ISSN 2413-5526

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 6 № 4

Севастополь
2020

Э 651 ISSN 2413-5526
УДК 621.311

Э 651 **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2020. – Т. 6. - № 4. – 164 с.: ил.**

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

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

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

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

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

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки **7**

Бахтина Н.В., Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Сукрушев А.В. Оценка безопасности ЯЭУ с ВВЭР-1000 при снижении температуры питательной воды парогенераторов 7

Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Анализ методов смягчения последствий запроектной аварии на ЯЭУ с ВВЭР, обусловленной течью из первого контура во второй с последующим отказом паросбросного устройства аварийного парогенератора 12

Зацаринная Т.Г., Аникевич К.П., Хегай В.А. Структурная модель САР уровня в конденсаторе турбины 17

Качур С.А., Давиденко Е.Н. Идентификация нарушения целостности контура циркуляции теплоносителя в ВВЭР на основе статистических методов 26

Рипп А.Г., Матузаева О.В., Мирошниченко Е.В., Довгаленко В.В., Чернявская С.А. Особенности организации дисциплины «Физический практикум» для студентов направления «Атомные станции» 33

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **38**

Авакян М.К., Перышкин М.Д, Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Соломоненко А.В. Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам 38

Баравлёва А.Е., Толстихина Л.В, Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Соломенникова С.И Применение ГИС-технологий для увеличения эффективности использования гидроэнергетических установок малой мощности 42

Дьяченко И.С., Перышкин М.Д., *Новак Е.В., Ленивенко Б.О., Львов Т.А.* Регулирующий эффект нагрузки по частоте. Влияние на структуру автоматической частотной разгрузки 47

Лосева И.Г., Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Небесный В.В. Оценка динамики снижения мощности источников нетрадиционной и возобновляемой электроэнергии (СЭС, ВЭС, далее – ВИЭ). Использование величины снижения мощности ВИЭ в качестве нормативного возмущения 51

Перышкина Л.В., Перышкин М.Д., Самчук А.С, Безруков Ю.В., Балабай В.Н. Использование показателей структурной и функциональной надежности при определении решений по перспективному развитию 57

Семенюк Н.В. Влияние неоднородности электрической сети на оптимальность па-раметров электроэнергетического режима 61

Симонов И.В., Кувшинов В.В., Портнова Е.Р., Куренкова А.В., Кулемина А.П. Комбинированная биогазовая станция 67

Ситников С.А., Симонов И.В., Безруков Ю.В., Балабай В.Н., Львов Т.А. Особенности опробования напряжением воздушной линии с шунтирующими реакторами 71

Шагимарданов П.Д., Звада П.А., Таран И.О., Какушина Е.Г., Портнова Е.Р. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу РЗА 76

Электротехнические комплексы и системы **81**

Балла А.Г., Скопинский В.С., Симонов И.В., Новак Е.В., Ленивенко Б.О. Функционирование релейной защиты энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь, анализ неправильной работы и методы ее устранения 81

Гусева Е.В., Цалоев В.М. Повышение достоверности результатов измерений отклонения напряжения в системе электроснабжения 86

Кочетов И.А., Шайтор Н.М., Рясков Ю.И. Новые технологии изготовления индукторных машин повышенной частоты 92

Титаренко О.Н., Шестернева А.М., Малюк Е.Г. Повышение эффективности защиты от дуговых замыканий в распределительных устройствах с помощью применения оптических датчиков 97

Шестернева А.М., Титаренко О.Н., Малюк Е.Г. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях с применением интеллектуальных сетей Smart Grid 103

Химические технологии **112**

Акимов А.М., Котельникова С.А., Федорова С.А., Магдыч Е.А. Теоретические основы мембранного разделения газовых смесей 112

Стрекалов С.Д., Фролова М.А. Полюсная модель распада калия-40, содержащегося в строительном материале и экологические последствия процесса 117

Федорова С.А., Магдыч Е.А., Акимов А.М., Кравчук А.А. Очистка сточных вод от ионов никеля (II) термически модифицированными природными сорбентами 124

Черкашина Н.И., Магдыч Е.А. Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении никеля в одиночных и двоичных системах 131

Экологическая безопасность **137**

Бабинецкая А.С., Дербасова Н.М. Обоснование выбора концептуальной модели водосбора для прогнозирования водообеспеченности Симферопольского водохранилища 137

Заблоцкая Е.В., Горблянская А.С., Тищенко Т.Н. Инвентаризация выбросов вредных веществ в атмосферный воздух для объекта «Строительство и реконструкция автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап» 143

Заблоцкая Е.В., Тищенко Т.Н., Горблянская А.С. Редкие виды растений на территории парка Института ядерной энергии и промышленности 149

Кучерик Г.В., Омельчук Ю.А. Математическое описание процессов сорбции и регенерации сульфатов на анионите АВ-17-8 154

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant **7**

Bahtina N.V., Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B, Sukrushev A.V. Safety Analysis of Nuclear Installation with WWER-1000 in Case of Steam Generator Feed Water Temperature Decreasing 7

Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B, Merzlikin G. Ya., Sukrushev A.V. Mitigation Methods Analysis of a Beyond the Design Basis Accident at Nuclear Installation with WWER Caused by Primary-to-Secondary Leak with the Subsequent Failure of the Steam Relief System of the Emergency Steam Generator 12

Zatsarinnaya T.G., Anikevich K.P., Khegay V.A. Structural Model of the Level Automatic Control System in the Turbine Condenser 17

Kachur S.A., Davidenko E.N. Identification of a violation of the integrity of the coolant circulation cir-cuit in VVER based on statistical methods 26

Ripp A.G., Matuzaeva O.V., Miroshnichenko E.V., Dovgalenko V.V., Chernyavskaya S.A. Features of the organization of the discipline "Physical workshop" for students of the direction «Nuclear power plants» 33

Alternative and renewable energy sources **38**

Avakian M.K., Peryshkin M.D, Kakushina E.G., Reshetnikov T.V., Solomonenko A.V. Methods for solving global conditional optimization in relation to energy systems 38

Baravleva A.E., Tolstikhina L.V., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Solomennikova S.I. Application of HYS-technologies for the selection of flood control hydraulic systems, taking into account the minimum environmental impact 42

Dyachenko I.S., Peryshkin M.D., Novakov E.V., Lenivenko, Lvov T.A. The regulatory effect of the frequency load. Influence on the structure of the automatic frequency unloading 47

Loseva I.G., Peryshkin M.D, Kakushina E.G., Reshetnikov T.V., Nebesny V.V. Assessment of the dynamics of reducing the power of alternative and renewable energy sources (solar power plants, wind farms, hereinafter - renewable energy sources). Using the value of RES power reduction as a normative disturbance 51

Peryshkina L.V., Peryshkin M.D., Samachuk A.S., Bezrukov U.V., Balabai V.H. The use of structural and functional reliability indicators in determining solutions for long-term development 57

Semenyuk N.V. Influence of inhomogeneity of electric network on optimality of electric energy mode parameters 61

Simonov I.V., Kuvshinov V.V., Portnova E.P., Kurenko A.V., Kulemina A.P. Combined biogas station 67

Sitnikov S.A., Simonov I.V., Bezrukov U.V., Balabai V.H., Lvov T.A. Peculiar properties features of voltage testing of the overhead line with shipping reactors 71

Shagimardanov P.D., Zvada P.A., Taran I.O., Kakushina E. G., Portnova E. R. The effect of saturation of current transformers on the operation of relay protection and automation equipment 76

Electrotechnical complexes and systems **81**

Balla A.G., Skopinskiy V.S., Simonov I.V, Novak E.V., Lenivenko B.O. The functioning of the relay protection of the power system in the Republic of Crimea and the city Sevastopol, the analysis of malfunction and methods for its elimination 81

Guseva E.V., Tsaloev V.M. Improving the reliability of the measurement results of voltage deviation in the power supply system 86

Kochetov I.A., Shaytor N.M., Rjaskoff Y.I. New technologies for manufacturing high frequency inductor machines 92

Titarenko O.N., Shesterniova A.M., Malyuk E.G. Increase of efficiency of protecting from the arc shorting in distributive devices by means of application of optical sensors 97

Shesterniova A.M., Titarenko O.N., Malyuk E.G. Energy-saving solutions in electrical distribution grids using smart grids Smart Grid 103

Chemical technology of nuclear power plants **112**

Akimov A.M., Kotelnikova S.A., Fedorova S.A., Magdych E.A. Theoretical foundations of membrane separation of gas mixtures 112

Strekalov S.D., Frolova M.A. Application of polar models in the description of radionuclide decomposition on the example of potassium-40 117

Fedorova S.A., Magdych E.A., Akimov A.M., Kravchuk A.A. Purification of waste water from nickel ions (II) by thermally modified natural sorbents 124

Cherkashina N.I., Magdych E.A. Adsorption characteristics of rice sorbent nickel husks extraction in single and binary systems 131

Environmental Safety **137**

Babinetskaya A.S., Derbasova N.M. Substantiation of the choice of a conceptual model of the catchment area for forecasting the water availability of the Simferopol reservoir 137

Zablotskaya E.V., Gorblyanskaya A.S., Tishchenko T.N. Inventory of emissions of harmful substances into the atmosphere for the object "Construction and reconstruction of the Kerch – Sevastopol highway, stage 6" 143

Zablotskaya E.V., Tishchenko T.N., Gorblyanskaya A.S. Rare plant species in the Park of the Institute of nuclear energy and industry 149

Kucherik G.V., Omelchuk Yu.A. Mathematical description of sorption and regeneration processes sulfates on anion exchanger AB-17-8 154

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК.621.039.586

Оценка безопасности ЯЭУ с ВВЭР-1000 при снижении температуры питательной воды парогенераторов

Н.В. Бахтина[1], Ю.В. Браславский[2], К.Б. Матузаев[3], А.В. Сукрушев[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]NVBahtina@sevsu.ru, [2]YVBroslavsky@sevsu.ru, k.b.matuzaev@sevsu.ru, [4]avsukrushev@sevsu.ru

Статья поступила 30.10.2020 г ; после доработки 03.11.2020 г.

Аннотация

Температура питательной воды парогенераторов ядерной установки с реакторами типа ВВЭР оказывает существенное влияние на безопасность реактора и всей установки в целом. Наиболее опасным является быстрое снижение данной температуры при работе ЯЭУ на номинальном уровне мощности. В статье выполнена оценка безопасности ядерной энергетической установки с реактором ВВЭР-1000 в случае снижения температуры питательной воды с обесточиванием энергоблока в наиболее неблагоприятный момент для подобного нарушения.

Ключевые слова: ядерная установка, водо-водяной реактор, безопасность, парогенератор, питательная вода

Safety Analysis of Nuclear Installation with WWER-1000 in Case of Steam Generator Feed Water Temperature Decreasing

N.V. Bahtina[1], Yu.V. Braslavskiy[2], K.B Matuzaev[3], A.V. Sukrushev[4]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]NVBahtina@sevsu.ru, [2]YVBroslavsky@sevsu.ru, k.b.matuzaev@sevsu.ru, [4]avsukrushev@sevsu.ru

Received 30.10.2020 y. ; received in final form 03.11.2020 y.

Abstract

Steam generator feed water temperature of a nuclear installation with WWER-1000 influences greatly upon reactor's safety and the installation itself. The most dangerous situation is the rapid decrease of this temperature at nominal rating power of a nuclear installation. The article analyses the safety of a nuclear installation with WWER-1000 in case of feed water temperature decreasing together with power unit blackout during the worst-case scenario.

Keywords: nuclear installation, WWER type reactor, safety, steam generator, feed water

Введение

Одним из основных условий безопасной эксплуатации ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) как при работе энергоблока на мощности, так и при различных нарушениях, является обеспечение надежного и долговременного отвода тепла от активной зоны реактора. Такая возможность сохраняется, если в парогенераторы (ПГ) установки сохраняется подача питательной воды с расходом, достаточным для поддержания в них требуемого уровня котловой воды.

В то же время, температура питательной воды имеет важное значение для безопасности реактора и всей ЯЭУ в целом. Это связано, в

первую очередь, со свойством саморегулирования ВВЭР, в частности, с действием отрицательного температурного коэффициента реактивности [1].

В случае каких-либо нарушений, вызвавших снижение температуры питательной воды в ПГ, возрастет температурный напор между средами первого и второго контуров ЯЭУ, что, в свою очередь, приведет к снижению температуры теплоносителя первого контура, выделению положительной реактивности в активной зоне реактора и может вызвать повреждение наиболее энергонапряженных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ).

Подобная ситуация может произойти, например, при отключении подогревателей высокого давления (ПВД), обеспечивающих нагрев питательной воды перед ПГ. Дополнительные отказы, возможные для данного типа ЯЭУ, приведут к ухудшению сценария протекания нарушения. Наиболее опасна такая ситуация при работе энергоблока на номинальной мощности в конце кампании реактора, когда концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура низка и выделение положительной реактивности будет существенно больше, чем в начале кампании [2].

В таких условиях важно определить, являются ли достаточными меры, предусмотренные в проекте ЯЭУ, для недопущения повреждения барьеров безопасности и выхода радиоактивных веществ за установленные пределы.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью проведения исследования является оценивание безопасности ядерной энергетической установки с ВВЭР-1000 при снижении температуры питательной воды парогенераторов. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- определить начальные условия для проведения анализа;
- выполнить моделирование рассматриваемой ситуации;
- оценить влияние моделируемого отказа на общую безопасность ЯЭУ.

Выбор начальных условий для проведения эксперимента

В ходе исследований рассматривался режим нарушения в системе питательной воды, приводящий к снижению температуры питательной воды в результате отключения ПВД. Рассматриваемое исходное событие является предаварийной ситуацией и относится к группе исходных событий, приводящих к увеличению теплоотвода от первого контура.

Для обеспечения консерватизма с точки зрения основного для данного исходного события критерия – минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи в активной зоне реактора начальные значения параметров реакторной установки ЯЭУ выбраны с учетом их отклонений от номинальных значений. Числовые значения основных параметров ЯЭУ с учетом принятых отклонений представлены в табл. 1. Значения параметров, отклонения которых несущественны с точки зрения консерватизма получаемых результатов, принимаются номинальными.

Таблица 1. *Основные параметры РУ*

Параметр	Численное значение
Тепловая мощность реактора, МВт	3120
Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, МПа	15,7
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	293
Расход теплоносителя через реактор, $м^3/ч$	80000
Давление пара на выходе из ПГ, МПа	6,37
Температура питательной воды	225
Температура питательной воды после отключения ПВД, °С	164

Расчет режима снижения температуры питательной воды выполнялся при полной мощности реактора с учетом обесточивания энергоблока. В режимах, относящихся к предаварийным ситуациям, потеря электропитания собственных нужд станции может накладываться в любой неблагоприятный момент после закрытия стопорных клапанов турбогенератора (СК ТГ) или в момент начала движения органов системы управления и защиты (СУЗ) по сигналу на отключение реактора аварийной защитой (АЗ). Поэтому при выполнении расчета было консервативно принято, что потеря электропитания собственных нужд станции произошла в наиболее неблагоприятный момент после закрытия СК ТГ – за 1,9 с до срабатывания АЗ.

Автоматический регулятор мощности (АРМ) в исходном состоянии работал в режиме поддержания постоянного значения плотности нейтронного потока вплоть до срабатывания аварийной защиты реактора. В расчете не учитыва-

лось переключение АРМ из режима поддержания постоянного нейтронного потока в режим поддержания давления в главном паровом коллекторе (ГПК) по факту увеличения давления в ГПК. При этом электрогидравлическая система регулирования (ЭГСР) функционировала в режиме поддержания постоянной мощности турбогенератора.

Также в расчете консервативно не учитывалась работа следующих элементов и систем:

- устройства разгрузки и ограничения мощности реактора (РОМ), предупредительных защит первого и второго рода (ПЗ-1и ПЗ-2), ускоренной предупредительной защиты (УПЗ), быстродействующей редукционной установки сброса пара в конденсатор (БРУ-К), вспомогательных питательных электронасосов (ВПЭН);
- системы компенсации давления первого контура (электронагревателей компенсатора давления (КД) и «холодного» впрыска в КД);
- системы продувки-подпитки и борного регулирования.

В качестве единичного отказа в расчете был принят отказ одной быстродействующей редукционной установки сброса пара в атмосферу (БРУ-А) на паропроводе ПГ-2. Дополнительно (для уменьшения количества расчетных вариантов) учитывался отказ контрольного импульсно-предохранительного устройства (ИПУ) КД, что приводит к максимальному росту давления в первом контуре, а также отказ одного дизель-генератора, который приводит к отказу одного канала аварийной питательной воды.

Таким образом, в работе остаются два канала аварийной питательной воды с подключением к четырем парогенераторам.

Предполагалось, что открытие БРУ-А, ИПУ КД и ПГ происходит с задержкой 2 с (1,5 с – инерционность измерительных преобразователей 0,5 с – время прохождения сигнала по электрическим цепям) от момента достижения уставки [3].

Срабатывание аварийной защиты реактора происходит по факту увеличения давления на выходе из реактора до 17,7 МПа. Задержка срабатывания АЗ от момента достижения уставки по сигналу увеличения мощности реактора составила 2 с по вышеперечисленным причинам.

Кроме того, при срабатывании АЗ учитывается застревание одного ОР СУЗ с максимальной эффективностью в верхнем положении.

При проведении анализа рассматривалось изменение параметров реакторной установки для аксиального распределения энерговыделения с максимумом в середине активной зоны и максимальной линейной нагрузкой ТВЭЛ ql = 448 Вт/см, что приводит к наиболее консервативным результатам с точки зрения минимального запаса до кризиса теплоотдачи.

При проведении расчета величины уставок и блокировок на срабатывание систем и оборудования выбраны с учетом неопределенности их выставления, обуславливающей негативное влияние на последствия данного исходного события с точки зрения основного приемочного критерия.

В исходном состоянии весовой уровень парогенератора выбирался исходя из обеспечения минимально возможного запаса воды в ПГ.

Таким образом, принятые допущения позволяют получить достаточно консервативный вариант исследуемого нарушения для анализа безопасности ЯЭУ.

Оценка безопасности ЯЭУ при снижении температуры питательной воды парогенераторов

В ходе выполнении эксперимента использовалась прототипная модель ядерной установки, ВВЭР-1000 (В-320). При этом моделирование выполнялись в программном коде RELAP-5.

Анализ степени безопасности ядерной установки выполнялся на основании критериев, подобных приемочным критериям ЯЭУ на этапе проектирования:

- минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи с вероятностью не менее 95 % должен быть не менее 1,0;
- давление в системе теплоносителя первого контура и паропроводах парогенераторов не должно превышать расчетное значение на 15 %, т. е. 20,30 и 9,02 МПа, соответственно;
- плавление топлива недопустимо, что должно быть подтверждено следующими характеристиками: температура «выгоревшего» топлива не должна превышать 2570 С, температура «свежего» топлива – не более 2840 С.

При проведении моделирования было получено, что указанная комбинация режимов работы АРМ и ЭГСР в совокупности с исходным событием приводит к снижению давления во втором контуре вплоть до давления закрытия СК ТГ. При снижении давления в ГПК до 5,2МПа закрываются стопорные клапана ТГ. В результате закрытия СК ТГ повышается давление во втором и в первом контурах. Принято, что закрытие СК

ТГ приводит также к отключению турбопитательных насосов (ТПН).

