОР СУЗ
 Figure 6b. Parameters of the model (4) at a smooth insertion and withdrawal of the model (6) of Group 12 of CPS CR

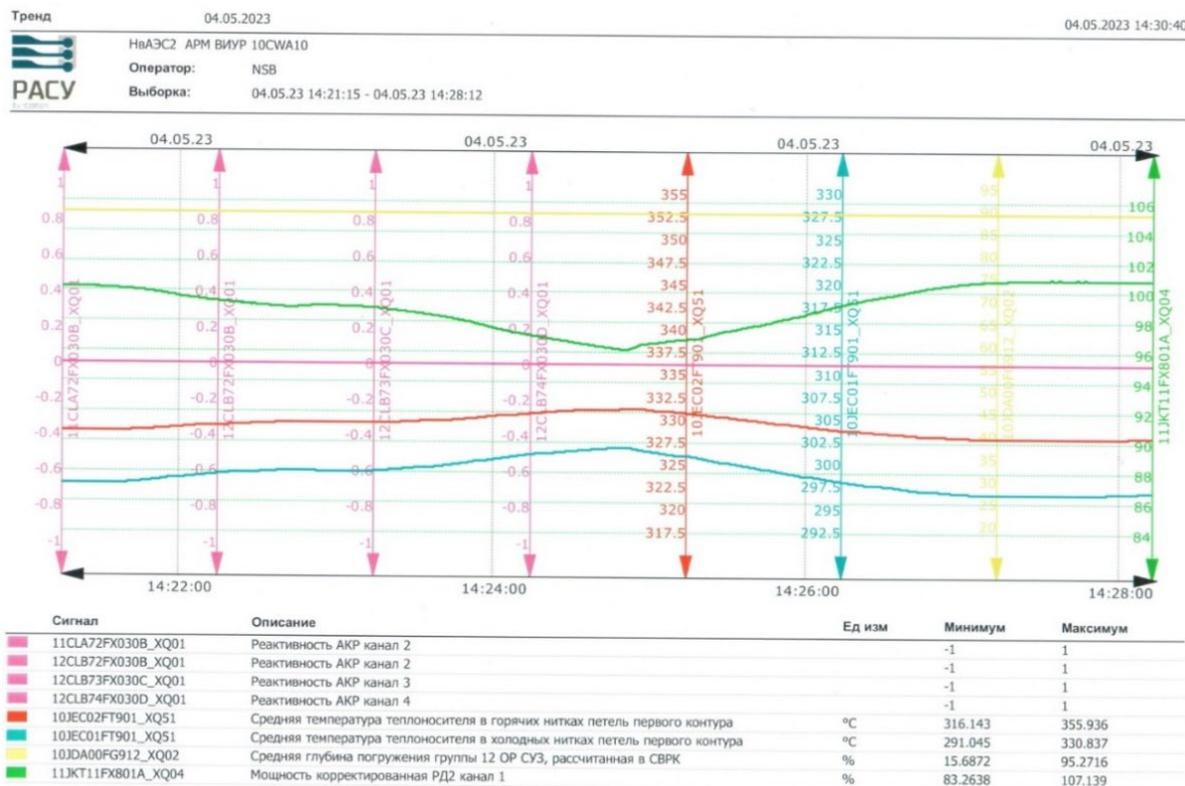


Рисунок 7а. Параметры тренажера при плавном повышении и понижении температуры теплоносителя на 5°C на входе в активную зону путем изменения давления в парогенераторе
 Figure 7a. Simulator parameters at a smooth increase and decrease of the reactor inlet coolant temperature by 5°C though changing the steam generator pressure

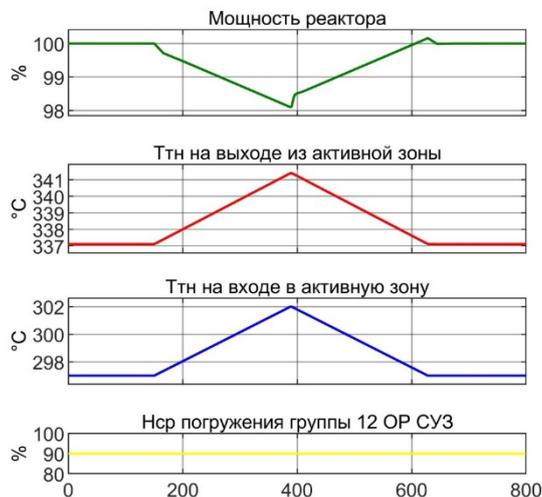


Рисунок 7б. Параметры модели (4) при плавном повышении и понижении температуры теплоносителя на 5°C на входе в активную зону

Figure 7b. Parameters of the model (4) at a smooth increase and decrease of the reactor inlet coolant temperature by 5°C

На рисунках 6а и 7а приведены следующие данные: желтым цветом изображено положение 12 группы ОР СУЗ, зеленым цветом изображена мощность ядерного реактора, розовым цветом – показания реактиметра, красным цветом – средняя температура теплоносителя в горячих нитках петель первого контура, синим цветом - средняя температура теплоносителя в холодных нитках петель первого контура.

Моделирование плавного повышения и понижения температуры теплоносителя на входе $\theta_{вх}$ осуществлялось в среде Simulink MATLAB с помощью комбинации блоков Ramp и блоков Saturation.

Опираясь на приведенные данные графиков 6б и 7б, можно сделать вывод, что предложенная модель (4) динамики низкого порядка в целом демонстрирует удовлетворительное поведение в сравнении с экспериментальными данными, полученными на тренажере.

Заключение

Исследованная в работе модель динамики низкого порядка, состоящая из классической модели точечной кинетики, дополненная модифицированной моделью теплогидравлики в подходе Р. Манна, состоящей из двух узлов теплоносителя, примыкающих к одному топливному узлу, лишена недостатка классической модели динамики низкого порядка, связанного с противоречивым поведением входной и выходной температур теплоносителя, соответственно. Ее потенциальная масштабируемость на большее число блоков, например для 2 параллельных узлов топливных элементов, получающих ровно половину от общей выделяющейся в них энергии, с примыкающим к ним 4 последовательным узлам теплоносителя, потенциально может привести к улучшению точности расчетов и моделирования переходных процессов. В то же время, данная математическая модель может быть линеаризована и представлена как модель в пространстве состояний или передаточная функция, что позволяет производить параметрический синтез регулятора системы автоматического регулирования мощности ядерной энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Pikina G.A., Dinh L.V., Pashchenko A.F., Pashchenko F.F. The dynamic models of water-water nuclear reactor with temperature reactivity coefficients. *IEEE 10th Conference on industrial electronics and applications (ICIEA)*. Auckland. New Zealand 2015. P. 1014–1019. doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334256.
2. Jiang Y., Geslot B., Lamirand V., Leconte P. Review of kinetic modulation experiments in low power nuclear reactors. *European Journal of Physics N (EPJ-N) Nuclear sciences and technologies*. 2020;(6):55. <https://doi.org/10.1051/epjn/2020017>
3. Liu X., Wang M. Nonlinear fuzzy model predictive control for a PWR nuclear power plant. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014; 908526. <https://doi.org/10.1155/2014/908526>
4. Zaidabadi nejad M., Ansarifard G.R. Robust feedback-linearization control for axial power distribution in pressurized water reactors during load-following operation. *Nuclear engineering and technology*. 2018;(50)1:97–106. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.10.013>
5. Pilehvar A.F., Esteki M.H., Hedayat A., Ansarifard G.R. Self-pressurization analysis of the natural circulation integral nuclear reactor using a new dynamic model. *Nuclear engineering and technology*. 2018;(50)5:654–664. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.03.019>
6. Mousakazemi S.M.H., Ayoobian N., Ansarifard G.R. Control of the pressurized water nuclear reactors power using optimized proportional – integral- derivative controller with particle swarm optimization algorithm. *Nuclear engineering and technology*. 2018;(50)6:877–885. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.04.016>
7. Вольман М.А. Моделирование переходных процессов в реакторе ВВЭР-1000 для предварительной подготовки оперативного персонала. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016;(9-10):112–118. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-112-118>
8. Семенов В.К., Вольман М.А. Обоснование математической модели теплообмена для реактора с сосредоточенными параметрами. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;4(17):35–42. URL: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/4_2015.pdf (дата обращения: 26.05.2023).
9. Ball S.J. Approximate models for distributed parameter heat transfer systems. 1963. 139 p. URL: https://openlibrary.org/works/OL2662120W/Approximate_models_for_distributed-parameter_heat-transfer_systems?edition=key%3A/books/OL13953850M (дата обращения: 26.05.2023).
10. Upadhyaya B.R., Lish M.R., Hines J.W., Tarver R.A. Instrumentation and control strategies for an integral pressurized water reactor. *Nuclear engineering and technology*. 2015;(47)2:148–156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2015.01.001>
11. Vajpayee V., Top E., Becerra V.M. Analysis of Transient Interactions between a PWR nuclear power plant and a faulted electricity grid. *Energies* 2021;14(6):1573. <https://doi.org/10.3390/en14061573>

12. Wan J., Wang P., Wu Sh., Zhao F. Controller design and optimization of reactor power control system for ASPWR. *Progress in nuclear energy*. 2017;100:233–244. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.06.006>

13. Singh S.S., Mohapatra D. Solution of the reactor point kinetics equations by matlab computing. *Nuclear Technology and Radiation Protection*. Year 2015;30(1):11–17 <https://doi.org/10.2298/NTRP1501011S>

14. Prokopev A., Nabizhanov Z., Ivanchura V., Emelyanov R. Design of controllers for higher order systems. *International multi-conference on engineering. Computer and information sciences (SIBIRCON)*. Novosibirsk, Russia. 2019. P. 0607–0611. doi: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958442

ВКЛАД АВТОРОВ:

Правосуд С.С. – постановка задачи, анализ литературы, работа на тренажере, математическое моделирование, оформление результатов;

Маслаков Д.С. – анализ литературы, расчеты, математическое моделирование;

Якубов Я.О. – анализ литературы, расчеты, математическое моделирование;

Овчеренко А.А. – анализ литературы, расчеты, работа на тренажере, оформление результатов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Pravosud S.S. – problem statement, literature review, working on the simulator, mathematical modelling, registration of results;

Maslakov D.S. – literature review, calculations, mathematical modelling;

Yakubov Ya.O. – literature review, calculations, mathematical modelling;

Ovcherenko A.A. – literature review, calculations, working on the simulator, registration of results.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Авторы выражают благодарность начальнику отдела тренажерного обучения АНО ДПО «Техническая академия Росатома» В.В. Ледяеву за помощь в проведении работ.

ACKNOWLEDGMENTS:

The authors express their gratitude to V.V. Ledyayev, Head of the Simulator Training Department of the Technical Academy of Rosatom for assistance in carrying out the work.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Сергеевич Правосуд, инженер по подготовке персонала I категории кафедры «Измерительные системы и метрология» АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл.; преподаватель кафедры «Электроника и автоматика физических установок» СТИ НИЯУ «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru, SSPravosud@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei S. Pravosud, First category engineer for personnel training of the Department of Measuring Systems and Metrology at Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation; Instructor of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru, SSPravosud@mephi.ru

Даниил Сергеевич Маслаков, студент 6-го курса кафедры «Электроника и автоматика физических установок», Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9810-1066>

e-mail: danmaslakov@mail.ru

Daniil S. Maslakov, 6th year student of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9810-1066>

e-mail: danmaslakov@mail.ru

Ярослав Олегович Якубов, студент 5-го курса кафедры «Электроника и автоматика физических установок», Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3461-0476>

e-mail: yarik.tomsk@yandex.ru

Yaroslav O. Yakubov, 5th year student of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4004-2275>

e-mail: yarik.tomsk@yandex.ru

Александра Андреевна Овчеренко, помощник руководителя АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4004-2275>

e-mail: AAOvcherenko@rosatom.ru

Aleksandra A. Ovcherenko, Executive assistant at Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4004-2275>

e-mail: AAOvcherenko@rosatom.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023

После доработки 17.08.2023

Принята к публикации 22.08.2023

Received 14.06.2023

Revision 17.08.2023

Accepted 22.08.2023

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES

УДК 331.108.2: 620.9

DOI 10.26583/gns-2023-03-09

EDN YUJORQ



**Исследование причин и возможных направлений решения проблемы
дефицита специалистов в энергетической отрасли России с
привлечением HR-брендинга**

В.А. Бондаренко¹ , **Т.С. Попова**²  , **А.А. Попов**³ 

¹Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Ростов-на-Дону, Россия

²Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

³Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

 TSPopova@tpephi.ru

Аннотация. При написании данной статье была поставлена цель идентифицировать проблемы, опосредующие дефицит специалистов в энергетической отрасли в России. Проведен анализ ситуации, связанный с недостаточной популярностью у абитуриентов инженерного образования, что приводит к риску недобора вузами обучающихся в рамках контрольных цифр бюджетного набора, что опосредует сложности по обеспечению количественного параметра необходимых специалистов. Снижение вузами баллов для поступления на технические профили приводит к привлечению абитуриентов, которые не демонстрируют осознанного выбора будущей профессии и, с высокой долей вероятности, могут отказаться работать по специальности, что демонстрируется присутствием в энергетическом секторе всего 23% специалистов в возрасте до 35 лет, что ниже среднего показателя по стране. В результате проведенного исследования определено, что в ходе совместных усилий со стороны государства, университетов и самих энергетических компаний по привлечению молодежи к получению инженерной профессии и работе в энергетическом секторе, наиболее активная роль должна принадлежать работодателям. В данной связи авторами рассматривается целесообразность использования HR-брендинга в формате расширения целевой аудитории потенциальных сотрудников энергетических компаний с внесением в нее дошкольников, школьников и студентов, которым делается материальное и моральное ценностное предложение. Расширение аудитории HR-бренда компании на дошкольников, школьников и студентов, применение для них реальных моральных и материальных мотиваторов будет способствовать росту популярности данного направления подготовки и осознанному выбору профессии, что, в пролонгированной перспективе, позволит решить вопрос дефицита квалифицированных кадров в энергетическом секторе России.

Ключевые слова: дефицит кадров, энергетическая отрасль, кадровое обеспечение, HR-брендинг, инженерное образование.