На 54 с процесса с соответствующей задержкой срабатывает АЗ по повышению давления на выходе из реактора до 17,7 МПа. Мощность реактора снижается до уровня остаточных тепловыделений. На 56 с процесса происходит однократное открытие рабочих ИПУ КД (принят отказ контрольного ИПУ КД) в течение 5,4с. Максимальное значение давления первого контура достигается на 57 с и составляет 20,1МПа (рисунок 1).

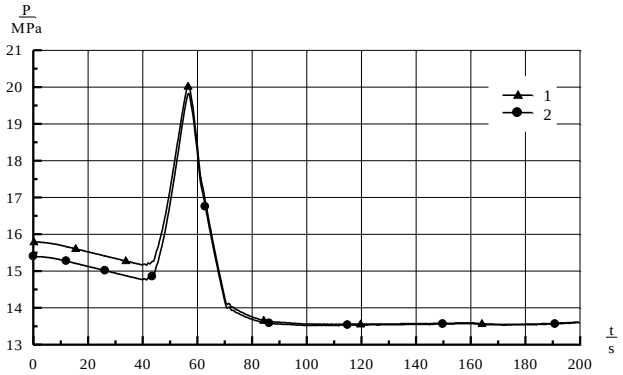


Рис. 1. Давление теплоносителя в первом контуре:
1 – на входе в реактор; 2 – на выходе из реактора

После закрытия стопорных клапанов турбины давление во втором контуре повышается, достигая уставки на открытие БРУ-А паропроводов парогенераторов первой, третьей и четвертой петель (работа БРУ-А на паропроводе ПГ-2 не учитывается). В результате закрытия обратных клапанов на паропроводах парогенераторов переток пара между ПГ отсутствует.

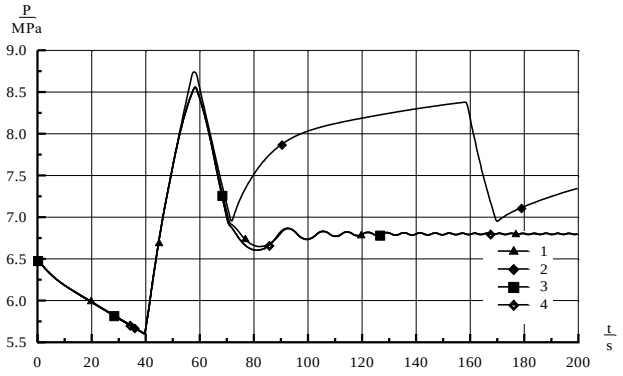


Рис. 2. Давление пара во втором контуре:
1 – в ПГ-1; 2 – в ПГ-2; 3 – в ПГ-3; 4 – в ПГ-4

После закрытия обратных клапанов на паропроводах парогенераторов давление в ПГ-1, 3 и 4 возрастает до уставки на открытие контрольного ИПУ ПГ, а давление в ПГ-2 – до уставок на открытие контрольного и рабочего ИПУ ПГ. Максимальное значение давления во втором контуре достигается на 58 с и составляет 8,7 МПа (рисунок 2).

Потеря электропитания собственных нужд ЯЭУ приводит к следующим событиям:

- отключению всех ГЦН;
- отключению системы компенсации давления первого контура;
- ступенчатому запуску активных систем безопасности.

В результате отключения питательных насосов уровень котловой воды в ПГ начинает снижаться за счет сброса пара через БРУ-А.

По снижению уровня в парогенераторах из-за отключения основной питательной воды запускаются второй и третий аварийные питательные электронасосы (АПЭН) ПГ, подающие воду в четыре парогенератора, в результате чего уровень в парогенераторах восстанавливается (рисунок 3).

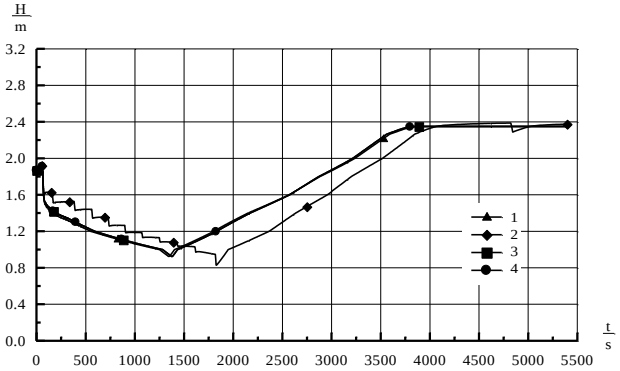


Рис. 3. Уровень котловой воды в парогенераторах:
1 – в ПГ-1; 2 – в ПГ-2; 3 – в ПГ-3; 4 – в ПГ-4

После закрытия контрольных ИПУ ПГ на паропроводах парогенераторов давление в ПГ-1, 3 и 4 поддерживается работой БРУ-А на уровне давления регулирования, а давление в ПГ-2 увеличивается вплоть до уставки на открытие контрольного ИПУ ПГ. Далее аналогичный процесс будет повторяться с некоторым снижением частоты срабатывания ИПУ ПГ, что обусловлено снижением мощности остаточных тепловыделений активной зоны.

В результате ухудшения теплоотвода ко второму контуру повышаются температура и давление теплоносителя первого контура. Совместная работа БРУ-А и двух АПЭН снижает и в дальнейшем стабилизирует давление первого контура.

После отключения ГЦН и окончания их выбега устанавливается естественная циркуляция

теплоносителя первого контура.

Масса пара, выброшенного через паросбросные устройства второго контура, к 5400 с процесса составила 153,5 т.

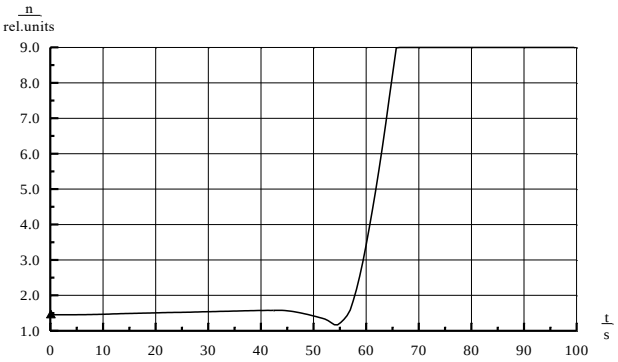


Рис. 4. Минимальный запас до кризиса теплоотдачи

Из рисунков 1, 2, 3 и 4 видно, что полученные при анализе значения исследуемых величин не превысили проектных значений, и составили:

- для коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи – минимальное полученное значение составило 1,15 (минимальная проектная величина – 1,0);
- для температуры топлива – максимальное достигнутое значение составило 1820 °С (максимальная проектная величина – 2570 °С);
- для давления в первом и втором контурах – полученный максимум 20,1 и 8,7 МПА, соответственно (проектный максимум составляет 20,3 и 9 МПа).

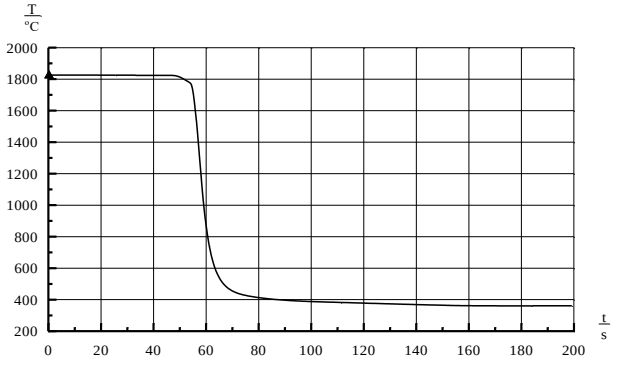


Рис. 5. Максимальная температура топлива

Таким образом, при возникновении нарушения нормальной эксплуатации, обусловленного отключением подогревателей высокого давления и снижением температуры питательной воды парогенераторов, с учетом принятых консервативных условий протекания процессов в ядерной установке, перегрева топлива и оболочек ТВЭЛ не произойдет, что подтверждает достаточный уровень безопасности ЯЭУ данного типа даже при условии увеличения номинальной мощности до 104 % (3120 МВт).

Заключение

Проведенные исследования по анализу безопасности ядерной установки с ВВЭР-1000 при снижении температуры питательной воды ПГ показали следующие результаты:

- принятые в исследовании допущения позволяют получить достаточно консервативный вариант исследуемого отказа для анализа безопасности ЯЭУ;
- результаты исследований показали, что при принятых исходных данных, начальных и граничных условиях обеспечивается выполнение критериев, характеризующих безопасность ядерной установки.

Список литературы

1. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов / В.А. Иванов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургсоке отд-ние. 1994. – 384 с., ил.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие / В.М. Зорин. – М.: издательский дом МЭИ, 2012. – 673 с.: ил.
3. Выговский С.Б. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, Е.В. Чернов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.

References

1. Ivanov V.A. *Ekspluatatsiya AES: Uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: Textbook for high schools]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994, 384 p.
2. Zorin V.M. *Atomnye electrostantsii: uchebnoe posobie* [Nuclear power plants: textbook]. Moscow, MEI Publ, 2012, 673 p.
3. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Chernov E.V. *Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.

УДК.621.039.586

Анализ методов смягчения последствий запроектной аварии на ЯЭУ с ВВЭР, обусловленной течью из первого контура во второй с последующим отказом паросбросного устройства аварийного парогенератора

Ю.В. Браславский[1], К.Б. Матузаев[2], Г.Я. Мерзликин[3], А.В. Сукрушев[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]YVBroslavsky@sevsu.ru, [2]k.b.matuzaev@sevsu.ru, [3]gymerzlikin@sevsu.ru, [4]avsukrushev@sevsu.ru

Статья поступила 15.10.2020 г.; после доработки 19.10.2020 г..

Аннотация

При эксплуатации ядерной установки возможны аварийные ситуации, при которых происходит отказ нескольких элементов ЯЭУ. Такая ситуация классифицируется как запроектная авария и требует дополнительных действий оперативного персонала для перевода установки в безопасное состояние. В статье выполнен анализ эффективности действий персонала в случае запроектной аварии на ЯЭУ с ВВЭР-1000, обусловленной большой течью в парогенераторе с одновременным отказом его паросбросного устройства.

Ключевые слова: ядерная установка, водо-водяной реактор, безопасность, парогенератор

Mitigation Methods Analysis of a Beyond the Design Basis Accident at Nuclear Installation with WWER Caused by Primary-to-Secondary Leak with the Subsequent Failure of the Steam Relief System of the Emergency Steam Generator

Yu.V. Braslavskiy[1], K.B Matuzaev[2], G. Ya. Merzlikin[3], A.V. Sukrushev[4]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]YVBroslavsky@sevsu.ru, [2]k.b.matuzaev@sevsu.ru, [3]gymerzlikin@sevsu.ru, [4]avsukrushev@sevsu.ru

Received 15.10.2020 y.; received in final form 19.10.2020 y.

Abstract

Accidents, which cause failure of several nuclear installation constructional elements, could happen during nuclear installation operation. This situation is classified as a beyond the design basis accident and requires additional operations by the stuff to provide nuclear installation's stable operation. The article analyzes effectiveness of the stuff actions in case of beyond the design basis accident at the nuclear installation with WWER-1000, which is caused by a steam generator large leak with the subsequent failure of its steam relief system.

Keywords: nuclear installation, WWER type reactor, safety, steam generator

Введение

Важным условием безопасной эксплуатации ядерной установки (ЯЭУ) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) является целостность барьеров, обеспечивающих локализацию радиоактивности при работе реактора на любом уровне мощности. Одним из таких барьеров является первый контур ядерной установки. Важнейшим элементом ЯЭУ, в котором

происходит передача тепловой энергии от первого контура второму, является парогенератор (ПГ) [1]. Нарушение плотности ПГ (теплообменных трубок, коллекторов) приведет к попаданию радиоактивного теплоносителя во второй контур. При этом, если течь достаточно велика, то давление во втором контуре будет увеличиваться и возможно открытие быстродействующей редукционной установки сброса пара в атмосферу (БРУ-А) аварийного ПГ [2].

Подобное происшествие классифицируется как проектная авария, однако дополнительные отказы элементов, участвующих в данном технологическом процессе, могут перевести рассматриваемую аварию в категорию запроектных, требующих от персонала дополнительных действий для смягчения последствий.

В указанных условиях это возможно в случае, если произойдет отказ БРУ-А, и после снижения давления в ПГ она останется в открытом положении, что приведет к дальнейшей потере среды первого контура в атмосферу, опустошению баков аварийного запаса борной кислоты и нарушению отвода тепла от активной зоны.

При этом правильные действия персонала должны существенно увеличить время до начала перегрева ядерного топлива, давая возможность аварийным службам восстановить нормально состояние отказавших элементов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью проведения анализа является оценка эффективности действий оперативного персонала ЯЭУ с ВВЭР-1000 в случае запроектной аварии, обусловленной большой течью в парогенераторе. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- определить начальные условия для проведения анализа;
- выполнить моделирование рассматриваемой аварии без учета действий оперативного персонала;
- выполнить моделирование аварии с учетом действий персонала и оценить влияние этих действий на процесс протекания аварии.

Выбор начальных условий для проведения анализа

В ходе исследований рассматривалась аварийная ситуация, исходное событие которой привело к потере теплоносителя первого контура. В качестве такого события принята течь теплоносителя из первого контура во второй условным диаметром 100 мм вследствие отрыва крышки коллектора парогенератора первой петли. Также предполагалось, что после срабатывания аварийной защиты (АЗ) реактора и закрытия стопорных клапанов турбины быстродействующие редукционные установки для сброса пара в конденсатор не работают, а также произошло заклинивание БРУ-А аварийного парогенератора в открытом положении

Параметры стационарного режима ЯЭУ приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Основные параметры РУ*

Параметр	Численное значение
Тепловая мощность реактора, МВт	3120
Давление в первом контуре, МПа	16
Температура теплоносителя на входе в реактор, ^{o}C	293
Минимальный расход теплоносителя через реактор, м^3/ч	86000
Протечки теплоносителя мимо активной зоны, %	3
Давление в парогенераторе, МПа	6,5

В ходе анализа были рассмотрены два варианта протекания аварийной ситуации:

1. Аварийный процесс развивается без учета действий оперативного персонала. При этом технологические переключения в ядерной установке осуществляются согласно алгоритмам защит и блокировок, принятым для типового проекта ЯЭУ с ВВЭР-1000 (В-320).

2. Аварийный процесс развивается с учетом действий оперативного персонала, направленных на ограничение потерь теплоносителя через течь и предотвращение перегрева активной зоны реактора. Критерием успеха действий персонала принято достижение условий, при которых возможен переход в режим планового расхолаживания ЯЭУ до начала разогрева активной зоны.

Также было принято, что после закрытия стопорных клапанов турбины переключения на коллектор собственных нужд не происходит, что приводит к отключению турбопитательных насосов, т. к. их пароснабжение осуществляется из отбора главной турбины.

Моделирование процессов выполнялось при помощи учебно-научной лаборатории «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ», разработанной коллективом НИЯУ «Московский инженерно-физический институт» с применением интегрированной среды «Эникад», предназначенной для создания программно-аппаратных комплексов полно-

масштабных компьютерных анализаторов [3].

Анализ аварийной ситуации без учета действий оперативного персонала

В результате большой течи теплоносителя из первого контура во второй происходит падение давления первого контура, включаются трубчатые электронагреватели компенсатора давления (ТЭН КД), а также срабатывают аварийная и разрывная защиты. После срабатывания АЗ реактора мощность активной зоны снижается до уровня остаточных энерговыделений. Уровень в компенсаторе давления падает, что приводит к отключению ТЭН КД.

После начала поступления теплоносителя первого контура во второй уровень в аварийном парогенераторе увеличивается, что приводит к отключению главного циркуляционного насоса (ГЦН) данной петли и возникновению в этой петле обратного тока теплоносителя. Давление в аварийном ПГ увеличивается незначительно, т. к. энтальпия теплоносителя первого контура меньше энтальпии воды на линии насыщения в парогенераторе (рисунок 1). После срабатывания АЗ реактора давление во втором контуре уменьшается, что приводит к закрытию стопорных клапанов турбины

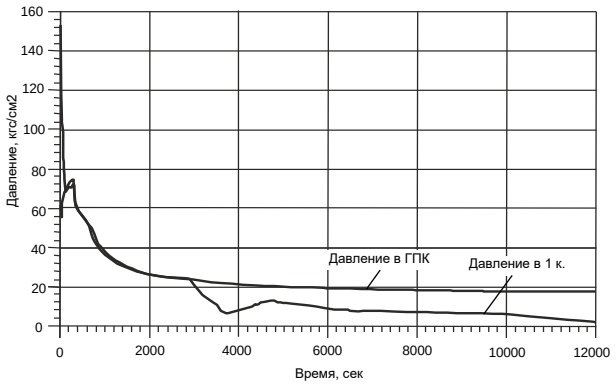


Рис. 1. Давление в первом контуре и главном паровом коллекторе

После закрытия стопорных клапанов давление во втором контуре возрастает до давления срабатывания БРУ-А аварийного ПГ (рисунок 2), уровень котловой воды в ПГ снижается, и в работу включаются вспомогательные питательные электронасосы.

При уменьшении давления первого контура ниже 10,9 МПа начинается подача раствора бора насосами системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ) высокого давления (ВД). Подача борного раствора тремя насосами приводит к быстрому расхолаживанию первого контура, в свою очередь, второй контур расхолаживается через первый.

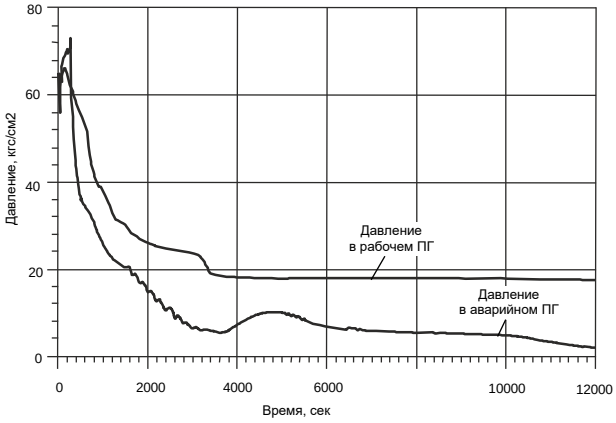


Рис. 2. Давление парогенераторах

После опорожнении баков аварийного запаса раствора борной кислоты (РБК) происходит переключение высоконапорных насосов САОЗ на бак-приямок. По мере истечения теплоносителя первого контура через БРУ-А за пределы герметичной оболочки также происходит опорожнение бака-приямка, и насосы САОЗ перестают работать. Затем сливаются гидроемкости САОЗ (рисунок 3).