Для цитирования: Бондаренко В.А., Попова Т.С., Попов А.А. Исследование причин и возможных направлений решения проблемы дефицита специалистов в энергетической отрасли России с привлечением HR-брендинга. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):96–106. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-09>

Study of causes and possible solutions to the problem of specialist shortage in the Russian energy industry with the involvement of HR-branding

Viktoriya A. Bondarenko ¹ , Tatyana S. Popova, ²  , Andrey A. Popov ³ 

¹ Rostov State University of Economics (RINH), Rostov-on-Don, Russia

² Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia

³ Atommash the Branch of AEM-Technologies JSC, Volgodonsk, Rostov Region, Russia
 TSPopova@mephi.ru

Abstract. This paper aims to identify the problems that mediate the shortage of specialists in the energy sector in Russia. The article analyzes the situation related to the insufficient popularity of engineering education among applicants, which leads to the risk of under-enrollment of students by universities within the budget enrollment control figures, which mediates difficulties in providing the quantitative parameter of the required specialists. Reduction of points for admission to technical profiles by universities leads to the attraction of applicants who do not demonstrate a conscious choice of future profession and, with a high probability, may refuse to work in their specialty, which is demonstrated by the presence in the energy sector of only 23% of specialists under 35 years of age, which is below the national average. As a result of the study it was determined that in the course of joint efforts of the state, universities and energy companies themselves to attract young people to engineering profession and work in the energy sector, the most active role should belong to employers. In this regard, the authors consider the expediency of using HR-branding in the format of expanding the target audience of potential employees of energy companies with the inclusion of preschoolers, schoolchildren and students to whom material and moral value proposition is made. Expanding the audience of the HR-brand of the company to preschoolers, schoolchildren and students, applying real moral and material motivators for them will contribute to the growth of popularity of this area of training and conscious choice of profession, which, in the long term, will solve the issue of the shortage of qualified personnel in the energy sector of Russia.

Keywords: staff shortage, energy industry, staffing, HR-branding, engineering education.

For citation: Bondarenko V.A., Popova T.S., Popov A.A. Study of causes and possible solutions to the problem of specialist shortage in the Russian energy industry with the involvement of HR-branding. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):96–106. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-09>

Введение

HR-брендинг представляет собой хорошо зарекомендовавший себя инструмент, который позволяет формировать интерес у потенциальных сотрудников компании, способствует удержанию уже действующих специалистов и повышению их вовлеченности в решение стоящих перед организацией задач [1]. По сути, в условиях беспрепятственной возможности выбора членами социума образовательного трека и карьерной траектории, он представляет собой необходимый механизм для решения вопроса надлежащего кадрового обеспечения.

Вопросы кадрового обеспечения представляются одними из наиболее значимых в возможности эффективного функционирования организации, отрасли и, в итоге, всей социально-экономической системы, поскольку именно обеспеченность кадрами определенной направленности и компетентностной подготовки, обеспечивающей возможности разработки и внедрения новых технологий и решений, может способствовать решению задач наращивания технологического суверенитета [2], бесперебойного функционирования критически значимой инфраструктуры [3], экономической безопасности государства в целом.

Методология

В рамках осуществления национальной технологической инициативы в России активно реализуется подготовка инженерных кадров¹. В том числе с этой целью инициирован проект передовых инженерных школ в университетах России², проходят публичные дискуссии, на которых обсуждается образ «инженера будущего», однако, наряду с этим, выделяется тенденция в виде сохранения тренда на дефицит инженерных кадров (конструкторов, проектировщиков, разработчиков и т.д.)³. Для энергетического комплекса все более актуальным становится налаживание активного диалога с общественностью (в том числе с потенциальными работниками) с целью формирования у них адекватного отношения к отрасли. [4]

Отметим, что несмотря на реализацию национальной технологической инициативы и инновационных подходов в кадровой политике [5], нацеленность на подготовку специалистов для отраслей, задействованных в технологической трансформации экономики России и обеспечении технологического суверенитета, энергетический сектор, согласно экспертным оценкам представителей отрасли, также испытывает трудности в привлечении кадров. В особенности, отмечается запрос на молодых специалистов, которых в настоящее время недостаточно⁴.

Факторы, определяющие такое положение дел, анализируются профильными аналитическими агентствами (Общероссийское отраслевое объединение работодателей электроэнергетики «ЭРА России», Российское энергетическое агентство (РЭА) Минэнерго РФ и Аналитический центр НАФИ)⁵. К таким факторам традиционно относят недостаточный уровень оплаты труда, сложность привлечения и удержания высококвалифицированных сотрудников и обусловленную этим высокую текучесть в коллективе (рис. 1).

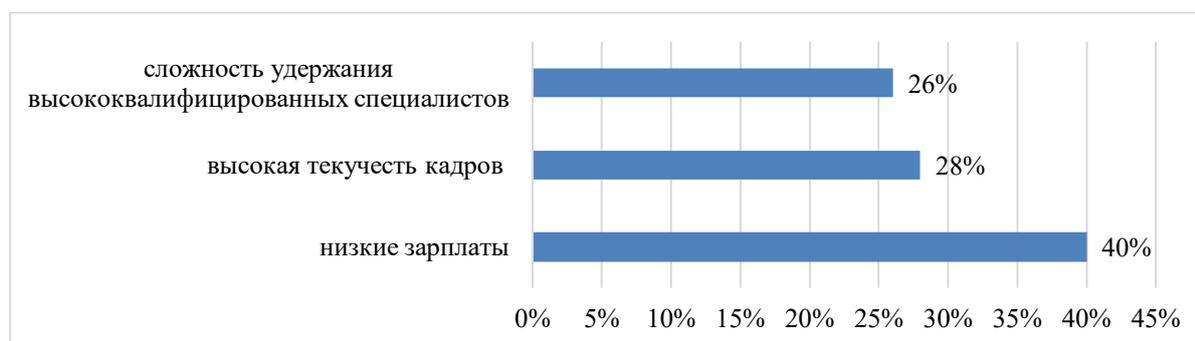


Рисунок 1. Факторы, определяющие сложности кадрового обеспечения в энергетической отрасли России

Figure 1. Factors determining the complexity of staffing in the Russian energy sector

¹ Что такое НТИ и как она помогает появлению инноваций в России [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/615470289a794717d30dc049> (дата обращения: 17.08.2023)

² Проект "Передовые инженерные школы" начинает работу в российских вузах [Электронный ресурс]. URL: https://ria.ru/20220823/inzhenernye_shkoly-1811372961.html?ysclid=lm4wr8lq5a973122777 (дата обращения: 28.08.2023)

³ На «Технопроме-2023» обсудили портрет инженера нового поколения [Электронный ресурс]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/72102/> (дата обращения: 27.08.2023)

⁴ Михайлов А. Электроэнергетическая отрасль столкнулась с дефицитом специалистов [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2022/01/18/reg-szfo/elektroenergeticheskaia-otrasl-stolknulas-s-deficitom-specialistov.html?ysclid=lm4p8qu0cz929494982> (дата обращения: 01.08.2023)

⁵ Ассоциация «Эра России» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.era-rossii.ru/?ysclid=lm68kgznih161339230> (дата обращения: 01.09.2023); Российское энергетическое агентство (РЭА) Минэнерго РФ [Электронный ресурс] <https://rosenergo.gov.ru/?ysclid=lm68ok3jm548742917> (дата обращения: 17.08.2023); Аналитический центр НАФИ [Электронный ресурс]. URL: <https://nafii.ru/?ysclid=lm68qfv0ef604030449> (дата обращения: 17.08.2023)

Сложности связаны с тем, что специалисты, имеющие профильное образование, несколько не удовлетворены имеющимися вакансиями, а квалификационные характеристики выпускников, желающих трудоустроиться в энергетические компании, не устраивают работодателей. Это тренд может быть подтвержден следующими данными, например, по г. Санкт-Петербургу в рамках поиска работы в сфере электроэнергетики в 2021 г. ищущими работу специалистами было размещено более 17 тыс. резюме, тогда от работодателей были размещены незакрытые кандидатурами порядка 300 вакансий. Например, в 2023 г. в Ростове-на-Дону в данной сфере потенциальными кандидатами на трудоустройство размещено в открытом доступе 4222 резюме⁶, тогда у работодателей размещены незакрытые кандидатурами 219 вакансий⁷.

Отмеченные обстоятельства ставят вопрос о целесообразности анализа проявившихся проблем в сфере кадрового обеспечения энергетических компаний, что предполагает исследование ситуации на рынке труда и качестве его (рынка труда) взаимосвязи с вузами, задействованными в подготовке соответствующих специалистов, а также обуславливают интерес к HR-брендингу со стороны предприятий для привлечения необходимых кадров.

Кадровый вопрос, обеспеченность персоналом предприятий в энергетической сфере, целесообразно рассматривать и в непосредственной связи с общей демографической ситуацией. Так, согласно экспертным оценкам представителей института демографии НИУ ВШЭ тренд на сокращение трудоспособного населения в России, в целом, продолжится до 2035 года.⁸ В указанный временной интервал станет заметным снижение доли сотрудников в возрасте до 40 лет, долевое присутствие которых станет в общей численности менее 37%, что еще больше усугубит дефицит на рабочую силу в экономике, поднимет конкуренцию среди работодателей за человеческий капитал.

Указанная тенденция, в целом, справедлива и для топливно-энергетического сектора, в котором в настоящее время задействовано порядка 2,6 млн. чел., а средний возраст персонала составляет 42 года. Из приведенной общей численности 134 тыс. чел. задействованы в угольной промышленности, 1382 тыс. чел., непосредственно, работают в энергетике, а 1117 тыс. чел. – в нефтегазовой сфере. [6] Доля молодых специалистов варьируется следующим образом (рис. 2).

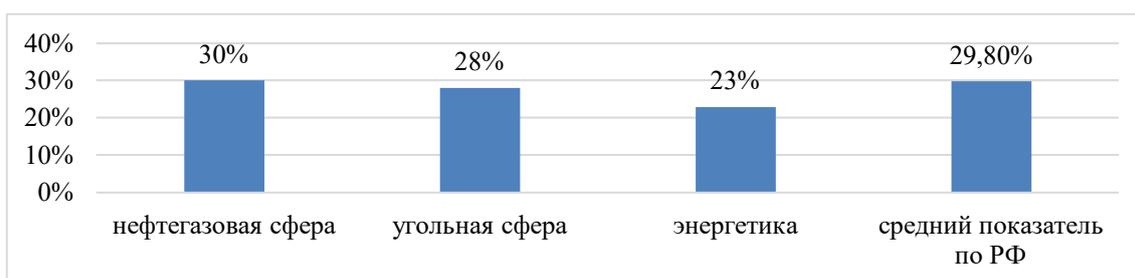


Рисунок 2. Доля молодых специалистов в возрасте до 35 лет в отраслях ТЭК и, в целом, по РФ в 2022 г., %

Figure 2. Share of young specialists under 35 years of age in the fuel and energy sector and, in general, in the Russian Federation in 2022, %

⁶ Промышленность. Резюме «Энергетик» [Электронный ресурс]. URL: <https://rnd.superjob.ru/resume/energetik.html?ysclid=lm696pg6m8629251117> (дата обращения: 28.08.2023)

⁷ Работа энергетиком - вакансии в Ростове-на-Дону [Электронный ресурс]. URL: <https://rostov-nadonu.gorodrabot.ru/%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA> (дата обращения: 30.08.2023)

⁸ Трудоспособного населения в России все меньше. ВШЭ привела 3 сценария ближайшего будущего [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dk.ru/news/237168246?ysclid=lm4x7ugt9p234095168> (дата обращения: 30.08.2023)

Как видим, согласно приведенным данным, ситуация с привлечением и удержанием молодых специалистов в угольной сфере и энергетике ниже, чем усреднено по стране по всем отраслям. Данное обстоятельство представляется достаточно тревожным сигналом, особенно для ряда регионов страны, которые традиционно являются местом сосредоточения специалистов ТЭК, поскольку в них дефицит кадров и нехватка молодежи наиболее ощутимы (рис. 3).

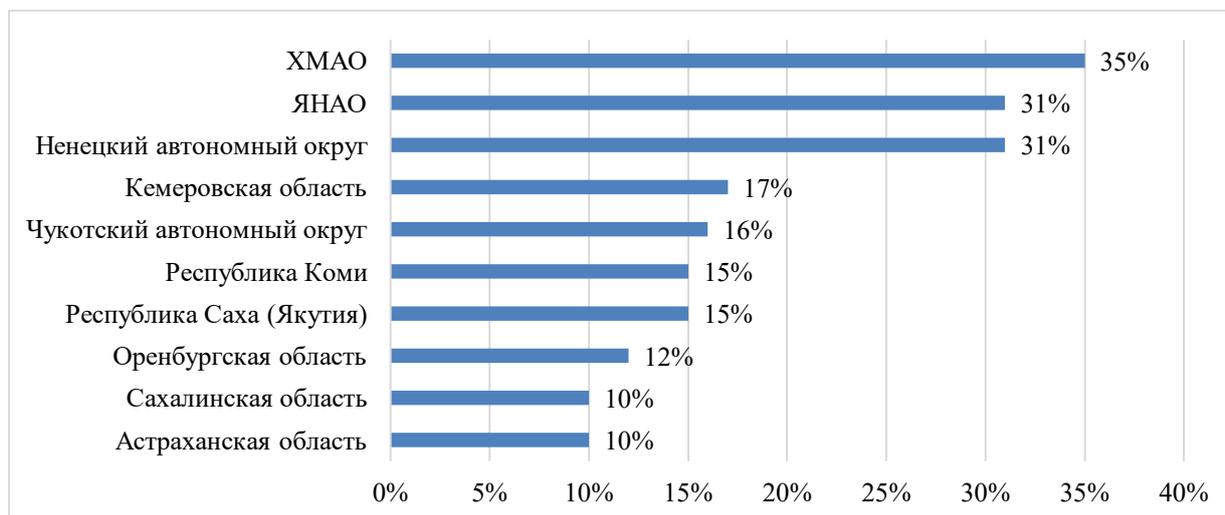


Рисунок 3. Регионы России, лидирующие по долевого распределению сотрудников, занятых в ТЭК в 2022 г., %

Figure 3. Russia's regions leading in terms of the share of employees employed in the fuel and energy sector in 2022, %

Согласно представленным данным получается, что сложная ситуация в анализируемой сфере может проявиться наиболее очевидно во всех приведенных выше регионах, особенно в Ненецком АО, ЯНАО и ХМАО. Поскольку согласно мнению экспертов одним из факторов малой привлекательности для специалистов работы в ТЭК является уровень заработной платы, целесообразно рассмотреть уровень оплаты труда в ряде регионов с большой концентрацией вакансий в ТЭК усредненно, а также в нефтегазовой отрасли и электроэнергетике отдельно (рис. 4).



Рисунок 4. Дифференциация средней начисленной заработной платы в ТЭК в ряде регионов России, тыс. руб.

Figure 4. Differentiation of average accrued wages in fuel and energy complex in some regions of Russia, thousand rubles

Как видим, средняя заработная плата в указанных регионах существенно различается, что особенно заметно на примере средней начисленной заработной платы в электроэнергетике. Во многом такая ситуация опосредована необходимостью привлечения специалистов в регионы Крайнего Севера, мало комфортные для проживания, что предполагает использование инструментов для активизации внутренней трудовой миграции. В данном аспекте работодатели вовлечены в привлечение сотрудников для работы в данных районах страны, поддержке их в период релокации. Однако, представители профильного Министерства полагают, что оценить и положительно трактовать результаты государственной поддержки в данном вопросе достаточно сложно. [6]

Указанные данные, на наш взгляд, свидетельствуют, в том числе, об отсутствии должного внимания в энергетических компаниях к инструментам HR-брендинга. Согласно приведенным ранее данным, в настоящее время работа в энергетических компаниях не рассматривается потенциальными сотрудниками, выпускниками вузов, а также желающими получить высшее образование гражданами, как достаточно привлекательная. В данном аспекте значимой представляется грамотная работа с ценностным предложением работодателя, а именно определение комплекса получаемых сотрудником выгод от работы на определенном предприятии. Среди таких выгод можно отметить уровень оплаты труда, возможности развития специалиста, возможности использования объектов материальной инфраструктуры компании, комфортная рабочая атмосфера, существующая система адаптации новых сотрудников, прозрачные условия карьерного роста, премирования; социальные гарантии работнику и членам его семьи; содействие в приобретении жилья (льготы по ипотеке, субсидия и т.д.), поощрение развития сотрудника, как личности и профессионала и т.д.

Используемым сегодня инструментом для привлечения работодателями сотрудников является взаимодействие с системой образования и подготовка востребованных кадров с надлежащим уровнем квалификации. Эксперты Минтруда отмечают, что среди обучающихся в рамках федерального проекта «Содействие занятости» в формате национального проекта «Демография» среди обучившихся за счет бюджетных средств из 64 тыс. чел. только 1,5 тыс. (порядка 2% от общей численности) обучились по программам подготовки для работы в сфере энергетики, а трудоустроились порядка 1 тыс. чел. [6].

Отмеченные результаты говорят о необходимости большей профессиональной ориентации в общении с потенциальными желающими пройти обучение, а также в формировании регионального заказа на требующихся специалистов и упрочнение взаимосвязи компаний – заказчиков с вузами, осуществляющими образовательную деятельность по интересующему нас спектру образовательных программ для перспективного трудоустройства в ТЭК.

Популярность инженерных профессий среди молодежи в настоящее время остается недостаточно высокой, что демонстрируют результаты баллов ЕГЭ, необходимые для получения инженерных профессий в сравнении со средними баллами ЕГЭ по стране (рис. 5). Согласно приведенным данным, можно отметить, что наиболее низкие баллы идентифицируются на подготовке по направлению электро и теплоэнергетики. Однако следует детализировать, что большинство вузов в регионах получают большее количество бюджетных мест на инженерные направления, чем на гуманитарный блок. Для заполнения выделяемых бюджетных мест вузы устанавливают недостаточно высокие пороговые значения баллов ЕГЭ. Это приводит к тому, что абитуриенты могут выбирать такие направления подготовки из-за возможности бесплатного обучения, к чему их, зачастую, склоняют родители, получения отсрочки от воинской службы и т.д.

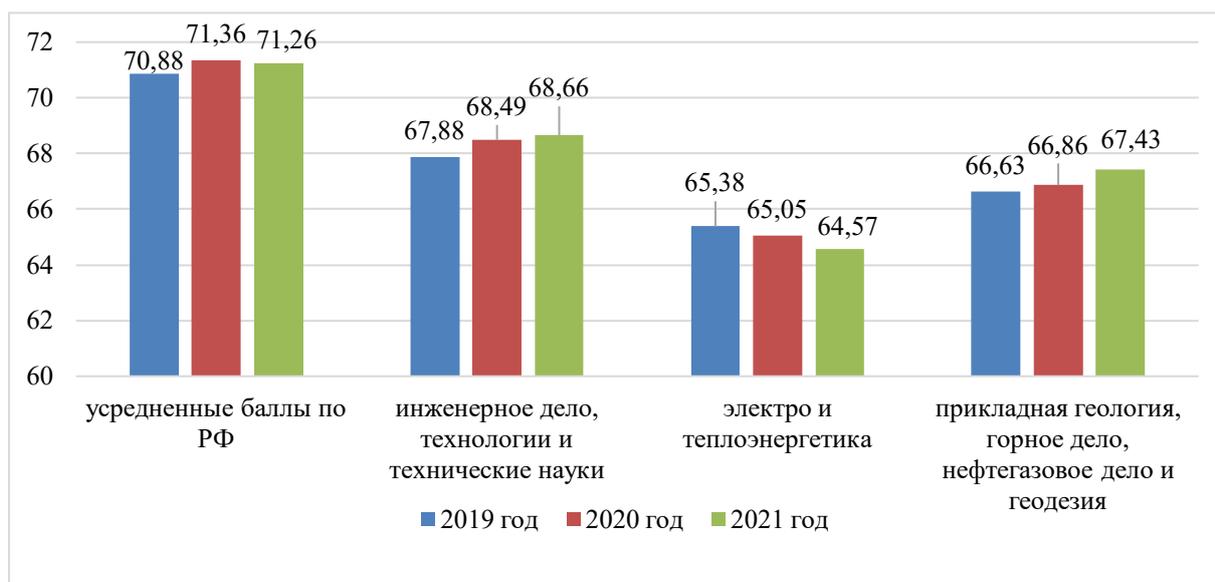


Рисунок 5. Динамика баллов ЕГЭ в России для поступления на специальности, востребованные в ТЭК, в 2019-2021 гг.

Figure 5. Dynamics of USE scores in Russia for entering the specialties demanded by the fuel and energy complex in 2019-2021

Проблема заключается в том, что определенный процент обучающихся не имеет мотивации к осознанному получению инженерного образования и далее не трудоустраивается по специальности. Это усугубляет ситуацию с дефицитом кадров, в том числе, в сфере ТЭК. Механизмом, призванным решать данную проблему, может служить целевая подготовка кадров, в рамках которой выпускники в течение 3-х лет обязаны отработать на определенном предприятии, что дает основания для ожиданий вовлечения и закрепления данных выпускников в приобретенной профессии.

По словам бывшего главы Минобрнауки (с 2012 по 2016 гг.) Дмитрия Ливанова за последние 30 лет время, запланированное на изучение физики в школе, сократилось на 30%. А за последние четыре года число физматклассов сократилось более чем вдвое – с 7 тыс. до 3 тыс. В 2022/2023 учебном году на инженерные направления в вузах было выделено 251 тыс. бюджетных мест, однако для поступления необходимо было сдавать профильную математику. Сдавших в 2022 г. профильную математику на балл, дающий возможность поступления в вуз, было порядка 240 тыс.чел., кроме того, часть из них пошла на другие направления подготовки, связанные, например, с экономикой⁹. Недостаточное количество выпускников сдает в рамках ЕГЭ физику и химию, что ограничивает целевую аудиторию, поступающую на инженерные направления, включая энергетический сектор. Согласно исследовательским данным, приведенным главой Минобрнауки России за последние 6 лет количество выпускников, выбравших дисциплины, позволяющие обучаться на инженерных специальностях, существенно сократилось (рис. 6).

⁹ Зверев А. За инженера замуж не пойду [Электронный ресурс]. URL: https://www.trud.ru/article/21-07-2023/1522771_zh_inzhenera_zamuzh_ne_pojdu.html (дата обращения: 17.08.2023)

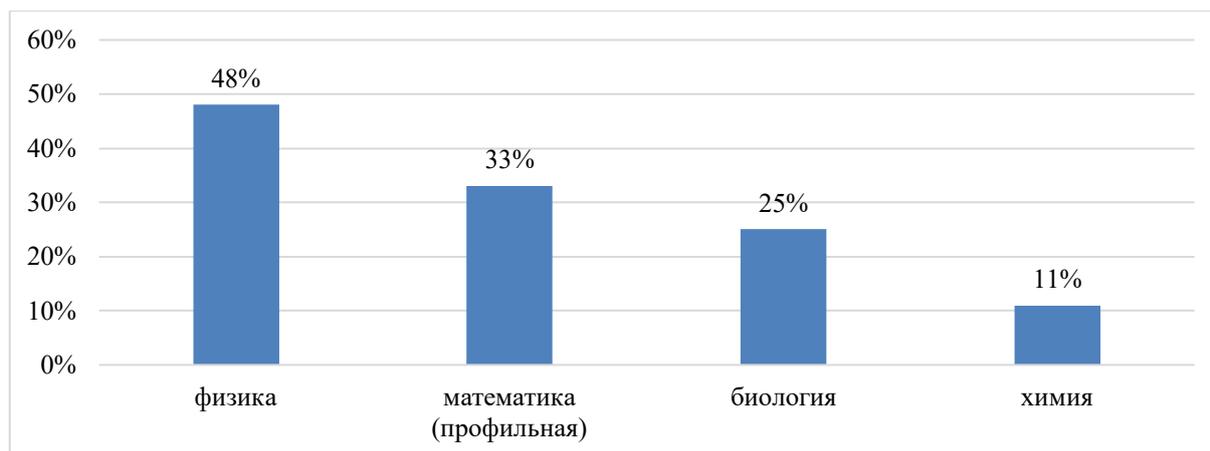


Рисунок 6. Сокращение за последние 6 лет количества выпускников школ, сдающих ЕГЭ по указанным дисциплинам, %

Figure 6. Decrease in the number of school leavers taking USE in the specified disciplines over the last 6 years, %

Такая ситуация создает существенный риск ненаполнения выделяемых вузам бюджетных мест для подготовки кадров по инженерным специальностям, в целом, и энергетике, в частности. Однако для нужд национальной экономики и работы критически значимых отраслей в этом году на инженерные направления выделено в совокупности более 251 тыс. бюджетных мест, из которых 20 тыс. относятся к электро- и теплоэнергетике¹⁰.

Результаты и их обсуждение

Сложившаяся ситуация определяет необходимость обеспечения более тесной связи университетов, готовящих специалистов инженерного профиля, с работодателями, представителями рынка труда, а также усиление инициатив в части кружкового движения и вовлечения школьников и дошкольников в получение необходимых знаний, интерес к получению профессии технического профиля [7]. Это, в свою очередь, предполагает пролонгацию тренда на популяризацию инженерного образования в обществе, в целом, а также активизацию кружкового движения в университетах среди студентов (в лабораториях, кванториумах, кружках робототехники, креативных пространствах университетских точек кипения и т.д.), а также для дошкольников и школьников (инженерные школы). [8]

В настоящее время количество вузов, осуществляющих подготовку специалистов для энергетической, угольной отрасли и нефтегазового комплекса, в совокупности составляет порядка 260. Ряд университетов вовлечены в участие в программе стратегического академического лидерства «Приоритет–2030». Данные учреждения высшего образования вовлечены в создание инжиниринговых центров, инженерных школ, научно-образовательных центров, проводят интенсивы и инициируют научно-исследовательские и прикладные проекты для молодежи и обучающихся. Однако в целом по стране вузы находятся в разных условиях в части ресурсного обеспечения и привлекательности для молодежи самих университетов (локализованных в разных регионах), что создает определенные сложности при недостаточной популярности карьеры инженера, как желательного трека построения будущего для выпускников школ.

¹⁰ Представители промышленности обсудили повышение качества подготовки инженерных кадров [Электронный ресурс]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/70586/> (дата обращения: 01.08.2023)

Мы полагаем, что со стороны управленцев страны и представителей профильного Министерства уже прилагается множество усилий, связанных с привлечением выпускников школ на технические специальности. Сами вузы заинтересованы в наборе обучающихся на выделяемые бюджетные места. В анонсируемой для исправления сложившейся ситуации связке «представители власти – вузы – работодатели (индустриальные партнеры в регионах)» для большей популяризации инженерных профессий, роста качества образования за счет усиления взаимодействия с профильными университетами необходимо более активное участие самих работодателей, напрямую заинтересованных в закрытии кадрами необходимой квалификации существующих вакансий и привлечении на работу молодежи.

Это, на наш взгляд, делает актуальным именно вопрос HR-брендинга, который должен широко трактоваться работодателями, представителями индустриальных партнеров вузов в регионах, поскольку расширенное его применение в формате усиления взаимодействия с университетами, а также расширение целевой аудитории с преимущественно студенческой на школьную и даже дошкольную, будет приводить к реальной популяризации инженерных специальностей, в том числе в энергетическом секторе. Это, в конечном итоге, приведет к росту числа выпускников школ, идентифицирующих себя в качестве будущих инженеров и сдающих соответствующие дисциплины по выбору в рамках ЕГЭ. Осознанный выбор траектории обучения будет способствовать привлечению и удержанию специалистов в отрасли. Важно, что аудиторией, которой транслируются ценностные ориентиры HR-бренда (в нашем случае, энергетической компании), будут не только уже наличествующие на рынке специалисты, но и дошкольники, школьники и студенты.

В таком контексте перспективным направлением, позволяющим, например, контролировать необходимое качество обучения студентов и их привлечение на практику и трудоустройство в определенную энергетическую компанию, можно считать опыт формирования в вузах базовых кафедр от ведущих предприятий в регионе. На них могут реализовываться обновленные с точки зрения высокого прикладного эффекта образовательные программы, учитывающие потребности конкретного индустриального партнера и его кадрового запроса. Целесообразными представляются специализированные акселерационные программы и выделение грантов от конкретных энергетических предприятий в регионе на дополнительное профессиональное обучение, в котором они заинтересованы, и проведение научно-исследовательских работ обучающимся с внедрением результатов в работу конкретных компаний. Возможно также выделение специализированных стипендий от энергетических предприятий студентам – технологическим лидерам, например, лучше всех осваивающим профильные программы подготовки и реализующим технологические проекты, стартапы, инициированные индустриальными партнерами.

В части привлечения школьников (возможно, дошкольников) в технологическую повестку в рамках направленных усилий по формированию и развитию собственного HR-бренда со стороны определенных энергетических компаний в регионе будет также целесообразным проведение (на безвозмездной основе или с условием символической оплаты) занятий в кружках робототехники, кванториумах, технологических лекториумах и т.д. в формате, адаптированном под данную аудиторию слушателей. Среди тьютеров и спикеров подобных, проводимых на регулярной основе мероприятий, должны быть как представители профильных университетов – лидеров подготовки инженерных кадров, так и самих энергетических компаний. Для указанной целевой аудитории также оправданным представляется выделение стипендий, мини-грантов на исследования среди юных ученых, а также вовлечение их в пролонгированный процесс профильного обучения.

Заключение

В настоящее время проявляется дефицит квалифицированных сотрудников в энергетической отрасли России. Аналогичные сложности характерны и для привлечения специалистов инженерного профиля в целом. Несмотря на реализуемую Национальную технологическую инициативу, проведение мероприятий по популяризации инженерного образования в России и выделение бюджетных мест вузам на подготовку инженерных кадров, в общем, и в энергетическом секторе, в частности, данные сложности не нивелированы в полном объеме.

Среди проявившихся факторов, инициирующих такую ситуацию, специалисты указывают уровень оплаты труда в отрасли, а также недостаточную популярность профессии «инженер» в широкой трактовке данного направления. В данном вопросе актуальным представляется использование потенциала HR-брендинга, как инструмента, позволяющего формировать интерес у потенциальных сотрудников в компании, способствующего удержанию уже действующих специалистов и повышению их вовлеченности в решение стоящих перед организацией задач.

Считаем, что в комплексе предпринимаемых со стороны государства, университетов и самих предприятий усилий, более активную позицию должны занимать именно предприятия, энергетические компании, заинтересованные в привлечении компетентных сотрудников. Расширение ими аудитории, которой транслируются ценности HR-бренда компании, на дошкольников, школьников и студентов, применение для них реальных моральных и материальных мотиваторов будет способствовать росту популярности данного направления подготовки и осознанному выбору профессии, места работы, что, в пролонгированной перспективе, позволит решить вопрос дефицита квалифицированных кадров в энергетическом секторе России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бондаренко В.А., Максаев А.А., Шумакова И.А. Инновационный подход к управлению деятельностью вуза на основе применения HR-брендинга. *Экономика. Информатика*. 2020;47(1):47–54. <https://doi.org/10.18413/2687-0932-2020-47-1-47-54>
2. Жданев О.В. Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации. *Записки Горного института*. 2022;258:1061–1078. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.107>
3. Бондаренко В.А. Эффективность маркетинг-менеджмента национальной экономики на основе согласованного развития и функционирования институтов инфраструктуры : Монография; науч. ред. В.П. Федько. Москва: Наука-Пресс, 2006. 211 с.
4. Степченко Т.С. Аспекты восприятия общественностью процессов развития атомной энергетики (на примере «РоАЭС»). *Практический маркетинг*. 2014;7(209):35–40. https://elibrary.ru/download/elibrary_21703131_40768258.pdf (дата обращения: 24.05.2023)
5. Лобковская Н.И. Инновационные подходы в кадровой политике атомной отрасли: банк данных молодых специалистов вузовского центра карьеры. *Глобальная ядерная безопасность*. 2012;1(2):137–140. URL: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_12.pdf (дата обращения: 24.05.2023)
6. Бондаренко А.В. Проблемы кадрового обеспечения отраслей ТЭК. *Энергетическая политика*. 2022;11(177):6–15. <https://energypolicy.ru/problemy-kadrovogo-obespecheniya-otraslej-tek/neft/2022/15/14/> (дата обращения: 24.05.2023)
7. Руденко В.А., Василенко Н.П., Ермолаева Н.В., Лобковская Н.И. Формирование универсальных компетенций на этапе ранней профессиональной ориентации в области атомной энергетики. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;4(33):110–123. URL: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/4_3_1.pdf (дата обращения: 27.05.2023)
8. Лобковская Н.И., Томилин С.А., Железнякова А.В. Эффективные практики профориентационного сотрудничества заинтересованных сторон инженерного образования. *Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании : Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Том II. Балаково, 2023*. Москва: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 226–231. URL: <https://biti.mephi.ru/wp-content/uploads/2023/07/%D0%A2%D0%BE%D0%BC-II-3.pdf> (дата обращения: 27.05.2023)

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бондаренко В.А. – идентификация проблем, опосредующих дефицит специалистов в энергетической отрасли в России; проведение анализа данных, представленных Общероссийским отраслевым объединением работодателей электроэнергетики «ЭРА России», Российским энергетическим агентством (РЭА) Минэнерго РФ и Аналитическим центром НАФИ по тематике исследования;

Попова Т.С. – концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по теме;

Попов А.А. – изучение, обработка и систематизация публикаций по изучаемой проблеме.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виктория Андреевна Бондаренко, д.э.н., доктор экономических наук, доцент, зав. кафедрой маркетинга и рекламы. ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2921-7548>

e-mail: b14v@yandex.ru

Татьяна Сергеевна Попова, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

Попов Андрей Александрович, ведущий специалист по инвестиционному развитию Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Bondarenko V.A. – identification of problems mediating the shortage of specialists in the energy sector in Russia; analysis of data provided by the All-Russian Trade Association of Employers in the Electric Power Industry «ERA Russia», the Russian Energy Agency (REA) of the Ministry of Energy of the Russian Federation and the NAFI Analytical Center on the subject matter of the study;

Popova T.S. – conceptualization of the article, provision of author's research materials on the problem under study;

Popov A.A. – study, processing and systematisation of publications on the problem.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Viktoria A. Bondarenko, Doctor of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Marketing and Advertising. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Rostov State University of Economics (RINH)», Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2921-7548>

e-mail: b14v@yandex.ru

Tatyana S. Popova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPHI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Andrey A. Popov, leading specialist in investment development of Atom mash the branch of JSC AEM-Technologies in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

Поступила в редакцию 19.06.2023

После доработки 30.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Received 19.06.2023

Revision 30.08.2023

Accepted 05.09.2023

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**AUTHOR INDEX**

Абидова Е.А.	72	Abidova E.A.	72
Акобян М.Т.	5	Barashkov I.S.	37
Барашков И.С.	37	Bondarenko V.A.	96
Бондаренко В.А.	96	Golubev E.I.	62
Голубев Е.И.	62	Hakobyan M.T.	5
Исмаил Р.М.	51	Ismail R.M.	51
Калмыков С.Н.	62	Kalmykov S.N.	62
Карчин В.В.	17	Karchin V.V.	17
Ксенофонтов А.И.	5	Khvostova M.S.	51
Курина А.И.	62	Ksenofontov A.I.	5
Лачин В.И.	26	Kurina A.I.	62
Макартичан С.В.	37	Lachin V.I.	26
Маслаков Д.С.	82	Makartichyan S.V.	37
Мельдин Е.В.	17	Maslakov D.S.	82
Муженко А.С.	26	Meldin I.V.	17
Овчеренко А.А.	82	Muzhenko A.S.	26
Питев А.Н.	17	Ovcherenko A.A.	82
Плотников Д.А.	26	Pitev A.N.	17
Полозков С.Д.	62	Plotnikov D.A.	26
Попов А.А.	96	Polozkov S.D.	62
Попова Т.С.	96	Popov A.A.	96
Правосуд С.С.	82	Popova T.S.	96
Проскуряков К.Н.	51	Pravosud S.S.	82
Саргсян С.А.	5	Proskuryakov K.N.	51
Хвостова М.С.	51	Sargsyan S.A.	5
Шилин А.Н.	37	Shilin A.N.	37
Яковлев К.А.	51	Yakovlev K.A.	51
Якубов Я.О.	82	Yakubov Ya.O.	82

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(!) Обращаем внимание авторов: с 31 мая 2023 г. обновлены требования к оформлению статей с целью расширения международной аудитории журнала.

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация для каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (<http://orcid.org>), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаются в тексте статьи непосредственно перед самими формулами.

Включение таблиц в статью должно быть целесообразным, сопровождаться нумерацией, заголовками на русском и английском языках (10 пт) и ссылками в тексте непосредственно перед самими таблицами.

Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами.

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2 см. Желательный объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (количество источников определяется автором исходя из поставленной научно-исследовательской цели). Если в тексте менее 2500 знаков, статья может быть отклонена экспертами.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт России, стран СНГ и дальнего зарубежья по рассматриваемой проблематике. Объединенный список литературы / References приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте и оформляется в стиле Vancouver, но без сокращения названий журналов. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала.

Не включаются в список литературы источники, которые никогда не будут проиндексированы в базах данных цитирования: ГОСТы, нормативные и законодательные акты, внутренние документы предприятий (доклады, отчеты, протоколы и т.д.), официальные сайты организаций, словари, справочники, учебники и т.д. Такие источники цитируются непосредственно в тексте или в постраничных сносках согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=173511> с указанием выходных данных и URL, по которым их можно найти в Интернете. Доклады конференций могут быть включены в список литературы, если они доступны в Интернете, при этом указывается URL и дата обращения.

Для соблюдения правил слепого рецензирования необходимо создать копию файла со статьей, удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах (в тексте статьи удалить имена авторов и наименования их мест работы, ссылки на работы авторов в списке литературы заменить на «Автор, год», информацию об авторах следует удалить из свойств документа), сохранить в формате pdf с названием «На рецензирование_Название/начало названия статьи...».

Для принятия статьи в номер журнала необходимо загрузить файл со статьей в формате Word на платформе elpub – <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> – и предоставить следующие материалы по электронной почте oni-viti@mephi.ru:

- согласие на обработку персональных данных;

- файл со статьей в формате Word;
- итоговый (после доработки) файл в формате pdf с подписью авторов;
- файл со статьей в формате pdf для слепого рецензирования;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Киркин А.М., Курьиндин А.В., Синегрибов С.В. и др. Проблема моделирования геометрии крестообразных витых твэлов при проведении теплогидравлических расчетов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(1):23–35. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>
2. Kulamer B., Meester W., Salk Ju., Recommended Practices to Ensure Technical Conference Content Quality. *Science Editor and Publisher*. 2017;2(1):47–51. <https://doi.org/10.24069/2542-0267-2017-1-1-12>
3. Stevens M.R., Park K., Tian G. et al. Why Do Some Articles in Planning Journals Get Cited More than Others? *Journal of Planning Education and Research*. 2022;42(3):442–463. <https://doi.org/10.1177/0739456X19827083>
4. Small H., Boyack K. W., Klavans R. Citations and certainty: a new interpretation of citation counts. *Scientometrics*. 2019;118(2):1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03016-z>
5. Barie E. Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
6. Рашитов П.А., Серегин Д.А., Аникин М.Д., Вершанский Е.А. Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации. *Вестник МЭИ*. 2021;3:58–66. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Патент № 2675380 С1 Российская Федерация, МПК G21C 7/00. Способ маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. Заявка №2018117898 от 15.05.2018; опублик. 19.12.2018. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/ (дата обращения: 26.03.2023).
8. Алвахеба А. И., Сурин В.И., Бекетов В.Г., Иванов О.В., Иванова Т.Е. Сравнительный анализ результатов радиографического и электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений модельных образцов. В кн.: *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2018): Труды XVIII Международной молодежной конференции*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2018. С. 179–180. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979736_11029641.pdf (дата обращения: 06.03.2023). EDN: YXJYAH
9. Vrbanic I., Samanta P., Basic I. Risk importance measures in the design and operation of nuclear power plants. ASME Press; 2017. 141 p. <https://doi.org/10.1115/1.861394>
10. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061>

Адрес редакции журнала:

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94

Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», oni-viti@mephi.ru

Выпускающий редактор: Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru

NOTES FOR AUTHORS

(!) Please, pay attention: the article formatting requirements have been updated in order to expand the international readership of the journal since May, 31st 2023.

The full text of the article to be published must be original – no more than 20% borrowings, it must be accompanied by an expert resolution on publication possibility in the open press, and it must comply with the following rules.

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- authors' initials and surnames in Russian and English;
- an affiliation in Russian and English for each author;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English according to IMRAD;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- article text;
- Combined List of References / References (see example design);
- information about the authors in Russian and English (each author should provide a full name, a place of work, position/s, an academic degree, a rank, e-mail address, ORCID index (<http://orcid.org>), contact phone number).

The article should be structured: introduction (relevance of the topic; review of the problem; purpose of the work); methodology (issue theory; detailed description of experiment methodology; description of materials and methods of analysis; statistical processing); results and their discussion; conclusions. The objective and key results of the work should be clearly presented in the abstract and the text of the article, the scientific novelty of the work is justified in the introduction with reference to the sources published in scientific peer-reviewed publications (including foreign ones) in the last few years. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The Equation 3.0 editor is recommended when writing formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article just ahead of the formulas.

Inclusion of tables in the article should be appropriate, they should be numbered and have headings in Russian and English (10 pf) and links in the text just ahead of the tables.

Figures should be clear when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions.

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Without any signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article is no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (the number of sources is determined by the author on the basis of the research objective). If the text of the article is less than 2500 type characters, the article may be rejected by experts.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of Russia, the CIS and foreign countries on the subject matter in the articles. The combined List of References is given at the end of the article in the order of mention in the text, in Vancouver style, but without abbreviating the names of the journals. References to foreign sources should be given in their original language.

Sources that will never be indexed in citation databases are not included in the reference list: State Standards, normative and legislative acts, internal documents of companies (reports, protocols, etc.), official websites of organisations, dictionaries, reference books, textbooks, etc. Such sources are cited directly in the text or in page footnotes according to State Standard R 7.0.5-2008 (<https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=173511>) with indication of output data and URL where they can be found on the Internet. Conference papers may be included in the list of references if they are available on the Internet, indicating the URL and the date of reference.

To comply with the rules of blind peer review, a copy of the file with the article should be created, personal data contained in the text of the file and its properties should be deleted (authors' names and the names of their places of work in the text of the article should be deleted, references to authors' works in the list of references should be replaced by "Author, year", information about authors should be removed from the document properties), saved in pdf format with the title "To review_Title/start title of article...".

To be accepted into the journal issue, the article must be uploaded as a Word file on the elpub platform – <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> - and the following materials must be sent by email oni-viti@mephi.ru:

- consent to personal data processing;
- an article file in Word format;
- final (after revision) pdf file signed by the authors;
- a pdf file of the article for blind peer review;
- an expert analysis of publication possibility in the open press.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD

1. Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Sinegribov S.V. [et al.] The problem of modeling the geometry of Twisted Fuel Rods with X-type cross section in the performance of thermohydraulic calculations. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(1):23–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>
2. Kulamer B., Meester W., Salk Ju., Recommended Practices to Ensure Technical Conference Content Quality. *Science Editor and Publisher*. 2017;2(1):47–51. <https://doi.org/10.24069/2542-0267-2017-1-1-12>
3. Stevens M.R., Park K., Tian G. et al. Why Do Some Articles in Planning Journals Get Cited More than Others? *Journal of Planning Education and Research*. 2022;42(3):442–463. <https://doi.org/10.1177/0739456X19827083>
4. Small H., Boyack K. W., Klavans R. Citations and certainty: a new interpretation of citation counts. *Scientometrics*. 2019;118(2):1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03016-z>
5. Barie E. Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
6. Rashitov P.A., Seregin D.A., Anikin M.D., Vershanskiy E.A. Application of multilevel voltage inverters in distributed series compensation devices. *Bulletin MPEI*. 2021;3:58–66 (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061>
8. Erd A., Stokłosa J. Main design guidelines for battery management systems for traction purposes. *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference Automotive Safety*. 2018. Slovakia. <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345>
9. Chernov E.V. Development and application of WWER1000 PC based simulators for education and training in NRNU MEPhI. *Developing a systematic education and training approach using personal computer based simulators for nuclear power programmes proceedings of a technical meeting*. Vienna. 15–19 May. 2017:96–98. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1836web.pdf>. (accessed: 10.05.2023).
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg; 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4> (accessed: 19.05.2023).

Editorial office address (for sending printed correspondence):

347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94

Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal, oni-viti@mephi.ru

Executive Editor: Nadezhda I. Lobkovskaya, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru