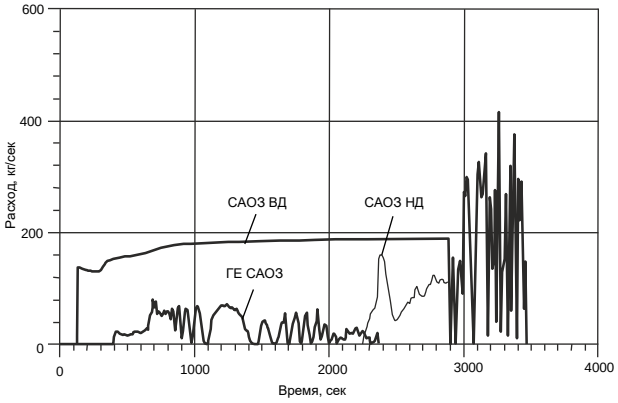


Рис. 3. Расход от насосов и гидроемкостей САОЗ

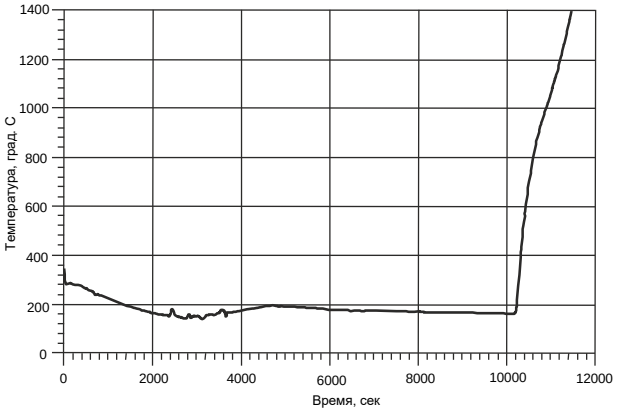


Рис. 4. Температура оболочек ТВЭЛ

Происходит выпаривание теплоносителя первого контура и оголение активной зоны. Примерно через три часа от начала аварии температура оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) достигает 1200 °С (рисунок 4).

Анализ аварийной ситуации с учетом действий оперативного персонала

Предполагается, что для ограничения последствий аварии оператор выполняет действия, направленные на снижение давления в первом контуре, что уменьшает потерю теплоносителя в течь. Это можно сделать посредством открытия линии аварийного газоудаления из первого контура или предохранительных устройств КД.

Также потери теплоносителя возможно уменьшить путем отключения излишнего количества работающих на первый контур насосов САОЗ ВД. Для предотвращения разогрева активной зоны требуется ограничить подачу воды в реактор от системы подпитки первого контура, т. к. в данной ситуации запаса воды в баке-приямке недостаточно для длительного охлаждения активной зоны.

Таким образом, в качестве стратегии управления данной аварией были приняты перевод почти всех насосов САОЗ на рециркуляцию для сохранения запаса воды в баке-приямке и восстановление работы насосов подпитки первого контура из баков борного концентрата. Действия оператора по управлению аварией начинались через 30 минут после ее начала, а восстановление подпитки произошло через 60 минут после начала аварии.

Алгоритм действий оператора заключался в следующем:

- для ограничения потери теплоносителя через течь в работе остается один насос САОЗ ВД, подающий воду в неаварийную петлю, остальные насосы САОЗ ВД и НД переводятся на рециркуляцию;
- арматура на линии подачи РБК из гидроемкостей САОЗ закрывается;
- арматура на линии подачи основной и аварийной питательной воды в аварийный ПГ закрывается;
- для снижения давления в первом контуре открываются линии аварийного газоудаления в барботажный бак;
- ТЭН КД блокируются;
- при достижении концентрации борной кислоты минимально допустимой величины. начинается расхолаживание реакторной установки при помощи БРУ-А неаварийных парогенераторов со скоростью 60 °С/ч;
- работающий на первый контур насос САОЗ ВД переводится на рециркуляцию;
- включается подпитка первого контура;
- закрываются линии аварийного газоудаления.

В результате аварийный процесс развивался следующим образом. До 1800 с протекание аварии происходило аналогично предыдущему расчету. В дальнейшем, на 3600 с процесса работающий на первый контур насос САОЗ высокого давления был переведен на рециркуляцию, линия аварийного газоудаления была закрыта, и подпитка первого контура – восстановлена (рисунок 5).

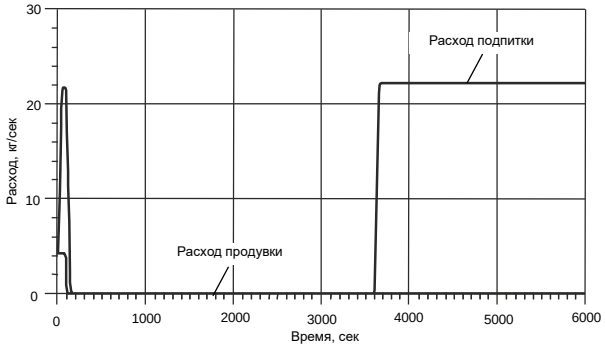


Рис. 5. Расходы подпитки и продувки первого контура

В этот период аварии потеря теплоносителя первого контура через течь за 30 минут составила 36 т (рисунок 6), а подпитка при расходе 80 м3/ч (в работе два подпиточных насоса) – 40 т (рисунок 7), поэтому дополнительная подача теплоносителя в первый контур не требовалась.

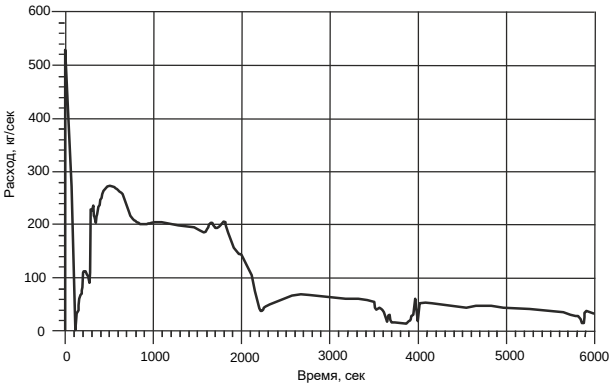


Рис. 6. Расход теплоносителя в течь

После восстановления подпитки процесс стабилизировался, давление в первом контуре не превышало 0,14 МПа, осуществлялось

надежное охлаждение активной зоны, реактор – подкритичен. При этом произошло выравнивание давления в первом контуре и главном паровом коллекторе (рисунок 8).

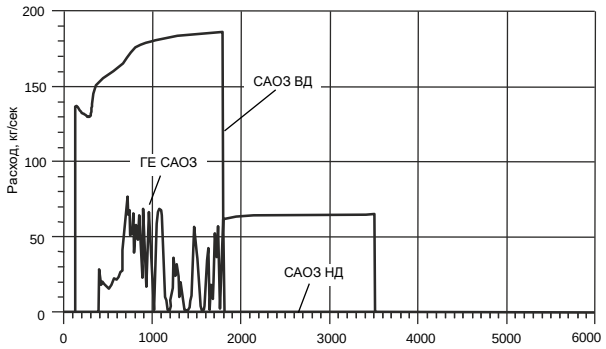


Рис. 7. Расход от насосов и гидроемкостей САОЗ

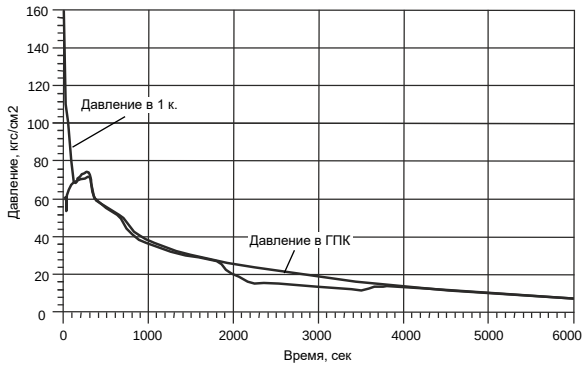


Рис. 8. Давление в первом контуре и главном паровом коллекторе

Таким образом, анализ результатов моделирования аварийного процесса без учета действий оператора и с действиями оператора показал, что оперативными целями безопасности при управлении данной аварией являются:

- минимизация потерь теплоносителя через течь и БРУ-А аварийного ПГ;
- приведение параметров реакторной установки к значениям, при которых возможен переход к плановому расхолаживанию.

Из рисунков 6 и 7 видно, что расход из первого контура в аварийный ПГ практически совпадает с суммарным расходом насосов САОЗ ВД. Возобновление работы подпитки первого контура позволило обеспечить охлаждение активной зоны в течение достаточно длительного времени (около 3 ч с учетом минимально допустимого запаса РБК – 200 м^3) и «сэкономить» борированную воду бака-приямка для использования при более низких параметрах первого контура, когда расход через течь уменьшается.

Заключение

Проведенные исследования по анализу эффективности действий оператора при запроектной аварии, обусловленной большой течью в парогенераторе, показали следующие результаты:

- в случае отсутствия действий оператора большая течь из первого контура во второй приводит к значительной потере теплоносителя и перегреву активной зоны реактора;
- основные действия оператора при данной аварии должны быть направлены на минимизацию потерь теплоносителя через течь, а также на приведение параметров реакторной установки к значениям, при которых возможен переход к плановому расхолаживанию.

Список литературы

1. Бакиров М. Б., Клещук С.М., Богданов Е.А. [и др.] Подходы к управлению ресурсом теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР // Шестой международный семинар по горизонтальным парогенераторам. Подольск, 2004. – С. 32-41.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие / В.М. Зорин. – М.: издательский дом МЭИ, 2012. – 673 с.: ил.
3. Выговский С.Б. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, Е.В. Чернов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.

References

1. Bakirov M.B., Kleshhuk S.M., Bogdanov E.A. Approaches to Resource Managing of Steam Generators Heat-Exchange Tubes of a Nuclear Power Plant with WWER. *Shestoj mezhdunarodnyj seminar po gorizontal'nym parogeneratoram,* Podolsk, 2004, pp. 32-41.
2. Zorin V.M. *Atomnye electrostantsii: uchebnoe posobie* [Nuclear power plants: textbook]. Moscow, MEI Publ, 2012, 673 p.
3. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Chernov E.V. *Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.

УДК 621.184.4

Структурная модель САР уровня в конденсаторе турбины

Т.Г.Зацаринная, К.П. Аникевич, В.А. Хегай
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, biochip@mail.ru, anikonst@mail.ru, valhi4@yandex.ru

Статья поступила 19.11.2020 г.; после доработки 25.11.2020 г.

Аннотация

В данной статье проводилось математическое моделирование цифровой САР уровня в конденсаторе турбины в среде динамического моделирования технических систем SimInTech и исследовались ее характеристики. В процессе моделирования структурная схема и расчетные коэффициенты модели были уточнены, что позволило получить САР с требуемыми показателями качества.

Ключевые слова: теплообменник, конденсатор, уровень, турбина, передаточная функция, регулятор, электростанция.

Structural Model of the Level Automatic Control System in the Turbine Condenser

T.G.Zatsarinnaya, K.P. Anikevich, V.A. Khegay
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, biochip@mail.ru, anikonst@mail.ru, valhi4@yandex.ru

Received 19.11.2020 y.; received in final form 25.11.2020 y.

Abstract

Mathematical modeling of the digital level automatic control system (ACS) in the turbine condenser is developed in this article. This Mathematical model is created with using of Program for dynamic simulation of technique systems. Then it was examined the parameters of this ACS. During the modeling the estimated coefficients of the model were refined. Thus modified variant of automatic control system with required quality indicators was created.

Keywords: heat exchanger, condenser, level, turbine, transfer function, governor, power plant.

Введение

Теплообменные аппараты энергоустановок являются крупногабаритным, металлоемким и дорогостоящим оборудованием, существенно влияющим, а в отдельных случаях и определяющим эффективность и надежность работы АЭС.

Функционирование таких теплообменных аппаратов непосредственно связано с термодинамикой рабочего цикла паротурбинной установки.

Одним из основных способов достижения высокого термического КПД паротурбинной установки является понижение параметров пара за турбиной. С понижением давления и температуры отработавшего в турбине пара уменьшается количество теплоты, передаваемой холодному источнику, что, как известно из термодинамики, при неизменных параметрах свежего пара повышает мощность турбины (за счет увеличения теплоперепада на нее) и экономичность цикла в целом. Иллюстрацией этому служит рис. 1, где на T–S диаграмме изображены два идеальных тепловых цикла Ренкина, отличающиеся между собой только конечным давлением пара. Площадь фигуры abcdea (полезная работа цикла), относящейся к циклу с меньшим давлением отработавшего в турбине пара, больше пло-

щади фигуры $a_1bcde_1a_1$ на площадь заштрихованной фигуры aa_1e_1ea [1].

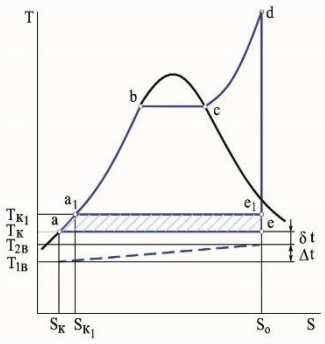


Рис.1. Сопоставление идеальных тепловых циклов ПТУ с разными конечными давлениями пара в T–S диаграмме.

Понижение параметров пара за турбиной обычно осуществляется до давления, ниже барометрического, что и обеспечивает конденсационная установка. Пар может конденсироваться при любом давлении, однако чем ниже температура отвода теплоты цикла (что соответствует более низкому давлению конденсации), тем выше тепловая экономичность паротурбинной установки при неизменных начальных параметрах. Так, при изменении давления на 0,01 кгс/см^2 экономичность турбинной установки АЭС с тихоходными турбинами изменяется на 1%, с быстроходными – на 1,5-2%.

Конденсатор в современных турбинах выполняет и другие функции. Например, при пусках или резких изменениях нагрузки, когда паропроизводящая установка АЭС вырабатывает большое количество пара, чем требуется турбине, или когда параметры пара не соответствуют необходимым, пар направляют (после предварительного охлаждения) в конденсатор, не допуская потери рабочего тела путем его выброса в атмосферу. Для возможности принятия такого «сбросного» пара конденсатор оборудуется специальными приемно-сбросными устройствами. Кроме того, в конденсатор направляют конденсат из коллекторов дренажей паропроводов, уплотнений, подогревателей и вводят добавку химически очищенной воды для восполнения потерь конденсата в цикле.

Для конденсатора важнейшим эксплуатационным показателем эффективности является давление или производные этого параметра – разрежение или вакуум. Для поддержания расчетного вакуума нельзя допускать такого повышения уровня в конденсаторе, при котором из теплообмена будет исключаться часть поверхности охлаждения. С другой стороны, неблагоприятно и значительное снижение уровня конденсата или, тем более, полное опорожнение конденсатора. Поэтому задача регулирования уровня в конденсаторе турбины является актуальной. В данной статье представлен результат моделирования САР уровня в конденсаторе, выполненный в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

Конденсационная установка паровой турбины

В турбинных установках электростанций применяются исключительно поверхностные конденсаторы, поскольку они обеспечивают как сохранение количества конденсата, так и требуемое его качество по солесодержанию.

Конструктивная схема поверхностного конденсатора приведена на рис. 2. К корпусу конденсатора 1 присоединены (чаще всего с помощью сварки, иногда с помощью фланцевого соединения) основные трубные доски 2, в отверстиях которых закреплены трубки 3, образующие охлаждаемую поверхность теплообмена конденсатора. К внешним поверхностям трубных досок крепятся передняя 4 и задняя 5 (поворотная) водяные камеры. Передняя водяная камера с помощью перегородки 6 разделена на два отсека для организации тока воды через конденсатор в два хода. Под ходом в данном случае понимается течение воды без изменения направления движения. В общем случае выбор числа ходов (и соответствующего количества перегородок в водяных камерах) конденсатора определяется оптимальными значениями скоростей воды, гидродинамическим сопротивлением аппарата, компоновкой турбоустановки в целом и рядом других факторов [1].

Охлаждающая вода через патрубок 7 поступает в нижний отсек, проходит по трубкам нижней половины конденсатора, поворачивается на 180° в камере 5, проходит по трубкам верхней половины конденсатора и из верхнего отсека (верхней его части) передней водяной камеры 4 через патрубок 8 удаляется из конденсатора. По такой схеме (двухходовой) выполнено большинство конденсаторов современных паровых турбин.

Паровое пространство конденсатора, в котором размещены охлаждаемые циркуляционной водой трубки, с помощью переходного патрубка

(горловины конденсатора) 9 соединяется с выходным патрубком турбины.

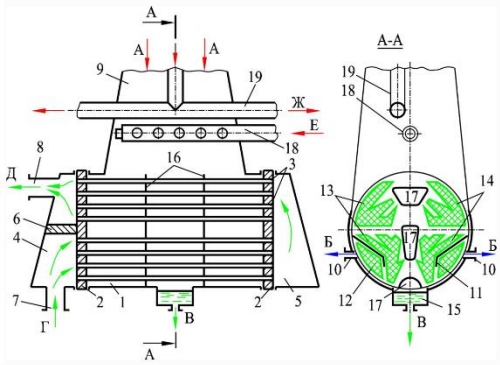


Рис.2. Конструкция конденсатной установки. 1- корпус, 2 - трубные доски, 3 -трубки,4 -передняя водяная камера, 5 -задняя (поворотная) водяная камера, 6 -перегородка водяной камеры, 7 - патрубок подвода циркуляционной воды, 8 -патрубок выхода циркуляционной воды, 9 -переходный патрубок (горловина) конденсатора, 10 -патрубки отсоса паровоздушный смеси, 11 -паровые щиты, 12 -воздухоохладитель, 13, 14 - первый и второй потоки воды соответственно, 15 -конденсатосборник, 16 -промежуточные перегородки, 17 - окна в промежуточных перегородках, 18 - сбросное устройство для пара, 19 - трубы выхода пара из камер отбора ЦНД, А -вход пара в конденсатор, Б -отсос паровоздушной смеси, В -отвод конденсата, Г-вход охлаждающей воды, Д - выход охлаждающей воды, Е-сброс пара из парогенератора, Ж -выход пара из отборов ЦНД.

Пар, поступающий в конденсатор из турбины через переходный патрубок 9, конденсируясь на охлаждаемых циркуляционной водой трубках 3, движется в направлении патрубка отсоса паровоздушной смеси 10. При этом в приведенной на рис. 2 компоновке трубного пучка пар движется преимущественно сверху вниз (часть пара из развитого центрального прохода входит в трубный пучок в радиальном, от центра к периферии, направлении), обходя в нижней части пучка паровые щиты 11, условно выделяющие часть трубного пучка 12, называемую воздухоохладителем.

Для обеспечения более полной конденсации пара в объеме конденсатора и уменьшения количества пара, отсасываемого воздушным насосом через патрубки 10, необходимо, чтобы первый ход циркуляционной воды был организован в части трубного пучка, включающего в себя зону воздухоохладителя. В данном случае (рис. 2), вода подается в водяную камеру снизу.

Для удобства эксплуатации турбины и конденсатора (чистка трубок, их осмотр, замена или заглушка) современные конденсаторы паровых турбин обычно выполняются двухпоточными. Для этого циркуляционная (охлаждающая) вода подается в конденсатор двумя параллельными потоками.

На рис. 2 трубные пучки 13 и 14 этих двух независимых потоков воды симметрично расположены относительно вертикальной осевой линии конденсатора (разрез А - А). Каждый из потоков выполнен двухходовым.

Пар, сконденсировавшийся на поверхности трубок, стекает в нижнюю часть конденсатора, откуда собирается в конденсатосборник 15, из него конденсат откачивается конденсатными насосами.

В паровом пространстве конденсатора для обеспечения вибронадежности его трубной системы, а также для ужесточения корпуса аппарата устанавливаются промежуточные перегородки 16, количество и система расстановки которых определяются по специальной методике. Для выравнивания полей скоростей и давления пара по всему объему конденсатора в промежуточных перегородках выполняются окна 17.

В переходном патрубке конденсатора обычно устанавливаются выводные трубы пара 19 из камер отборов ЦНД на регенеративные подогреватели низкого давления, а также сбросное устройство для пара 18, поступающего из парового парогенератора через РОУ.

В ряде конденсаторов сбросные устройства иногда устанавливаются непосредственно в трубных пучках, но это затрудняет выполнение наиболее рациональной компоновки трубного пучка конденсатора, так как дополнительные потоки пара и воды вызывают аэродинамические и температурные перекосы в пучке и, следовательно, ухудшают эффективность его работы. Такое конструктивное решение может также оказать отрицательное влияние на долговечность работы трубного пучка из-за больших скоростей сбрасываемых потоков пара, его высокой температуры и большой влажности. Эти потоки способствуют эрозионному износу трубок, появлению опасных автоколебаний трубок и их разгерметизации в узле вальцовочного соединения в трубных досках из-за больших термических напряжений.

Несмотря на кажущуюся простоту принципа работы и устройства конденсатора процессы тепло- и массообмена, происходящие в нем, сложны и мало изучены, поскольку, в конденсаторе происходит конденсация не чистого пара, а пара, содержащего воздух и другие газы, которые попадают в конденсатор из атмосферы или растворены в паре. В связи с чем, описание

математической модели САР уровня в конденсаторе требует принятия определенных допущений и упрощений.

Автоматическое регулирование конденсатора

Для стабилизации уровня в конденсаторе турбины используют единственно возможный способ регулирования - изменение производительности конденсатных насосов при помощи регулирующего клапана 1 (рис. 3), который устанавливают после конденсатных насосов 2 и охладителей пара эжекторов 3. Но если нагрузка турбины снизится и расход конденсата уменьшится, тогда нарушается работа не только конденсатных насосов, но и холодильников пара эжекторов, а это может привести к потере вакуума в конденсаторе. Чтобы этого избежать, применяют трехходовой клапан в линии рециркуляции 4, которая необходима для сброса конденсата обратно в конденсатор [2].

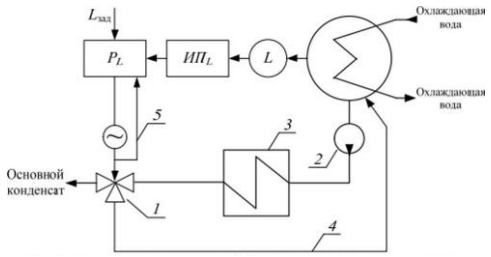


Рис.3. Принципиальная схема САР уровня в конденсаторе турбины.
1 -регулирующий клапан; 2 - конденсатный насос; 3 - охладитель пара эжекторов: 4 -линия рециркуляции: 5 - обратная связь по положению регулирующего органа; L - первичный преобразователь уровня; $ИП_L$- измерительный преобразователь уровня: P_L - регулятор уровня; $L_{зад}$ – заданное значения уровня.

В работе линии рециркуляции возможны два варианта. Первый вариант заключается в следующем: если энергоблок разгружается, в регенеративные подогреватели подается конденсат с меньшим расходом, тогда открывается линия рециркуляции. В этом случае основной клапан и клапан рециркуляции выполняются в едином корпусе.

Второй вариант осуществляется при помощи трехходового клапана, для которого подобраны такие характеристики, чтобы расход через насос 2 и холодильники эжекторов 3 при любом положении был постоянен, а менялось соотношение расходов в линии рециркуляции 4 и основной магистрали. Следовательно, в магистрали значение расхода будет равно сумме двух расходов: конденсата и химочищенной воды.

Поскольку сконденсировавшийся пар собирается в конденсатосборнике, то регулирование конденсатора сводится к поддержанию постоянного уровня воды в объеме конденсатосборника.

Для определения закона регулирования конденсатора можно принять, что конденсатосборник, взятый в качестве объекта регулирования уровня - герметичный бак, имеющий насос на сливе; объект, не обладающий свойством самовыравнивания.

При регулировании уровня в резервуарах задача заключается в приведении в соответствие расходов на притоке и на стоке с тем, чтобы уровень оставался неизменным (рис. 4, а), определяющим будет процесс накопления среды в резервуаре (в соответствии с законом сохранения массы) [3].

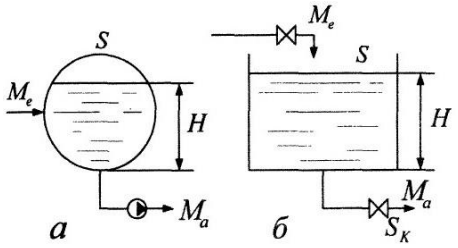


Рис.4. Емкость с регулируемым уровнем.

Расходы на притоке и на стоке (M_e, M_a) и изменения количества жидкости в резервуаре связаны такой зависимостью (в приращениях):

$$\frac{dm}{dt} = \Delta M_в - \Delta M_a \qquad (1)$$

Перерасчет изменения массы в изменение объема проводится с помощью плотности

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \qquad (2)$$

Объем вещества, заполняющего резервуар, можно определить по геометрическим размерам последнего; если резервуар не имеет формы призмы, то площадь зеркала S является функцией высоты. Так что в общем случае

$$V = \int_0^H SdH \qquad (3)$$

и при постоянном S

$$V = S \cdot V \qquad (4)$$

Для малых изменений уровня ΔH соответствующее изменение наполнения составляет

$$dm = \rho dV \approx \rho S \Delta H. \qquad (5)$$

Учитывая (1), (4) и (5), получаем

$$\rho S\Delta H' = \Delta M_e - \Delta M_a \qquad (6)$$

Откуда

$$\Delta H' = \frac{\Delta M_e - \Delta M_a}{\rho S}.$$

Передаточные функции

$$W_{\Delta M_e \to \Delta H}(S) = \frac{K}{S};$$

$$W_{\Delta M_a \to \Delta H}(S) = -\frac{K}{S} \qquad (7)$$

где

$$K = \frac{1}{\rho S}.$$

Из (7) видно, что это передаточная функция интегрального звена. По аналогии со звеном 1-го порядка можно привести ее к виду, выделив условные постоянную времени Т и коэффициент передачи, так как это звено астатическое.

Выбрав базовые величины $\overline{H}$ и $\overline{M}$, преобразуем левую часть выражения (6):

$$\rho S\Delta H' = \left(\frac{\rho S H_0}{M_0}\right) \cdot \frac{M_0}{H_0}\Delta H' = \frac{M_0}{H_0} T\Delta H'.$$

Дробь в скобках выражается в единицах времени, тогда

$$\frac{M_0}{H_0} T\Delta H' = \Delta M_e - \Delta M_a \qquad (8)$$

Из уравнения (8) можно получить передаточные функции в виде

$$W_{\Delta M_e \to \Delta H}(S) = \frac{K_1}{TS};$$

$$W_{\Delta M_a \to \Delta H}(S) = -\frac{K_1}{TS} \qquad (9)$$

где $K_1 = \frac{H_0}{M_0}$ - условный коэффициент передачи в единицах $м \cdot с \cdot кг^{-1}$.

В качестве M_0 и H_0 используем значения расхода и уровня, соответствующие установившемуся состоянию $M_e = M_a = \overline{M}$ и $\overline{H}$. Для призматического резервуара T приобретает тогда значение времени наполнения до номинального уровня

$$T = \frac{\rho S\overline{H}}{\overline{M}}. \qquad (10)$$

Однако эта зависимость не сохраняется, если, на стоке имеется регулирующий клапан и величина стока зависит от положения уровня (рис. 4, б). При этом для свободного слива имеем

$$M_a = \alpha\rho S_k\sqrt{2gH},$$

где α - коэффициент расхода клапана.

Так как $M_a = f(S_k, H)$, то после линеаризации получаем

$$\Delta M_a = \alpha\rho\sqrt{2g\overline{H}\Delta S_k} + \alpha\rho S_k\sqrt{\frac{g}{2H}}\Delta H. \qquad (11)$$

После подстановки значения ΔM_a в (6) и преобразования к стандартному виду получаем

$$TH' + \Delta H = K_3\Delta M_e - K_4 S_k, \qquad (12)$$

где

$$T = \frac{S}{\alpha S_k}\sqrt{\frac{2\overline{H}}{g}}; \qquad K_3 = \frac{\sqrt{2H}}{\alpha\rho S_k\sqrt{g}};$$

$$K_4 = -\frac{2\overline{H}}{S_k}.$$

Соответствующие передаточные функции таковы:

$$\Delta W_{\Delta M_e \to H}(S) = \frac{K_3}{TS+1}; \qquad (13)$$

$$\Delta W_{\Delta S_k \to H}(S) = \frac{K_4}{TS+1}; \qquad (14)$$

Таким образом, рассматриваемая система является статической, а переходный процесс протекает по апериодическому закону с постоянной времени *T*.

Рассмотрим, как изменяется сток M_a, при изменении притока M_e.

В этом случае из (11) при $\Delta S_k = 0$ имеем

$$\Delta M_a = \alpha\rho S_k\sqrt{\frac{g}{2H}}\Delta H = \frac{\Delta H}{K_3} \qquad (15)$$

и $\Delta H = K_3\Delta M_{a,}$ (16)

откуда

$$\Delta H' = K_3\Delta M_a'.$$

Подставив (15) и (16) в (12) при $\Delta S_k = 0$, получаем

$$T\Delta M'a + \Delta M_a = \Delta M_в,$$

Соответствующая передаточная функция выглядит так:

$$W_{\Delta M_a \to \Delta M_e}(S) = \frac{1}{TS+1}.$$

В общем случае, когда перепад на клапане слива определяется не только уровнем *H*, но и

разностью давления ΔP ,

$$M_a = \alpha S_k \sqrt{2\rho(\rho g H + \Delta P)},$$

Тогда выражение (12) принимает вид

$$T\Delta H' + \Delta H = K_3 \Delta M_e - K_5 \Delta S_k,$$

где

$$K_5 = \frac{2(\rho g H + \Delta P)}{S \rho g}.$$

Остальные коэффициенты сохраняют прежнее значение.

Таким образом, для поддержания уровня в заданном постоянном диапазоне, необходимо учитывать влияние регулирующего клапана на систему. Следовательно, передаточные функции объекта примут вид:

$$W_{\Delta M_e \to H}(S) = \frac{K_3}{TS + 1};$$

$$W_{\Delta S_a \to H}(S) = -\frac{K_4}{TS + 1}.$$

Таким образом, получив передаточную функцию объекта, можно приступать к моделированию и исследованию САР уровня в конденсаторе турбины.

Математическое моделирование цифровой САР уровня в конденсаторе турбины в среде SimInTech

Составленная на основе принципиальной схемы (рис. 3) функциональная схема САР уровня в конденсаторе показана на рис. 5.

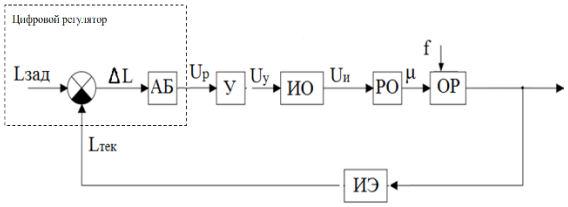


Рис.5. Функциональная схема САР уровня в конденсаторе.

В состав функциональной схемы входит цифровой регулятор, алгоритмический блок АБ которого формирует *ПИ* – закон регулирования. На выходе регулятора формируется управляющее воздействие U_p в случае, когда отклонение расхода конденсата ΔL, представляющее собой алгебраическую сумму текущего $L_{тек}$ и заданного уровней $L_{зад}$, не равно нулю. Управляющие импульсы регулятора U_p усиливаются в блоке усилителя *У* до уровня достаточного для включения электродвигателя исполнительного механизма (ИО). Под действием управляющего сигнала U_u орган регулирования (РО), т.е. регулирующий клапан (РК), переместится в заданном направлении на величину μ, тем самым, приводя к увеличению (уменьшению) расхода конденсата и, следовательно, к изменению уровня в конденсаторе до заданного значения. В регуляторе уровня реализуется ПИ-закон регулирования, однако, из-за ввода в регулятор отрицательной обратной связи регулятор будет работать по П-закону, обеспечивая перемещение регулирующего органа с переменной скоростью.

Динамические свойства САР уровня в конденсаторе описываются следующими передаточными функциями:

- объекта регулирования:

$$W(S) = \frac{K}{TS + 1}.$$

- усилителя:

$$W(S) = \frac{U(S)}{\Delta U(S)} = k.$$

-электрического механизма однооборотного (МЭО) совместно с РК:

$$W(S) = \frac{k}{S}.$$

В качестве алгоритма функционирования алгоритмического блока принят ПИ-закон регулирования с передаточной функцией:

$$W(S) = k_П + \frac{k_И}{S}.$$

Интерпретация математических моделей автоматических систем совокупностью передаточных функций объекта регулирования и элементов регулятора позволяет представлять математические модели САР графически в виде структурных схем [4].

Таким образом, на основе функциональной схемы САР (рис.5) структурную схему исследуемой модели САР уровня в конденсаторе можно реализовать в варианте, представленном на рис. 6.

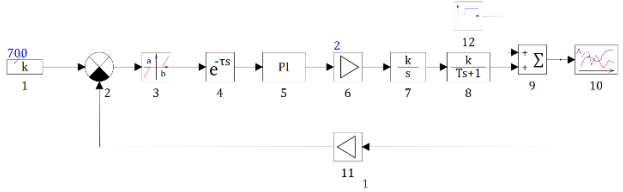


Рис.6. Структурная схема модели САР уровня в конденсаторе турбины.

В данной схеме звено $e^{-\tau s}$ учитывает запаздывание в САР, вызванное процессом квантования непрерывного сигнала по времени. Также в структуру САР введено линейное звено с зоной нечувствительности.

Числовые значения коэффициентов, принятые для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. *Значение свойств блоков структурной схемы.*

Блок	Свойство	Значение
1	Заданное значение	k = 700 мм
2	Весовые множителями для каждого из входов	[1;–1]
3	Нижняя граница зоны нечувствительности	a = 1
	Верхняя граница зоны нечувствительности	b = 1
	Коэффициент усиления	k = 1
4	Время запаздывания	τ = 0,02 с
5	Пропорциональный коэффициент	$k_п$ =20
	Интегральный коэффициент	$k_и$ = 0.0055
6	Коэффициент усиления	k = 2
7	Коэффициент усиления	k = 5
8	Коэффициент усиления	k = 0,38
	Постоянная времени	T = 20 с
9	Весовые множителями для каждого из входов	[1;1]
10	Количество входных портов	1
11	Коэффициент усиления	k = 1
12	Время срабатывания	t = 9 с
	Начальное состояние	y_0 = 0
	Конечное состояние	y = 100 мм

Числовые значения коэффициентов в структурной модели варьировались в процессе моделирования.

График переходного процесса, представленный на рис. 7, демонстрирует, что САР компьютерной модели оказалась неустойчивой и требует коррекции.

С целью обеспечения устойчивых с требуемыми показателями качества переходных процессов изменим структуру САР посредством введения в систему дополнительного устройства - корректирующего.

Измененная структура САР представлена на рис. 8.

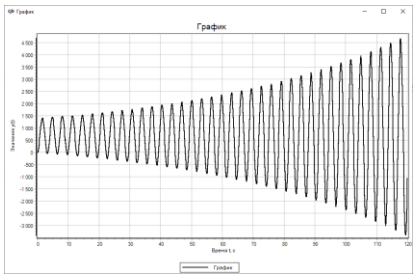


Рис.7. График переходного процесса в САР уровня в конденсаторе.

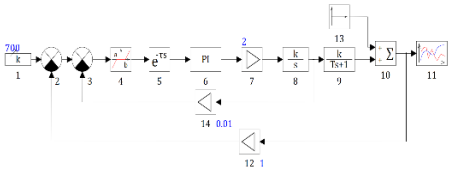


Рис.8. Структурная схема модели САР уровня в конденсаторе турбины с корректирующим элементом в виде жесткой отрицательной обратной связи.

Числовые значения коэффициентов, принятые для дополнительного расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2*. Значение свойств блоков структурной схемы.*

Блок	Свойство	Значение
1	Заданное значение	k = 700 мм
2	Весовые множителями для каждого из входов	[1;–1]
3	Весовые множителями для каждого из входов	[1;–1]
4	Нижняя граница зоны нечувствительности	a = 1
	Верхняя граница зоны нечувствительности	b = 1
	Коэффициент усиления	k = 1
5	Время запаздывания	τ = 0,02 с
6	Пропорциональный коэффициент	$k_п$ = 20
	Интегральный коэффициент	$k_и$ = 0.0055
7	Коэффициент усиления	k = 2
8	Коэффициент усиления	k = 5
9	Коэффициент усиления	k = 0,38
	Постоянная времени	T = 20 с
10	Весовые множителями для каждого из входов	[1;1]
11	Количество входных портов	1
12	Коэффициент усиления	k = 1
13	Время срабатывания	t = 9 с
	Начальное состояние	y_0 = 0
	Конечное состояние	y = 100 мм
14	Коэффициент усиления	k = 0,01

В результате моделирования САР с коррек-

тирующим элементом в виде жесткой отрицательной обратной связи и со скачкообразным изменением возмущающего воздействия получен график переходного процесса, показанный на рис. 9.

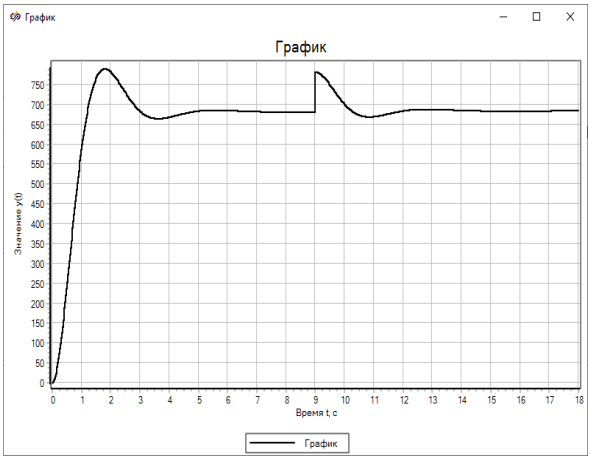


Рис.9. Переходный процесс САР, реализующей ПИ-закон регулирования.

Показатели качества САР, полученные на основе обработки графика следующие:

1) По заданному воздействию:

- статическая ошибка $\Delta L = L_{зад} - L_{уст}$, т.е.

$$\Delta L = 700 - 680 = 20 \text{ мм};$$

- время регулирования $t_p = 4{,}1$ с;

- перерегулирование $\sigma = \dfrac{L_{\max} - L_{уст}}{L_{уст}} \cdot 100\,\%$,

$$\sigma = \frac{790 - 680}{680} \cdot 100\,\% = 16{,}2\%;$$

- количество перерегулирований n = 1 ;

- степень затухания $\varphi = \dfrac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{\Delta L_1} \cdot 100\,\%$,

где $\Delta L_1 = L_1 - L_{уст}$, т.е. $\Delta L_1 = 790 - 680 = 110$ мм; $\Delta L_2 = L_2 - L_{уст}$, $\Delta L_2 = 685 - 680 = 5$ мм,

тогда $\varphi = \dfrac{110 - 5}{110} \cdot 100\,\% = 95\%$

2) По возмущающему воздействию:

- статическая ошибка $\Delta L = 700 - 683 = 17$ с ;

- время регулирования $t_p = 0{,}67$ с;

- перерегулирование

$$\sigma = \frac{781 - 683}{683} \cdot 100\,\% = 14{,}3\% \ ;$$

- количество перерегулирований n = 1 ;

- степень затухания: $\Delta L_1 = 781 - 683 = 98$ мм, $\Delta L_2 = 688 - 683 = 5$

$$\varphi = \frac{98 - 5}{98} \cdot 100\,\% = 94{,}9\%$$

Из анализа полученных показателей качества САР следует, что процесс регулирования удовлетворяет заданным показателям качества по воздействиям (заданному и возмущающему), т.е. $\sigma \le 20\%$, $n \le 2...3$, $\varphi \le 75\%$.

Заключение

В состав энергетических установок АЭС входит конденсационная установка наряду с другими теплообменными аппаратами, являющимися их неотъемлемой частью. Функционирование таких теплообменных аппаратов непосредственно связано с термодинамикой рабочего цикла паротурбинной установки. В связи с чем, схемы включения конденсаторов паровых турбин должны обеспечить высокую эффективность работы всей паротурбинной установки, минимальный расход электроэнергии на прокачку охлаждающей воды, а также рациональную компоновку оборудования и циркуляционных водоводов в машинном зале электростанции. По расположению конденсаторов относительно турбины все известные схемы могут быть классифицированы по двум основным признакам - местоположению конденсатора относительно турбины и расположению оси трубного пучка конденсатора относительно продольной оси турбоагрегата. Например, на Балаковской АЭС конденсаторы расположены под турбиной и имеют подвальное расположение[5].

Необходимым условием эффективной работы конденсатора является поддержание в нем вакуума. Для поддержания расчетного вакуума нельзя допускать резкого повышения или понижения уровня в конденсаторе. Для получения качественного процесса регулирования уровня конденсата была разработана математическая модель цифровой САР уровня в конденсаторе турбины в среде программного обеспечения SimInTech и выполнен анализ данной САР на установление факта устойчивости системы.

Переходный процесс в первоначальном варианте САР, синтезированной на основе ее функциональной схемы, оказался неустойчивым, поэтому потребовалась коррекция структурной схемы и изменение расчетных коэффициентов в структурной модели. Расчет переходного процесса доработанной модели и определение показателей качества САР по графику переходного процесса, подтвердил, что уточненный

вариант САР отвечает заданным требованиям, а именно, перерегулирование (σ) должно быть меньше 20% (получено при заданном воздействии 16,2 %; при возмущающем 14,3%); количество перерегулирований (n) должно быть не больше 2…3 (получено при заданном и возмущающем воздействиях n = 1) и степень затухания ($\varphi \leq 75\%$) не выходит за границы заданных указанных пределов, расчетное значение равно 95 % Таким образом, представленные в статье результаты исследований, обладают достаточной новизной и практической ценностью, позволяющей использовать полученные результаты в обучении и проведении дальнейших исследований в области автоматизации технологического оборудования АЭС.

Список литературы

1. Теплообменники энергетических установок. Ссылка на интернет источник: http://openedu.urfu.ru/files/book/designations.html.
2. Атрошенко Ю.К. Автоматизированные системы управления АЭС/ Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 81 с.
3. Демченко В.О. Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС та ТЕС. — Одеса: Астроприн. — 2001. — 308 с.
4. Карташов Б.А., Шабаев Е.А., Козлов О.С., Щекатуров А.М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. – М.: ДМК Прогресс, 2017. – 424 с.
5. Системы турбинного отделения. Часть 2. - Балаково: БАЭС, ЦПП, 2000.— 308 с.

References

1. *Teploobmenniki energeticheskikh ustanovok [Heat Exchangers of Power Plants]*. Available on : http://openedu.urfu.ru/files/book/designations.html. (12.12.2020)
2. Atroshenko Ju. K. *Avtomatizirovannie sistmy upravleniya AES [Automated Control Systems of Nuclear Power Plants]* . Ju. K Atroshenko, E.V. Ivanova. – Tomsk: izdatel′stvoTomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014. – 81 p.
3. Demchenko V.O. *Avtomatizatsiya i modelirovanie tekhnologicheskikh protsesov AES i TES. [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]*. Odessa, Astroprin, 2001, 308 p.
4. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modelorovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech: Praktikum po modelirovaniju систем avtomaticheskogo regulirovaniya [SimInTech dynamic modeling environment for technical systems: Workshop on automatic control system modeling]*. – M.: DMK Progress, 2017. – 424 p.
5. *Sistemy turbinnogo otdeleniya [System of turbine room]*. Part 2. - Balakovo: BAES, TSPP, 2000. — 308 p.

УДК 621.039.56

Идентификация нарушения целостности контура циркуляции теплоносителя в ВВЭР на основе статистических методов

С.А. Качур, Е.Н. Давиденко
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 06.10.2020 г.; после доработки 08.10.2020 г.

Аннотация

Предложен метод идентификация момента появления внезапного отказа (скачкообразного изменения параметра) при малых внешних воздействиях на основе статистической информации, отражающей динамику значимых параметров теплоносителя первого контура.

Ключевые слова**:** реактор, главный циркуляционный насос, малые течи, целостность первого контура, теплоноситель.

Identification of a violation of the integrity of the coolant circulation circuit in VVER based on statistical methods

S.A. Kachur, E.N. Davidenko
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 06.10.2020 y.; received in final form 08.10.2020 y.

Abstract

A method is proposed for identifying the moment of sudden failure (abrupt change in the parameter) under small external influences based on statistical information that reflects the dynamics of significant parameters of the primary coolant.

Keywords: nuclear reactor, main circulating pump, small leaks, the integrity of the primary circuit coolant.

Введение

В настоящее время существует проблема своевременной идентификации внезапного отказа при малых внешних воздействиях. Анализ аварий для реакторов типа ВВЭР показал, что главными причинами таких отказов являются малые потери теплоносителя, переходные процессы и взаимодействие систем [1].

Особую опасность представляет внезапное нарушение циркуляции теплоносителя в первом контуре. Такие аварии и инциденты обычно связаны либо с повреждением или разрушением трубопроводов вследствие растрескивания или эрозионно-коррозионного износа, либо разной степени повреждениями главного циркуляционного насоса (ГЦН), которые рассматриваются как крупные технические аварии [2].

Опасность аварии с разгерметизацией первого контура заключается в следующем. При ее возникновении разрушается второй барьер безопасности – герметичный первый контур, нарушается охлаждение первого барьера безопасности и происходит выброс пароводяной смеси в герметичные помещения, что представляет потенциальную опасность для целостности защитной оболочки. Таким образом, имеется вероятность разрушения всех барьеров безопасности.

Необходимо отметить, что технические аварии, связанные с выходом из строя ГЦН, не влияют на работоспособность других элементов

АЭС, но необходимость ремонта или полной замены ГЦН обычно связана с крупными материальными затратами и с длительным простоем энергоблоков.

Основными характеристиками систем контроля целостности первого контура является чувствительность, разрешающая способность и оперативность. Наиболее оперативны (секунды) системы контроля по параметрам теплоносителя.

Системы контроля целостности контура по параметрам теплоносителя строятся на основе штатных систем контроля расхода и давления теплоносителя. Достоинство таких систем – отсутствие дополнительных затрат на их реализацию. Недостаток – применяемые в настоящее время расходомеры и манометры не обладают достаточной чувствительностью и точностью, чтобы зафиксировать начало разрушения трубопровода и малые течи. Для систем контроля по изменению расхода чувствительность зависит от погрешности и диапазона измерения расходомера.

Таким образом, несмотря на большое количество исследований по данному вопросу [1-20], разработка методов своевременной идентификации по параметрам внезапных отказов, приводящих к нарушениям циркуляции теплоносителя первого контура ядерной энергетической установки (ЯЭУ), к которым можно отнести течи, отказ ГЦН в случае механических повреждений, является актуальной.

Предложен метод контроля внезапных отказов, основанный на использовании байесовского подхода к оцениванию параметров. Метод позволяет определить начало течи и разрушения элемента первого контура ЯЭУ.

Цели и задач исследования

Цель исследования – идентификация момента возникновения внезапного отказа и отказавших элементов ЯЭУ на основе анализа параметров теплоносителя в активной зоне реактора.

Исходной информацией для проведения исследования являются статистические данные о параметрах теплоносителя, полученные системами контроля ЯЭУ.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) анализ типов аварий с потерей теплоносителя первого контура;

2) идентификация момента появления внезапного отказа (скачкообразного изменения параметра) при малых внешних воздействиях на основе статистической информации, отражающей динамику значимых параметров теплоносителя первого контура ЯЭУ;

3) идентификация типа отказа на основе заключения о нарушении циркуляции теплоносителя первого контура ЯЭУ, а именно: а) течь главного циркуляционного трубопроводов; б) течь трубопровода, присоединенного к компенсатору объема; в) повреждение ГНЦ.

Для решения указанных задач предлагается вероятностный метод контроля внезапных отказов элементов ЯЭУ при малых внешних возбуждениях и перечень моделей внезапного отказа при нарушении циркуляции теплоносителя.

Аварии с потерей теплоносителя первого контура

Потеря теплоносителя первого контура может происходить в результате разрывов главных циркуляционных трубопроводов или трубопроводов, присоединенных к ним вспомогательных и аварийных систем, таких, как система спецводоочистки, система аварийного охлаждения активной зоны реактора и др. Могут иметь место как частичные, так и полные разрывы этих трубопроводов [2, 3].

Размер течи определяет последствия аварии. Малые течи могут не вызвать повреждение активной зоны. При больших течах избежать кризиса теплообмена не удается. При авариях с потерей теплоносителя действуют практически все системы безопасности, предусмотренные проектом. Поскольку при таких авариях происходит аварийная остановка блока, то возможно полное обесточивание АЭС.

Все трубопроводы первого контура, разрывы которых представляют собой определенную опасность, подвергаются периодическому контролю неразрушающими методами в целях обнаружения возможных дефектов на ранней стадии их развития и устранения. Однако, несмотря на такой контроль, опасность разрушений трубопроводов сохраняется, в связи с этим необходимо анализировать их последствия. Размеры повреждений трубопроводов могут быть как малыми, так и большими, вплоть до полного поперечного разрыва главного циркуляционного трубопровода с беспрепятственным истечением теплоносителя через оба его конца. Последний случай представляет собой максимальную проектную аварию (МПА).

Течи теплоносителя из первого контура можно разделить на следующие виды: компенсируемые, малые, средние, большие (включая МПА)

[2].

Компенсируемые течи не представляют опасности для реакторной установки. Их размер определяется предусмотренными средствами подпитки. При компенсируемой течи параметры реакторной установки не изменяются, так как утечка теплоносителя из первого контура компенсируется за счет подпитки. Такая течь, по существу, не является аварией [2].

Граница малых течей определяется так называемыми параметрами малой аварии. Это такие значения давления, температуры и влажности в помещениях реакторной установки, при которых все оборудование, размещенное в этих помещениях, сохраняет работоспособность. Это означает, что после устранения причины малой аварии реакторная установка может быть включена в работу без предварительной ревизии ее оборудования.

Граница средних течей соответствует, например, для АЭС с ВВЭР-440 диаметру эквивалентного отверстия 200 мм. При такой течи еще не происходит массовой разгерметизации твэлов.

Большие течи сопровождаются массовой разгерметизацией твэлов из-за того, что, несмотря на применение специальной системы аварийного охлаждения, не удается избежать оголения активной зоны реактора. Особенно опасна в этом отношений максимальная проектная авария.

Метод контроля внезапных отказов на основе байесовского подхода к оцениванию параметров

Исходной информацией для диагностики отказа являются статистические данные о параметрах теплоносителя, полученные системами контроля ЯЭУ.

При диагностике отказа решаются следующие задачи:

1) идентификация момента появления внезапного отказа (скачкообразного изменения параметра) при малых внешних воздействиях на основе статистической информации, отражающей динамику значимых параметров теплоносителя первого контура ЯЭУ;

2) идентификация типа отказа на основе заключения о нарушении циркуляции теплоносителя первого контура ЯЭУ, а именно:

а) течь главного циркуляционного трубопроводов;

б) течь трубопровода, присоединенного к компенсатору объема; в) повреждение ГНЦ;

3) определение значимых параметров теплоносителя в моделях внезапного отказа.

Для решения указанных задач предлагается вероятностный метод контроля внезапных отказов элементов ЯЭУ при малых внешних возбуждениях и перечень моделей внезапного отказа при нарушении циркуляции теплоносителя.

Одной из задач, возникающих в результате анализа функционирования системы, является оценивание значений параметров, непосредственное измерение которых невозможно или сложно реализовать.

Для контроля внезапных отказов при малых внешних воздействиях будем применять байесовский подход к оцениванию неизвестных значений параметров. Рассмотрим использование байесовского вывода для одномерных вероятностных моделей, а именно в случае нормального распределения с неизвестным средним и известной дисперсией [3].

Пусть $x= (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ – случайная выборка из нормального распределения с неизвестным средним θ и известной дисперсией σ^2 исследуемого параметра блока ЯЭУ. Объем выборки мал и составляет n, среднее выборочное равно $\bar{x}$. Для решения поставленной задачи используем вероятностную модель

$$p(\theta / x, \sigma^2) = \\ = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{n/2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 + n(\bar{x}-\theta)^2\right]\right).$$

Вид $p(\theta)$ задан следующим образом

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} exp\left(-\frac{1}{2\sigma_0^2}(\theta_0-\theta)^2\right),$$

Апостериорное распределение будет нормальным со средним

$$\alpha = \left(\frac{n}{\sigma^2}\bar{x} + \frac{\theta_0}{\sigma_0^2}\right) \Big/ \left(\frac{n}{\sigma^2} + \frac{1}{\sigma_0^2}\right) \qquad (1)$$

и дисперсией

$$\beta = \left(\frac{n}{\sigma^2} + \frac{1}{\sigma_0^2}\right)^{-1}. \qquad (2)$$

Байесовская точечная оценка параметра блока $\hat{\theta}$ (байесовское среднее) равно α, а разброс значений определятся β.

Предположим, что информация о сигнале поступает через интервал времени Δt. Число измерений n определяет время t, для которого производится контроль наличия скачкообразного изменения сигнала x, т.е. $t = t_{тек} - n\Delta t$. Для определения параметров априорного закона

распределения сигнала x используем данные о предыстории, т.е. рассматриваем множество измерений за предыдущий период времени $T = t - N\Delta t$ (N – объем совокупности данных, $N>>n$, причем объем контрольной выборки n невелик).

Внешнее воздействие имеет скачкообразный характер и определяет такое малое скачкообразное изменение сигнала x, которое не превышает допустимые значения. Для идентификации скачкообразного характера сигнала предложен статистический критерий.

Статистический критерий идентификации скачкообразного изменения сигнала x в момент времени t при малом внешнем воздействии сформулирован следующим образом. Если отклонение байесовского среднего α наблюдаемого сигнала x на интервале времени $[t; t+ n\Delta t]$ от среднего значения θ_0 на интервале $[t; t+ N\Delta t]$ ($N>>n$) по абсолютной величине превышает три значения среднего квадратического отклонения для байесовского среднего, то имеет место скачкообразное изменение сигнала x.

Данный критерий позволил разработать вероятностный метод контроля внезапных отказов при малых внешних воздействиях. Метод включает следующие этапы.

1. Рассчитываем параметры априорного закона распределения (априорные среднее θ_0 и среднее квадратическое отклонение σ_0) на основе данных о предыстории по формулам

$$\theta_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N_i} x_i^{(N)},$$

$$\sigma_0 = \frac{x_{\max}^{(N)} - x_{\min}^{(N)}}{6},$$

где $x_i^{(N)}$, $x_{\max}^{(N)}$, $x_{\min}^{(N)}$ – соответственно i-е, максимальное и минимальное значения совокупности данных о предыстории.

2. Рассчитываем на основе контрольной выборки $\bar{x}$ и σ

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n_i} x_i^{(n)},$$

$$\sigma = \frac{x_{\max}^{(n)} - x_{\min}^{(n)}}{6},$$

где $x_i^{(n)}$, $x_{\max}^{(n)}$, $x_{\min}^{(n)}$ – соответственно i-е, максимальное и минимальное значения контрольной выборки.

3. Определяем по формулам (1) и (2) значения α и β параметров апостериорного распределения.

4. Используем статистический критерий идентификации скачкообразного изменения сигнала. Если $|\alpha - \theta_0| \geq 3\sqrt{\beta}$, то выдаем сообщение о наличии внезапного отказа. В противном случае, после получения результата следующего измерения через Δt, переходим к п.1, сдвигая на один элемент границы исследуемых совокупностей данных.

5. Исследуя аналогичным образом значимые параметры на входе и выходе элементов ЯЭУ, идентифицируем причину отказа, т.е. определяем отказавший элемент.

Модели внезапного отказа при нарушения циркуляции теплоносителя первого контура ЯЭУ

Информация о параметрах элементов первого контура ЯЭУ поступает от СВРК. Датчики, входящие в состав СВРК, осуществляют преобразование первичных физических параметров в электрические сигналы, которые поступают в информационно-измерительную аппаратуру. Математическое обеспечение (МО) вычислительного комплекса (ВК) СВРК обеспечивает расчет основной информации о текущем состоянии активной зоны реактора [4].

Для определения причины нарушения циркуляции теплоносителя необходимо проанализировать используемые в СВРК алгоритмы расчета таких параметров первого контура как: тепловая мощность реактора, массовый и объемный расход теплоносителя.

Тепловая мощность реактора по параметрам I контура определяется следующим образом

$$N_I = \sum_{j=1}^{4} Д_j G_j (i_{Гj} - i_{xj}) + N_0^I, \quad (3)$$

$$i_j = i_0[1 + b_1(T_j - T_0) + b_2(T_j - T_0)^2], \quad (4)$$

где N_0^I, $Д_j$ – постоянные коэффициенты, которые служат дня учета систематических погрешностей при расчете тепловой мощности; G_j – расход теплоносителя через ,j-ю петлю первого контура; $i_{Гj}$ и i_{xj} – энтальпия теплоносителя в горячей и холодной нитке j-й петли первого контура; i_0, b_1, b_2, T_0 – постоянные коэффициенты; T_j – температура теплоносителя в горячей или холодной нитке петли I контура.

Значение массового расхода теплоносителя

в j-й петле G_j рассчитывают по формулам

$$G_j = Q_j \rho_j, \quad (5)$$

$$\rho_j = \rho_0[1 + a_1(T_{xj} - T_0) + a_2(T_{xj} - T_0)^2], \quad (6)$$

где ρ_0, a_1, a_2, T_0 – постоянные коэффициенты; Q_j – значение объемного расхода теплоносителя в j-й петле; ρ_j – плотность теплоносителя в холодной нитке j-й петли; T_{xj} – температура теплоносителя в холодной нитке j-й петли первого контура.

Коэффициенты a_i, b_j (i = 1, 2) определяют методом наименьших квадратов по термодинамическим характеристикам воды.

Объемный расход теплоносителя Q_j, если включен ГЦН в j-й петле, определяют как

$$Q_j = \left\{ B_j \frac{f_j}{f_0} + \sqrt{\left(B_j \frac{f_j}{f_0} \right)^2 - 4C_j \left[A_j \left(\frac{f_j}{f_0} \right)^2 - H_j \frac{\rho_0}{\rho_j} \right]} \right\} \frac{1}{2C_j}, \quad (7)$$

где A_j, B_j, C_j, f_0, ρ_0 – постоянные коэффициенты; f_j – частота напряжения питания ,j-го ГЦН (f_0= 50 Гц); H_j – перепад давления на j-м ГЦН.

Значения коэффициентов A_j, B_j, C_j определяют методом наименьших квадратов по паспортным характеристикам ГЦН.

Анализ представленных выше соотношений (3-7) позволил разработать следующий перечень моделей ситуаций внезапного отказа.

1. При малом уменьшении массового расхода теплоносителя, которое повлечет малое увеличение температуры теплоносителя на выходе рабочей зоны, не произойдет изменения тепловой мощности реактора. Поэтому об уменьшении массового расхода теплоносителя на входе активной зоны при его неизменной входной температуре можно судить по увеличению температуры теплоносителя на выходе. При скачкообразном изменении температуры, если ГНЦ работает в проектном режиме, образовывается течь в главном циркуляционном трубопроводе.

2. Малое скачкообразное увеличение температуры на входе реактора при работе компенсатора объема и ГЦН в проектном режиме может свидетельствовать о появлении течи в присоединенном к нему трубопроводе.

3. Если при стабильной частоте напряжения питания ГЦН температура теплоносителя на входе ГЦН стабильна, а на выходе скачкообразно увеличивается, то произошло повреждение ГЦН.

Таким образом, значимыми параметрами теплоносителя в моделях внезапного отказа при анализе целостности циркуляционного контура является температура теплоносителя на входах и выходах элементов ЯЭУ, входящих в этот контур.

Система штатного температурного контроля ЯЭУ с ВВЭР обеспечивает измерение температуры: теплоносителя на входе в реактор и выходе из него (по замерам в трубопроводах циркуляционных петель), на выходе из топливных кассет (на большей части или на всех кассетах), различных конструкционных элементах ЯЭУ, таких, как поверхности чехлов приводов СУЗ, поверхности корпуса и фланцев реактора, каналов ионизационных камер, элементов трубной системы и корпуса парогенератора и др.

Чтобы добиться высокой точности при измерениях температуры теплоносителя вне активной зоны (в корпусах реакторов и на трубопроводах) применяют термопреобразователи сопротивления (ТПС).

Идентификация скачкообразного изменения параметров предложенных выше моделей производится с помощью разработанного в статье статистического метода.

Заключение

Предложен статистический критерий идентификации скачкообразного изменения сигнала в текущий момент времени при малых внешних воздействиях. Разработан вероятностный метод контроля внезапных отказов при малых внешних воздействиях, основанный на использовании байесовского подхода к оцениванию параметров и предложенного критерия. Метод позволяет выявить скачкообразный характер изменения параметра в случаях, когда значение параметра не превышает допустимые пределы. Получены модели нарушении циркуляции теплоносителя первого контура ЯЭУ. В качестве значимого параметра этих моделей определена температура теплоносителя на входах и выходах элементов ЯЭУ.

Разработанному методу присущи достоинства как существующих методов контроля целостности контура по параметрам теплоносителя, так и методов температурного контроля, т.е. он обладает достаточной чувствительностью и оперативностью, чтобы зафиксировать начало течи и разрушения элемента.

Предлагаемый метод контроля внезапных отказов не требует дополнительного технического оснащения. Модели и метод контроля внезапного отказа могут быть использованы для

усовершенствования существующих автоматизированных систем контроля ЯЭУ.

Список литературы

1. *Острейковский В.А.* Эксплуатация атомных станций./ В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
2. *Бахметьев А.М., Самойлов Г.Б., Усынов О.Б.* Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. *Ллойда Э., Ледермана У.* Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. – М.: Финансы и статистика, 1990.
4. *Брагин В.А.* Системы внутри реакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР/ В.А. Брагин, И.В. Батенин, М.Н.Голованов и др.; Под ред. Г.Л. Левина – М.: Энергоиздат, 1987. – 128с.
5. *Афремов Д.А., Журавлева Ю.В., Миронов Ю.В., Назаров В.С., Радкевич В.Е., Яшников Д.А.* Анализ неопределенности расчетов аварий с потерей теплоносителя для 1-го энергоблока курской АЭС// Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – №6. – С. 422-428.
6. *Алексеев А.В., Горячев А.В., Дреганов О.И., Киреева Л.В., Киселёва И.В., Шулимов В.Н.* Изучение поведения твэлов реактора ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя//Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР. – 2017. – №1. – С. 12-20.
7. *Щуровская М.В., Алферов В.П., Гераскин Н.И., Портнов А.А.*Расчет проектных аварий с нарушением циркуляции теплоносителя для ИРТ МИФИ// Атомная энергия. – 2016. – Т. 120. – №1. – С. 13-16.
8. *Бубнова Т.А., Мамонтов А.Ю., Финякин А.Ф.*Анализ запроектных аварий, связанных с потерей теплоносителя из КМПЦ и обесточиванием собственных нужд 4-го энергоблока курской АЭС// В сборнике: Годовой отчёт НИКИЭТ-2014. – 2014. – С. 142-144.
9. *Чуркин А.Н., Семишкин В.П., Мохов В.А., Фризен Е.А., Ягов П.В.* Расчетный анализ влияния раздутия оболочек твэлов на их максимальную температуру в авариях с потерей теплоносителя //Тяжелое машиностроение. – 2008. – №1. – С. 5-7.
10. *Матвеев Е.Л., Кулаков А.В.* Определение местоположения течи теплоносителя акустико-эмиссионным методом контроля // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №4. – С. 113-122.
11. *Шиманский С.Б.*Обнаружение нестационарных сигналов течи первого контура АЭС с помощью взаимного корреляционного анализа // Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – №3. – С. 183-189.
12. *Шкаровский А.Н., Аксенов В.И., Сердунь Н.П.* Исследование аварийных ситуаций с малыми течами первого контура реактора ВВЭР-1000// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2004. – №3. – С. 64-69.
13. *Ведищев И.Ю., Насонов В.А., Талиев А.В., Песня Ю.Е., Сидоренко А.В., Никонов С.П.* Анализ последствий аварии с разрывом трубопровода первого контура охлаждения ир-8 при конверсии на низкообогащенное топливо // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – №3. – С. 123-128.
14. *Скоморохов А.О., Белоусов П.А., Морозов С.А.* Кластерный анализ сигналов системы акустического контроля течи// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2006. – №4. – С. 3-12.
15. *Тутнов А.А., Лоскутов О.Д.* Оценка вероятности течи в области фланцевого разъема крышки коллектора парогенератора вследствие разрушения шпилек// Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – №6. – С. 344-348.
16. *Гонор В.К., Морозов С.А., Полионов В.П., Портяной А.Г., Швецов Д.М., Коноплев Н.И., Молявкин А.Н.* Разработка влажностной системы контроля течи трубопроводов ВВЭР// Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – №5. – С. 291-294.
17. *Матвеев Е.Л., Матвеев А.Л., Мишенин А.Ю.* Оптимальная среднеквадратичная оценка массового расхода течи теплоносителя// Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. –№4. – С. 239-240.
18. *Дворников П.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Полионов В.П., Титаренко Н.Н., Швецов Д.М., Рощин Н.Г., Матвеев А.Л., Matveev E.L.* Расчетное обоснование алгоритма контроля течи трубопроводов по влажности воздуха // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – №4. – С. 35-44.
19. *Скоморохов А.О., Кудряев А.А., Морозов С.А.* Нейросетевые модели фильтрации сигналов и диагностирования течи трубопроводов ВВЭР// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 72-80.
20. *Матвеев Е.Л., Кулаков А.В., Зубченко А.С.* Акустико-эмиссионный контроль течи в трубопроводах // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 7-8. – С. 2-8.

References

1. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluataciya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., Usinov A.M. *Metodi ochenki i obespecheniya bezopastnosti YaEU* [Methods of estimation and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
3. Ллойда Э., Ледермана У. *Spravochnik po statistike. V 2-h t.*[Handbook of applied statistics. In 2 vols.]. Moscow, Finansy i statistika, 1990.
4. Bragin V.A., Batenin I.V., Golovanov M.N. *Sistemy vnutrireaktornogo kontrolya AES s reaktorami tipa VVER* [Systems into the reactor control of APP with the PWR reactors]. Moskow, Energoizdat, 1987, 128p.

5. *Afremov D.A., Zhuravleva Yu.V., Mironov Yu.V., Nazarov V.S., Radkevich V.E., Yashnikov D.A.* Analysis of uncertainty in calculations of accidents with loss of coolant for the 1st power unit of the Kursk NPP // *Atomnaya energiya*. 2005, V. 98, No. 6, 422-428pp. (in Russian)
6. *Alekseev A.V., Goryachev A.V., Dreganov O.I., Kireeva L.V., Kiselyova I.V., Shulimov V.N.* Study of the behavior of fuel elements of the VVER-1000 reactor in an accident with loss of coolant // *Sbornik trudov AO GNH NIIAR*. 2017, No. 1, 12-20pp. (in Russian)
7. *Schurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Portnov A.A.* The calculation of design-basis accidents by violation of the circulation of the coolant for IRT MEPhI // *Atomnaya energiya*. 2016, V. 120, No. 1, 13-16pp. (in Russian)
8. *Bubnova T.A., Mamontov A.Yu.,Finyakin A.F.* Analysis of out-of-design accidents related to the loss of coolant from the kmpc and the de-energization of the 4th power unit of the Kursk NPP // *V sbornike: Godovoj otchyot NIKIET-2014*. 2014, 142-144pp. (in Russian)
9. *Churkin A.N., Semishkin V.P., Mohov V.A., Frizen E.A., Yagov P.V.* Calculated analysis of the effect of fuel element shell blow-up on their maximum temperature in accidents with loss of coolant //*Tyazhyoloe mashinostroenie*. 2008, No. 1, 5-7pp. (in Russian)
10. *Matveev E.L., Kulakov A.V.* Determination of the location of a coolant leak by acoustic emission control method // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2014, No. 4, 113-122pp. (in Russian)
11. *Shimanskij S.B. С.Б.* Detection of non-stationary signals of NPP primary circuit leaks using cross-correlation analysis // *Atomnaya energiya*. 2007, V. 102. No. 3. 183-189pp. (in Russian)
12. *Shkarovskij A.N., Aksenjv V.I., Serdun' N.P.* Investigation of emergency situations with small leaks of the primary circuit of the VVER-1000 reactor// *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernfyf energetika*. 2004, No. 3, 64-69pp. (in Russian)
13. *Vedischev I.Yu., Nasonov V.A., Taliev A.V., Pesnya Ya.E., Sidorenko A.V., Nikonov S.P.* Analysis of the consequences of an accident with a rupture of the IR-8 primary cooling circuit pipeline during conversion to low-enriched fuel // *Atomnaya energiya*. 2015, V. 118, No. 3, 123-128pp. (in Russian)
14. *Skomorohov A.O., Belousov P.A., Morozov S.A. Cluster analysis of acoustic leak monitoring system signals* // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernfyf energetika.* 2006, No. 4, 3-12pp. (in Russian)
15. *Tutnov A.A., Loskutov O.D.* Estimation of the probability of a leak in the area of the flanged connector of the steam generator collector cover due to the destruction of the pins // *Atomnaya energiya*. 2007, V. 102, No. 6, 344-348pp. (in Russian)
16. *Gonor V.K., Morozov S.A., Polionov V.P., Portyanoj V.P., Portyanoj A.G., Shvecov D.M., Konoplev N.I., Molyavkin A.N* Development of a humidity monitoring system for VVER pipeline leaks // *Atomnaya energiya*. 2007, V. 103, No. 5, 291-294pp. (in Russian)
17. *Matveev E.L., Matveev A.L., Mishenin A.Yu.* Optimal root-mean-square estimation of the mass flow rate of a coolant leak // *Atomnaya energiya*. 2013, V. 114, No. 4, 239-240pp. (in Russian)
18. *Dvornikov P.A.,Kovtun S.N., Budarin A.A., Polionov V.P.,Titarenko N.N., Shvecov D.M., Roschin N.G., Matveev E.L., Matveev E.L.* Calculation justification of the algorithm for monitoring pipeline leaks by air humidity // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernfyf energetika.* 2012, No. 3, 35-44pp. (in Russian)
19. *Skomorohov A.O.,Kudryaev A.A., Morozov S.A.* Neural network models for signal filtering and diagnostics of VVER pipeline leaks // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernfyf energetika.* 2010, No. 4, 72-80pp. (in Russian)
20. *Matveev E.L., Kulakov A.V., Zubchenko A.S.* Acoustic emission control of leaks in pipelines // *Tyazhyoloe mashinostroenie*. 2015, No. 7-8, 2-8pp. (in Russian)

0УДК (378.016+539.1)

Особенности организации дисциплины «Физический практикум» для студентов направления «Атомные станции»

А.Г. Рипп, О.В. Матузаева, Е.В. Мирошниченко , В.В. Довгаленко , С.А. Чернявская

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская 33 город Севастополь, 299053, Россия, ripp1946@mail.ru

Статья поступила 09.11.2020 г; после доработки 11.12.2020 г.

Аннотация

В статье рассматривается технология преподавания и организация учебного процесса дисциплины «Физический практикум». Эта дисциплина изучается в Севастопольском государственном университете студентами направления подготовки «Атомные стации» и является продолжением и развитием раздела «Лабораторный практикум» курса общей физики. Рассматриваются особенности преподавания дисциплины, отличающие её от общей физики. Основная задача статьи: привлечь внимание вузовских преподавателей физики к тому, как можно расширить компетенции студентов в их будущей профессиональной деятельности, причём не только за счёт изучения дисциплины «Физический практикум» – некоторые элементы этой дисциплины вполне могут быть использованы и в курсе общей физики.

Ключевые слова: физический практикум, виртуальные лабораторные установки, EXCEL, научный отчёт, учебный процесс.

Features of the organization of the discipline "Physical workshop" for students of the direction «Nuclear power plants»

A.G. Ripp, O.V. Matuzaeva, E.V. Miroshnichenko, V.V. Dovgalenko, S.A. Chernyavskaya

Sevastopol state University, 33 Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia, ripp1946@mail.ru

Received 09.11.2020 y; received in final form 11.12.2020 y.

Abstract

The article deals with the technology of teaching and organization of the educational process of the discipline "Physical training". This discipline is studied at Sevastopol state University by students of the "Atomic stations" training course and is a continuation and development of the "Laboratory practice" section of the General physics course. The features of teaching the discipline that distinguish it from General physics are considered. The main objective of the article is to draw the attention of University physics teachers to how to expand the competence of students in their future professional activities, and not only by studying the discipline "Physical practice" – some elements of this discipline may well be used in the course of General physics.

Keywords: physical workshop, virtual laboratory installations, EXCEL, scientific report, educational process.

Введение

Учебная дисциплина «Физический практикум» изучается студентами 2 курса Севастопольского государственного университета, направления подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» в осеннем семестре.

На изучение дисциплины отведено 144 часа. В соответствии с рабочим планом дисциплины, ее задача – научить студентов технологии проведения экспериментальных исследований.

Основными элементами этой технологии

являются: постановка задачи, выбор экспериментальной установки и ее настройка, проведение экспериментальных работ, обработка экспериментов, составление научного отчёта, формулирование выводов [1].

Студенты уже имеют определённый опыт проведения экспериментальных исследования – они его получают при изучении дисциплины «Физика», поэтому закономерно, что преподавание дисциплины «Физический практикум» поручено кафедре «Физика». Разумеется, преподавание физического практикума не должно быть повтором общей физики, а должно поднять знания студентов на новый, более высокий уровень. Поэтому преподаватели кафедры «Физика» должны были чётко определить технологию преподавания дисциплины «Физический практикум», обеспечивающую достижение студентами указанного более высокого уровня знаний. То, как была решена эта задача, и рассматривается авторами в настоящей статье.

Постановка задачи

Для организации курса «Физический практикум» необходимо определить несколько принципиально новых по сравнению с курсом общей физики концепций. Эти концепции должны стать основой для решения трёх следующих задач организации дисциплины.

1. Какой должна быть материальная основа дисциплины, то есть инструментальная база, лабораторное оборудование.
2. Какие технические средства – новые по сравнению с техническими средствами, применяемыми в курсе физики, следует использовать в курсе Физического практикума.
3. На какие из элементов технологии проведения экспериментальных исследований следует обратить особое внимание.
4. Следует ли изменить организацию учебного процесса по сравнению с организацией учебного процесса, сложившейся при преподавании физики.

Материальная основа дисциплины

Лабораторная база кафедры «Физика» СевГУ, достаточная для проведения лабораторных работ по общей физике, всё же требует серьезного пополнения для обеспечения курса «Физический практикум». Это – весьма дорогостоящая задача, поэтому кафедра «Физика» выбрала иной путь.

В 2017 году с подачи кафедры СевГУ заключил лицензионное соглашение с Национальным исследовательским Томским политехническим университетом, по которому СевГУ получил право использования программного продукта «Комплекс лабораторных работ для изучения моделей физических явлений и процессов на компьютере (Laboratory Simulations)». Этот комплекс содержит 27 виртуальных лабораторных установок, на которых можно проводить больше, чем 27 экспериментальных исследований (лабораторных работ) [2].

К настоящему времени коллектив преподавателей кафедры «Физика» (авторы данной статьи) уже разработал 30 методических пособий для выполнения виртуальных лабораторных работ.

Главный недостаток виртуальных лабораторных установок очевиден: это не реальные физические установки с реальными приборами, которые надо уметь настраивать, регулировать и модернизировать, а компьютерные программы, моделирующие действительность. Но этот недостаток компенсирует целый ряд достоинств.

Во-первых, каждый компьютер, на котором установлен комплекс Laboratory Simulations, превращается в независимую учебную лабораторию с 27 лабораторными установками.

Во-вторых, установки не ломаются и не нуждаются в уходе, настройке и юстировке. Реальные установки, в противоположность виртуальным, требуют наличия в штате кафедры квалифицированного учебно-вспомогательного персонала (инженера и лаборанта), за этими установками постоянно надо следить, настраивать и ремонтировать, что требует не только усилий УВП, но и постоянных материальных затрат. К тому же, парк лабораторного оборудования нуждается в регулярном обновлении, а каждая новая лабораторная установка, как правило, дороже предыдущих.

В-третьих, в настоящее время все достаточно серьёзные реальные установки для экспериментальных исследований и измерений обязательно сопряжены с компьютером, поэтому технология работы на них в значительной мере похожа на технологию работы с виртуальными установками, так что студенты получают весьма полезный опыт работы.

В-четвертых, главная задача преподавателей, ведущих лабораторные занятия, это научить студентов основным задачам экспериментальных исследований, технологии проведения ис-

следований и обработки экспериментальных результатов, для чего виртуальные установки даже лучше реальных.

Технология проведения экспериментальных исследований

Так как работа с виртуальными лабораторными установками не требует от студентов затрат времени на регулировку и настройку приборов, то появляется возможность сконцентрировать усилия студентов на следующие три важные направления работы.

1. Постановка задачи. Как правило, в методических пособиях студентам описан подробный порядок действий при выполнении лабораторной работы.

Это оправдано двумя причинами.

Во-первых, на каждую лабораторную работу отводится два академических часа, студенту надо за это время проделать эксперименты, обработать их, подготовить и защитить отчёт. Времени мало, поэтому детальный порядок выполнения работы, описанный в методических пособиях, позволяет студентам уложиться в отведённое время.

Во-вторых, у студентов ещё очень мал личный опыт экспериментальных исследований, они ещё только учатся.

Одной из важных особенностей дисциплины «Физический практикум» является то, что она изучается уже после изучения курса общей физики, в котором студенты получили некоторый опыт экспериментальных исследований.

Поэтому в курсе физического практикума целесообразно расширить объем самостоятельной работы студентов – вместо пошагового выполнения инструкции студент уже должен научиться самостоятельно ставить задачу экспериментов.

Это, конечно, не отменяет пользу методических пособий и описанного в каждом из них порядка выполнения лабораторной работы, но позволяет преподавателям требовать от студентов понимания и умения ставить задачу исследований. Даже если студент выполняет работу в соответствии с порядком, изложенным в методическом пособии, он должен в своём отчёте точно и ясно изложить постановку задачи.

2. Обработка результатов эксперимента. Первый опыт обработки результатов экспериментов студенты получают на первом курсе, в частности, при изучении общей физики. В дисциплине «Физический практикум» этот опыт можно закрепить и расширить. Более конкретно, следует обратить внимание на оценку погрешностей измерений, грамотное построение графиков, статистическую обработку данных и подготовку научных отчётов.

3. Подготовка и защита научных отчётов по лабораторным работам. Эта работа для студентов имеет особое значение, так как выпускник университета должен уметь писать квалифицированные научно-технически отчёты и научные статьи. Особое внимание в отчётах следует обратить на формулировку выводов по проделанной экспериментальной работе. Опыт показывает, что студенты в основной своей массе не умеют точно, аргументированно и лаконично формулировать свои мысли и выводы. В курсе физического практикума появляется возможность их этому научить. Защита научно-технического отчёта – это тоже непременная компетенция, которую должен приобрести выпускник университета, поэтому в курсе физического практикума защита отчёта выделена в отдельный самостоятельный, завершающий этап каждой лабораторной работы.

Технические средства

Естественными техническими средствами, которые целесообразно использовать при выполнении лабораторных работ на компьютере, являются современные пакеты компьютерных программ. В первую очередь, это – EXCEL.

Нет необходимости описывать безусловные достоинства EXCEL, который широко используется в современной жизни, но вот какие задачи с его помощью могут решать студенты в курсе физического практикума.

1. Оформление результатов экспериментов и условий экспериментов в виде компактных и наглядных таблиц.

2. Обработка результатов измерений с помощью специальных таблиц и функций EXCEL.

3. Построение графиков со всеми наиболее важными их атрибутами:

- вид экспериментальных точек,
- названия графиков и осей,
- масштабные метки,
- линии тренда и уравнения тренда,
- планки погрешностей.

Пример такого графика показан на следующем рис. 1.

4. Вставка стандартных и оформление собственных рисунков.

5. Составление научных отчётов.

Студентов в университете в курсе информатики обучают возможностям EXCEL, однако

освоить его на достаточно квалифицированном уровне можно только при решении конкретных задач. Дисциплина «Физический практикум», в частности, такие задачи перед студентами ставит. Так что эта дисциплина, преследуя свои цели, попутно способствует практическому освоению студентами EXCEL, что без сомнения повышает их профессиональный уровень.

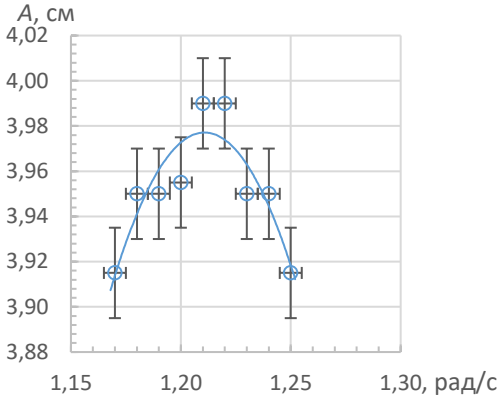


Рис. 1. Резонансная кривая в окрестности резонанса

Организация учебного процесса

Учебный процесс изучения дисциплины «Физический практикум» характеризуется следующими особенностями.

1. Занятия проходят в компьютерном классе кафедры «Физика», оснащённом 15 компьютерами, которые объединены в локальную сеть. Методические указания ко всем лабораторным работам заранее размещены в сети – в папке общего доступа.

2. Как уже отмечалось, в курсе общей физики на выполнение каждой лабораторной работы отводится два академических часа. С учетом общей трудоёмкости дисциплины «Физический практикум» (144 часа) и повышенным по сравнению с общей физикой уровнем выполнения работ, определено для выполнения каждой лабораторной работы 4 академических часа. При этом оказалось целесообразным и удобным для студентов проводить эти 4 часа разделёнными по времени на два занятия по два часа. Содержание первой пары: допуск студентов к выполнению работы и проведение студентами экспериментальных исследований. Содержание второй пары: защита научных отчётов. Во временном промежутке между этими занятиями студенты на своих компьютерах (ноутбуках) оформляют отчёты.

3. Первые четыре занятия – это лекции, посвящённые теории погрешностей измерений и правилам оформления научных отчётов. Отчёты студентам предлагается выполнить полностью в EXCEL, распечатка отчётов не требуется.

4. Всего за семестр каждый студент должен выполнить минимум 10 лабораторных работ (из 30 возможных). Выбор конкретных работ остаётся за студентом. Требование преподавателя чисто количественное: из 10 работ 3 – по механике, 2 – по термодинамике, 2 – по электромагнетизму и 3 – по физике колебаний. Студенты, желающие получить повышенную экзаменационную оценку, могут выполнить дополнительные лабораторные работы.

5. Траектория деятельности каждого студента индивидуальна. Тот, кто работает строго по программе, то есть одна пара – допуск и выполнение работы, вторая – защита отчёта, имеет возможность закончить цикл работ и получить экзаменационную оценку за месяц до окончания семестра. Те, кто работают медленнее или менее успешно, всё равно имеют вполне реальные шансы к концу семестра закончить всю программу работ.

6. Естественно, при наличии трудностей студенты могут приходить на консультации к преподавателям, ведущим занятия по физическому практикуму. Кроме того, студенты имеют доступ в компьютерный класс каждый день во второй половине дня. Это важно для тех, у кого нет своих компьютеров, для тех, кто желает досрочно выполнить свои работы, и для тех, кто по каким-то причинам отстаёт от графика.

Реакция студентов

В основном, студентами дисциплина «Физический практикум» постигается заинтересованно. Несмотря на повышенные по сравнению с общей физикой требования, виртуальные лабораторные работы подкупают интерес студентов тем, что они отчасти подобны компьютерным играм, которые увлекают современную молодёжь.

Очень привлекательна для студентов возможность досрочно выполнить программу работ, некоторым это удается уже в середине семестра.

Спектр лабораторных работ достаточно широк, так что каждый студент может выбрать себе те работы, которые ему по вкусу: или больше соответствуют его знаниям, или увлекают своей простотой, или, напротив, притягивают своей многогранностью и богатством научных идей.

Своим конкретным опытом выполнения

виртуальных лабораторных работ в курсе физического практикума четверо студентов специальности «Атомные станции» поделились весной 2019 года на 25-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных [3, 4, 5]. Это были самые молодые участники конференции, несмотря на это их доклады вызвали заметный интерес аудитории.

Заключение

Дисциплина «Физический практикум» очень полезна для развития профессиональных качеств будущих атомщиков. Во-первых, она учит их грамотно планировать и проводить экспериментальные исследования. Во-вторых, учит, как надо обрабатывать результаты экспериментов и как эффективно помогает этому EXCEL. В-третьих, студенты получают первый серьёзный опыт оформления научно-технических отчётов, который будет им очень полезен в их профессиональной деятельности.

Многие элементы технологии преподавания дисциплины «Физический практикум» могут быть внедрены в курс общей физики для студентов неатомных специальностей. Это, например, проведение лабораторных работ не за 2, а за 4 академических часа и применение EXCEL.

Список литературы

1. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина – Главная редакция физико-математической литературы: Изд-во «Наука», 1973.
2. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2007.
3. Дюло В.Д. Особенности организации и выполнения виртуальных лабораторных работ по физике / Материалы Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым) ВНКСФ-25 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Крым: Изд-во АСФ России, 2019.
4. Печёнкин А.И., Тарасов Д.Д. Гидродинамика в лабораторном практикуме по физике / Материалы Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым) ВНКСФ-25 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Крым: Изд-во АСФ России, 2019.
5. Слива С.А. Экспериментальные исследования работы силы трения на криволинейной траектории. / Материалы Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым) ВНКСФ-25 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Крым: Изд-во АСФ России, 2019.

References

1. Guide to laboratory classes in physics. Ed. by L. L. Goldin-Main editorial office of physical and mathematical literature: Nauka publishing House, 1973.
2. Revinskaya O. G., Kravchenko N. S. Laboratory workshop on the study of models of physical processes on a computer. - Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2007.
3. Dula V. D. peculiarities of organization and implementation of virtual laboratory works in physics / Materials of the Twenty-fifth all-Russian scientific conference of students of physics and young scientists (VNKSF-25, Crimea) VNKSF-25-Yekaterinburg-Rostov-on-don-Crimea: publishing house of the Russian Academy of Sciences, 2019.
4. Pechenkin A. I., Tarasov D. D. Hydrodynamics in a laboratory practice in physics / Materials of the Twenty-fifth all-Russian scientific conference of students of physics and young scientists (VNKSF-25, Crimea) VNKSF-25 – Yekaterinburg – Rostov-on-don – Crimea: publishing house of the Russian Academy of Sciences, 2019.
5. Sliva S. A. Experimental studies of the work of the friction force on a curved trajectory. / Proceedings of the Twenty-fifth all-Russian scientific conference of students of physics and young scientists (VNKSF-25, Crimea) VNKSF-25 – Yekaterinburg – Rostov-on-don – Crimea: publishing house of the Russian Academy of Sciences, 2019.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам

М.К. Авакян[1], М.Д Перышкин[2], Е.Г.Какушина[3], Т.В.Решетникова[4], А.В.Соломоненко[5]

Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ, ул. Шполянской ул., 11, г.Симферополь,295000, Россия,
Avakyan-MK@tavrida.so-ups.ru[1], PeryshkinMD@tavrida.so-ups.ru [2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [3]littie@mail.ru, [4]reshetnikova.t@tdtime.ru, [5] solomonenco@mail.ru

Статья поступила 19.11.2020 г.; после доработки 23.11.2020 г.

Аннотация

В статье представлена современные методы оптимизации и их возможное применение для оптимизации режимов электроэнергетической сети.

Ключевые слова: оптимизация, электроэнергетические системы, метод PSO.

Methods for solving global conditional optimization in relation to energy systems

M. K. Avakian[1], M. D Peryshkin[2], E. G. Kakushina[3], T. V. Reshetnikov[4], A.V. Solomonenko [5]

Branch of JSC«SO UPS», JSC Chernomorskoye RDU,
11 Shpolyanskaya st., Simferopol, 295000, Russia.
Avakyan-MK@tavrida.so-ups.ru[1], PeryshkinMD@tavrida.so-ups.ru[2]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[3]littie@mail.ru, [4]reshetnikova.t@tdtime.ru, [5]solomonenco@mail.ru

Received 19.11.2020 y.; received in final form 23.11.2020 y.

Abstract

The paper considers modern optimization methods and their possible application for optimizing the modes of the electric power network.

Keywords: optimization, electric power system, method particle swarm optimization.

Введение

В связи с развитием технологических систем, усложняются задачи управления и повышаются требования к эффективности их решения, что в свою очередь приводит к необходимости решения оптимизационных задач с помощью эффективных математических методов оптимизации, используя современные ресурсы вычислительной техники.

Энергосистема Республики Крым и г. Севастополя является уникальной с точки зрения структуры установленной мощности [11]. Генерируются различные сценарии энергоснабжения Крыма, в том числе пиковые и средние режимы энергопотребления с различными вариантами солнечной активности, сезонные, включающие и

исключающие строящиеся источники энергии, а также межсезонный ремонт источников питания [10].

Решение оптимизационных задач проектирования и управления техническими системами необходимо для повышения технических и экономических показателей эффективности систем от отдельных устройств до глобальных систем. Особенно влияние оптимального распределения заметно в таких крупных технологических системах, как энергосистема всей страны, где изменения параметров одного отдельного элемента, оказывает влияние на всю энергосистему в целом.

Реализация инновационных проектов в области энергетики требует первоначальных значительных затрат [9].

Трудоемкость задач оптимизации, в связи с вышеупомянутым развитием и увеличением элементов технологической системы, увеличивается экспоненциально, в следствии чего увеличивается и время, затрачиваемое на решение поставленной задачи [12]. Что неприемлемо учитывая, что многие задачи необходимо решать в реальном времени.

Постановка задачи

Обзор существующих методов оптимизации и поиск возможного приложения в сфере электроэнергетики.

Описание исследования

Методы решения задач безусловной многомерной оптимизации можно разделить на две большие группы [10,11]:

- методы сведения задачи глобальной условной оптимизации к задаче глобальной безусловной оптимизации с помощью штрафных или барьерных функций;
- методы, специально сконструированные для решения задачи глобальной условной оптимизации.

Методы решения задачи глобальной безусловной оптимизации можно разделить на детерминированные, стохастические и эвристические [1].

В последнее время на практике набирают популярность эвристические методы оптимизации.

Рассмотрим канонический вид метода роя частиц (particle swarm optimization – PSO):

Пусть необходимо найти минимум функции $f(\mathrm{X})$, где X – вектор изменяемых параметров системы, которые ограничены областью допустимых значений D. Тогда каждая частица в каждый момент времени характеризуется значением X из области допустимых значений D и значением функции $f(\mathrm{X})$.

Множество частиц обозначим $\mathbf{P} = \{P, i \in [1{:}\,N]\}$, где N – количество частиц в рое. Для t-ой итерации вычисляются новые координаты частицы X_{it} и ее скорость $V_{it+1.}$

Рассмотрим возможное применение PSO в задаче оптимизации режима энергосистемы.

Пусть в энергосистеме n – количество трансформаторов, которые могут принимать значение k – анцапф трансформаторов. Тогда каждая частица, в каждый момент времени имеет координату$X_{it} = [k_1, k_2 \ldots k_n]^{-1}$.

Далее производится расчет установившегося режима. Целевая функция (фитнес-функция) $f(\mathrm{X})$ принимает значения потерь активной мощность. Координата с лучшими значениями фитнес-функции (минимальными потерями активной мощности) среди всех частиц записывается в M, а координата, соответствующая лучшей позиции для i – ой частицы записывается в X_{ij}^{best}.

Подробное применение данного метода для решения задачи оптимизации применительно к энергосистемам рассматривались в работах [2, 3]. В данной работе предлагается рассмотреть возможные модификации PSO. В большинстве случаев модификация касается расчёта скорости частицы.

Канонический вид расчета скорости частицы выглядит следующим образом:

$$V_{ij+1} = V_{ij}\omega + \alpha_1(\mathrm{X}_{ij}^{best} - X_{ij})rnd_1 + \\ +\alpha_2(M - X_{ij})rnd_2 \qquad (1)$$

Коэффициенты α1, α2 – характеризуют влияние остальных частиц, а коэффициент ω характеризует инертность частицы.

Метод роя частиц, основанный на отношении «значение – расстояние» FDR PSO (fitness-distance ratio based PSO), предложенный в работе [5], отличается от канонического учетом влияния соседних частиц, путем добавления в формулу (1) еще одного слагаемого $\alpha_3 rnd_3(X_q - X_{ij})$, где X_q вектор координат некоторой частицы определяемой как:

-Частица является соседней к i – ой

-Частице соответствует лучшее значении

целевой $f(X)$ функции среди соседних частиц.

Развитие идеи о соседстве двух частиц, родила новые идеи для модификации PSO. Так как, топология соседства частиц значительно характеризуют эффективность PSO следующим этапом модификация стало использование графов для определения связи между соседними частицами. На практике чаще всего используют несколько видов топологий [4]:

- полносвязный граф
- кольцо
- двумерный тор
- кластерная топология

В полносвязном графе соседями каждой частицы являются остальные частицы. А для графа «кольцо», соседними являются две частицы.

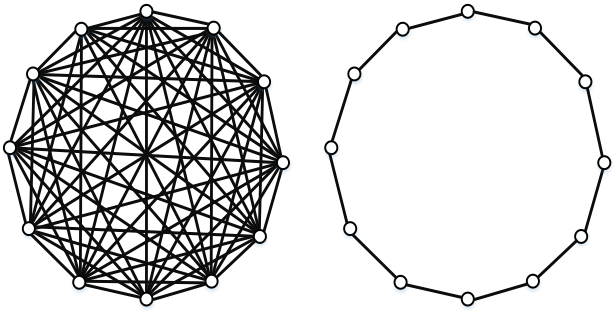


Рис. 1. Топологии соседства полносвязный граф и кольцо.

Диаметр графа, топологии соседства частиц, определяет скорость распространения информации в рое. Эффективность метода PSO в значительной степени зависит от размера популяции N.

Эта зависимость может иметь различный характер для различных топологий соседства частиц. Для топологии «клика» и большого размера популяции канонический метод PSO может привести к ранней сходимости. В тех же условиях в методе FIPS большая популяция может охватывать несколько локальных минимумов целевой функции, и значительное количество частиц могут колебаться между этими минимумами. Такие же колебания частиц возможны и в каноническом методе PSO.

Топология «кольцо» более устойчива к большому размеру популяции, так как среди рассмотренных топологий является наименее связной и обеспечивает самую низкую скорость передачи информации. С точки зрения эффективности метода PSO при больших популяциях в качестве универсальной топологии рекомендуется использовать топологию «двумерный тор», которая обеспечивает достаточно высокую эффективность любого из рассмотренных методов [6].

Дальнейшее развитие методов PSO и методов их вариаций отсылают к теориям графов и исключению изоморфных вариантов [7].

Выводы

Развитие методов оптимизации раскрывают большое пространство для использования различных отраслей математики в управлении технологическими системами.

Относительная простота данных методов позволяет выполнять расчеты на программных комплексах, специализирующихся для расчетов электроэнергетического режима, таких как ПК «RastrWin» не привлекая к внешним программам.

Всех этих проблем можно избежать, если заранее чётко планировать скоординированное размещение новых мощностей в регионах [12].

Список литературы

1. Вайзе Т. Алгоритмы глобальной оптимизациитеория и применение // Кандидатская диссертация. - Кассельский университет, 2008.
2. П.В. Материн. Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами //Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. -Томск – 2018.
3. М.К. Авакян. Оптимизация режима питающей сети по напряжению, реактивной мощности и коэффициентам трансформации //Юго-Западный государственный университет - 2015.
4. К. Веерамачанени. Оптимизация с использованием роя частиц с ближними соседними взаимодействиями / Т. Перам, Ч. Мохан, Л. А. Осадчий// Конспект лекций по информатике. - Springer Verlag, 2003.
5. Дж. Кеннеди, Р. Мендес. Структура популяции и производительность роя частиц // Труды Конгресса эволюционных вычислений 2002 года. - Вашингтон, компьютерного общества IEEE, С. 1671 – 1676.
6. Свирщева Э.А. Структурный синтез неизоморфных систем с однородными компонентами / Э.А. Свирщева // – Х.: ХТУРЭ, 1998. – 256 с.
7. Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики /Мышкис А.Д.// 3-е изд., перераб и доп. – М.: Наука, Глав. ред. физ-мат. лит., 1972. 592 с.
8. Д.А Арзамасцев. Модели оптимизации развития энергосистем /Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин// Учеб. Для электроэнергет. спец. вузов под ред. Д.А. Арзамасцева – М.: Высш.шк., 1987 – 272 с.: ил.
9. Какушина Е.Г. Технико-экономические аспекты

развития автономных солнечных энергетических систем /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Соломенникова С.И.//Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 4. С. 55-60.
10. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
11. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
12. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А.//Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.

References

1. Weise T. global optimization Algorithms-theory and application // PhD dissertation. - Kassel University, 2008.
2. P. V. Materin. Development of adaptive algorithms for swarm intelligence in the design and management of technical systems //Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical Sciences. - Tomsk-2018.
3. M. K. Avakian. Optimization of the supply network mode by voltage, reactive power, and transformation coefficients // Southwestern state University-2015.
4. K. Veeramachaneni. Optimization using a swarm of particles with near-neighboring interactions / T. Peram, CH. Mohan, L. A. Osadchiy// Summary of lectures on computer science. - Springer Verlag, 2003.
5. J. Kennedy, R. Mendes. Population structure and particle swarm productivity // Proceedings of the 2002 Congress of evolutionary computing. - Washington, IEEE computer society, pp. 1671-1676.
6. Svirshcheva E. A. Structural synthesis of non-isomorphic systems with homogeneous components / E. A. Svirshcheva// - Kh.: KhTURE, 1998. - 256 p.
7. Zeldovich Ya. b. Elements of applied mathematics /Myshkis A.D. // 3rd ed., pererab and additional-M.: Nauka, Glav. ed. Fiz-Mat. lit., 1972. 592 p.
8. D. A Arzamassev. Models for optimizing the development of power systems /D. A. Arzamastsev, A.V. Lipes, A. L. Myzin// Studies'. For electric utilities. spec. vuzov ed. D. A. Arzamastsev-M.: Higher school, 1987-272 p.: Il.
9. Kakushina E. G. Technical and economic aspects of the development of Autonomous solar energy systems / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Kuznetsov P. N., Solomennikova S. I. // Power installations and technologies. 2018. Vol. 4. No. 4. pp. 55-60.
10. Vologdin S. V. Analysis of various scenarios of energy supply to the Crimea, taking into account the modes of operation of a solar power plant / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Abdali L. M., Kakushina, E. G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 229-234
11. Guryev V. V. Development of renewable energy sources in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kakushina E. G., Yakimonovich B. A., Kuvshinov V. V. // Power installations and technologies-2019. Vol. 5. No. 2. pp. 90-93.
12. Zaichenko V. M. Directions of energy development /Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Makushina E. G., Badulin S. A.//Energy and technology. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-619.

УДК 620.92

Применение ГИС-технологий для увеличения эффективности использования гидроэнергетических установок малой мощности

А.Е. Баравлёва[1], Л.В Толстихина[2], В.В. Кувшинов[3], Е.Г. Какушина[4], С.И Соломенникова[5]

ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный университет» Саяно-Шушенский филиал СФУ, Саяногорск, 655619, Россия
[1]Baravleva1@mail.ru, [2]Tolstihina@mail.ru
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия,[3]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [4]littie@mail.ru,
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»
ул. Студенческая,7, г. Ижевск, 426069, Россия
[5]S_Solomennikova@mail.ru

Статья поступила 27.10.2020 г.; после доработки 29.10.2020 г.

Аннотация

В данной работе предложено использование противопаводковых сооружений для установки гидроэнергетических установок малой мощности с целью выработки электрической энергии. В работе также рассматриваются методы снижения частотности паводков путем управления стоком бассейна реки с помощью системы противопаводковых гидросистем.

Ключевые слова: Ливневые паводки, моделирование в среде ГИС, географическая информационная поддержка, пространственный анализ.

Application of HYS-technologies for the selection of flood control hydraulic systems, taking into account the minimum environmental impact

A.E. Baravleva[1], L.V. Tolstikhina[2], V.V. Kuvshinov[3], E.G. Kakushina[4], S.I.Solomennikova[5]

The Sayano-Shushenskiy branch of the Siberian Federal University, Sayanogorsk, 655619, Russia
[1]Baravleva1@mail.ru, [2]Tolstihina@mail.ru
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [3]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [4]littie@mail.ru,
Izhevsk state technical University named after M. T. Kalashnikov,3 Studencheskaya str., Izhevsk, 426069, Russia
[5]S_Solomennikova@mail.ru

Received 27.10.2020 y.; received in final form 29.10.2020 y.

Abstract

In this paper, the use of flood control structures for the installation of low-power hydropower plants for the purpose of generating electric energy is proposed. The paper also discusses methods for reducing the frequency of floods by controlling the flow of the river basin using a system of flood control hydraulic systems.

Keywords: Flash floods, modeling in GIS environment, geographic information support, spatial analysis.

Введение

Развитие малой и большой гидроэнергетики в Российской Федерации неразрывно связано с модернизацией гидротехнических сооружений и увеличения объёмов напорных водохранилищ для эффективной работы гидроэлектрических установок (ГЭУ). Альтернативная малая гидроэнергетика представлена гидроустановками

мощностью не более 10-20 МВт. Для таких ГЭУ необязательно строить крупные напорные водохранилища и высокие плотинные сооружения. ГЭУ малой мощности можно устанавливать на небольших водохранилищах, речных затоках, гидросооружения для сточных вод и др. Т.е. для альтернативной гидроэнергетики можно использовать различные гидротехнические объекты, на которых ГЭУ могут преобразовывать энергию водного потока с целью получения электричества.

Совмещение противопаводковых сооружений с объектами малой гидроэнергетики способствует внедрению комплексов на основе альтернативных источников энергии, позволяет сократить использование традиционных энергоресурсов, в результате сокращается негативное влияние на окружающую среду, что способствует улучшению экологии.

Освоение речных пойм для нужд малой гидроэнергетики не до конца исследованная проблема. В частности, проблемой гидротехники является защита населенных пунктов от наводнений. Это очень серьезная проблема, сдерживающая освоение территорий речных пойм. Наводнение оказывает значительное воздействие на деятельность человека [1]. Оно может угрожать жизни людей, их собственности и окружающей среде.

Изменение демографической ситуации (т.е. рост урбанизации) также приведет к тому, что более широкие слои населения будут подвержены внезапным наводнениям [2].

Одним из самых опасных видов наводнений является паводок, который чаще всего на территории России возникает из-за выпадения обильных осадков. Особенно тяжелые последствия вызывают ливневые наводнения. Проблема ливневых паводковых наводнений существует в районах с муссонным климатом, характерным для Дальнего Востока России.

В современной России особое внимание уделяется электроэнергетическому комплексу [6]. В последние годы структура мировой энергетики претерпевает значительные изменения [7, 8]. Концепция децентрализованных противопаводковых мероприятий основывается на идее локализации и использования возможностей верхнего бьефа затопленного водосбора для замедления стока как можно раньше и в нескольких местах одновременно с помощью противопаводковых бассейнов с минимальным воздействием на окружающую среду [3].

Для снижения последствий паводков рассматривается регулирование речного стока системой противопаводковых плотин, на примере Дальнего Востока.

Постановка задачи

Задачей данной работы являлось изучение возможностей применения гидроэлектрических установок малой мощности на системах противопаводковых плотин.

Цель работы – разработка методики выбора створа гидроузла при помощи ГИС-технологий (ГИС-географическая информационная система) с учетом минимизации воздействия на окружающую среду.

Представим некоторые типы ГЭУ, применение которых возможно на небольших напорах и расходах, что вполне удовлетворяет нашим условиям.

На рис.1 изображена ГЭУ с вертикальным валом, используемая для малых электростанций. На рисунке 2 приведены два типа гидроустановок, которые также представляют турбины малой мощности.

На рис. 2, а, представлена радиально-осевая гидротурбина, а на рис. 2, б осевая турбина с горизонтальным валом. Все три типа турбин представляют классические ГЭУ, выпускаемые промышленность и хорошо зарекомендовавшие себя по надежности, при этом они отличаются простотой исполнения.

Все представленные турбины рассчитаны на малую мощность и могут использоваться на малых водостоках, при небольших напорах. Однако радиально-осевые турбины рассчитаны на более высокие напоры, чем осевые.

При этом для малых стоков авторы считают, что нужно брать турбину в горизонтсльным валом, для простоты установки её в подводящем трубопроводе на сточных водах.

Проведя анализ различных типов ГЭУ, авторы считают, что более целесообразно за основу выбрать турбину, изображенную на рис. 2, б, при этом незначительно упростив конструкцию (рис. 3).

По расчетам, осевая турбина, предложенная на рис. 3, имеет хорошую эффективность (КПД рабочего колеса около 85 %), достаточную мощность для паводковых стоков и может быть использована для обеспечения индивидуального потребителя в удаленных районах.

Применение турбины ограничено объёмом стоков, которые можно использовать для преобразования энергии водного потока в электричество.

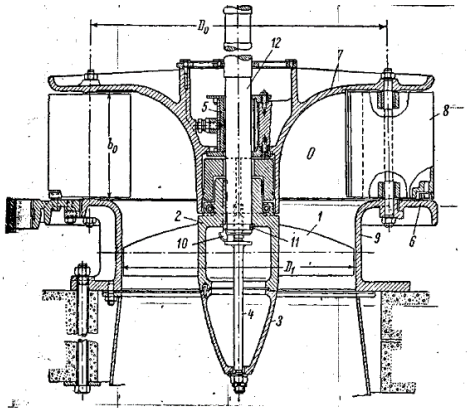


Рис. 1. Вертикальная пропеллерная турбина малой мощности: 1 – лопасть колеса; 2 – втулка; 3 – обтекатель; 4 – шпилька; 5 – подшипник с деревянными вкладышами; 6 – регулировочное кольцо; 7 – крышка турбины; 8 – направляющая лопатка; 9 – поддон; 10 – шпонка; 11 – закладное кольцо; 12 – вал.

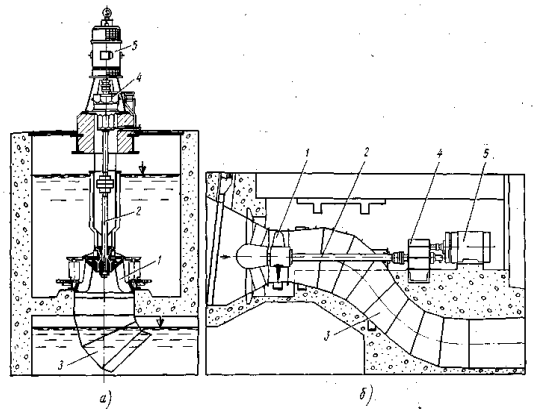


Рис. 2. Малые ГЭУ радиально-осеовгого (а) и осевого типа: 1 — рабочее колесо; 2 — вал турбины; 3 — отсасывающая труба; 4 — шестеренчатая передача; 5 — генератор.

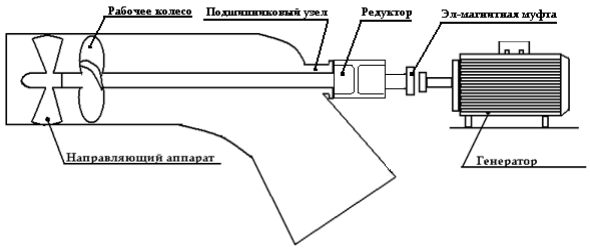


Рис. 3. ГЭУ осевого типа малой мощности для автономного потребителя

Методология

Рассчитаем объем воды, который затапливает территории при ливневых наводнения.

Определим избыточный сток. Для этого необходимо перенести площадь затопления в программу GoogleEarthPro. Используя инструменты «Наложение» и «Многоугольник», строим зеркало затапливаемой территории.

Опуская отметку через каждые 3 метра, находим площадь затопления на каждой отметке. Определим объемы каждого слоя между соседними горизонталями и получим полный объем паводковых вод (таблица 1).

Таблица 1. *Параметры зоны затопления*

Площадь затопления, км^2	8 000 000
Объем паводкового стока, км^3	24 000

На данном этапе выбор возможных створов гидроузлов производиться не только на территории РФ, но и на территории Китая, так как главная приточность паводковых вод вызвана водосбросными бассейнами рек Суйбинь, Селемжа, расположенных на китайской территории, которые несут весомый объем воды в Амурскую область.

Устанавливаются критерии, по которым будет определяться соответствие факторов [5], влияющих на выбор створа. Все критерии целесообразно разделить на первичные и вторичные.

Под первичными подразумеваются критерии, у которых выбрано граничное значение: объем водохранилища, затопление земель, инженерно-геологические условия и т.д. [4].

После отбора по первичным критериям, можно приступить к сравнительной оценке оставшихся вариантов при помощи вторичных критериев: близость к ЛЭП, автодорогам, населенным пунктам и т.д. В качестве рабочей среды используется программа GoogleEarthPro. Объем водохранилища для каждого створа необходима рассчитать тем же методом, что описан в первом шаге. Полученные данные сведены в таблице 2.

В результате анализа, проведенного в предложенной статье, можно утверждать, что:

– Использование ГИС-технологий для выбора створов МГЭС позволяет получить результаты предпроектного характера;
– Предложенный метод позволяет определить факторы, критерии и построить цифровую модель рельефа;
– Рассчитанные параметры возможных створов с использованием ГИС для реки Амур. позволяют.

В результате концепция децентрализованных противопаводковых мероприятий основана на

идее локализации и использования возможностей верхнего бьефа затопленного водосбора для замедления стока как можно раньше и в нескольких местах одновременно с помощью противопаводковых бассейнов с минимальным воздействием на окружающую среду.

Таблица 2. *Параметры створов*

Номер ствола	1	2	3	4	5
Площадь затопления, км^2	48	53	42	37	44
Объем водохранилища, км^3	8,3	8,6	7,1	13,5	11,2
Расстояние до ЛЭП	33,5	37,8	40,3	31,8	39,4
Расстояние до дороги	43,1	34,5	42,6	43,4	37,3

Выводы

Согласно исследованиям, проведенным в предложенной работе, можно сделать основные выводы:

1. Предложенные ГИС-технологии позволяют значительно увеличить наполняемость напорных водохранилищ для малой гидроэнергетики сточными водами, что значительно способствует развитию альтернативных источников энергии.
2. Альтернативная малая гидроэнергетика недостаточно развита в Российской Федерации, что негативно сказывается на энергоснабжении автономных потребителей.
3. Гидроустановки мощностью не более 10-20 МВт не требуют для работы крупных гидротехнических комплексов, могут устанавливаться на малых реках и для них не обязательно строительство зданий гидростанций.
4. ГЭУ малой мощности можно устанавливать на небольших реках, канализационных стоках, малых водохранилищах, и др., при этом количество таких установок может исчислять сотнями практически для любых регионов.
5. Для малых ГЭУ совмещение противопаводковых сооружений с объектами малой гидроэнергетики способствует внедрению альтернативных энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии.
6. Использование противопаводковых сооружений для гидроэнергетики позволяет сократить использование органических топлив, сократить вредные выбросы в окружающую среду, улучшить региональную экологию.

Список литературы

1. Иванов Т.С. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС / Н.В. Баденко, В.А. Олешко // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №4(39). – С.70-82.
2. Митрофанов С.В. Разработка имитационной модели работы каскада ГЭС / Русина А.Г., Арестова А.Ю., Калинин А.Е.// Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – №2 (42). – С. 116-126.
3. Арфьев Н.В. Баденко В.Л.,Осипов Г.К.,Управление энерго-водохозяйственными системами на основе моделирования в среде ГИС.-Труды СПБГТУ №475,1998.с.42-47.
4. Федоров М.П. Снижение риска наводнений в речном бассейне регулированием паводков распределенными на водосборе гидроузлами /Масликов В.И.//Известия Российской Академии наук.Энергетика №4, 2013, – С.47-52.
5. Какушина Е.Г. Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Соломенникова С.И.//Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 4. С. 55-60.
6. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
7. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
8. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61

References

1. Ivanov T. S. Geoinformational methods for searching for promising structures for the construction of hydroelectric power plants / N. V. Badenko, V. A. Oleshko // Civil engineering magazine. – 2013. – №4(39). – P. 70-82.
2. Mitrofanov S. V. Development of a simulation model of the HPP cascade operation / Rusina A. G., Arestova A. Yu., Kalinin A. E.// Vestnik Ka-

zanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2019. – №2 (42). – P. 116-126.
3. Arfyev N. V., Badenko V. L., Osipov G. K., Management of energy and water management systems based on modeling in the GIS environment.- Proceedings of SPBSTU No. 475,1998. p. 42-47.
4. Fedorov M. P. Reducing the risk of flooding in the river basin by regulating floods distributed in the catchment area with hydro nodes /Maslikov V. I. / / proceedings of the Russian Academy of Sciences.Energetika No. 4, 2013, Pp. 47-52.
5. Kakushina E. G. Technical and economic aspects of the development of Autonomous solar energy systems / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Kuznetsov P. N., Solomennikova S. I. // Power installations and technologies. 2018. Vol. 4. No. 4. pp. 55-60.
6. Vologdin S. V. Analysis of various scenarios of energy supply to the Crimea, taking into account the modes of operation of a solar power plant / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Abdali L. M., Kakushina, E. G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 229-234
7. Guryev V. V. Development of renewable energy sources in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kakushina E. G., Yakimonovich B. A., Kuvshinov V. V. // Power installations and technologies-2019. Vol. 5. No. 2. pp. 90-93.
8. Zaichenko V. M. Directions of energy development /Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Makushina E. G., Badulin S. A.//Energy and technology. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-619.

УДК 620.92

Регулирующий эффект нагрузки по частоте. Влияние на структуру автоматической частотной разгрузки

И.С. Дьяченко[1], М.Д. Перышкин[2], Е.В. Новак[2], Б.О.Ленивенко[2] , Т.А.Львов[2]
[1]Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ, Шполянской ул., д. 11, г. Симферополь, 295000, Россия.
DiachenkoIS@tavrida.so-ups.ru,
[2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, PeryshkinMD@tavrida.so-ups.ru, 2LEV@bk.ru, lockstocks@yandex.ru, timlvov@gmail.com

Статья поступила 26.10.2020 г.; после доработки 28.10.2020 г.

Аннотация
В статье рассмотрено понятие регулирующего эффекта нагрузки по частоте, а также его влияние на характер протекания процесса снижения частоты, влияние на настройку устройств АЧР.

Ключевые слова: регулирующий эффект нагрузки по частоте, автоматическая частотная разгрузка.

The regulatory effect of the frequency load. Influence on the structure of the automatic frequency unloading

I.S. Dyachenko[1], M.D. Peryshkin[2], E.V. Novakov[2], B.O. Lenivenko[2], T.A.Lvov[2]
[1]Branch of «SO UPS», JSC, Regional Dispatching Office of Crimea Republic and Sevastopol Power System, Department of Electric Mode Calculation, 74/6, Kiyevskaya Str., Simferopol, 295034, Russian Federation,
DiachenkoIS@tavrida.so-ups.ru,
[2]FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,Sevastopol, 299053, Russia.
PeryshkinMD@tavrida.so-ups.ru, 2LEV@bk.ru, lockstocks@yandex.ru, timlvov@gmail.com

Received 26.10.2020 y.; received in final form 28.10.2020 y.

Abstract
The article discusses the concept of the regulatory effect of the load in frequency, as well as its influence on the nature of the process of reducing the frequency, its influence on the tuning of automatic frequency unloading devices.

Keywords: The regulatory effect of the frequency load, automatic frequency unloading.

Введение

Наиболее тяжелые последствия для энергосистемы происходят при системных авариях с возникновением большого дефицита генерируемой активной мощности и глубоким снижением частоты. При дефиците активной мощности в энергосистеме частота снижается до тех пор, пока снова не наступит равенство потребляемой и генерируемой мощностей. При длительной работе с пониженной частотой в процессе частотной аварии снижается скорость вращения генераторов, что приводит к снижению вырабатываемой ими мощности и их ЭДС. При этом может возникнуть явление лавины частоты, что, в свою очередь, приведет к полному погашению дефицитной части энергосистемы с остановом всех ее электростанций и длительным перерывом энергоснабжения потребителей, соответствующим времени подачи напряжения на шины отключенных электростанций и времени включения и синхронизации их с сетью (5 часов и более). Для предотвращения и ограничения последствий таких аварий применяется комплекс

автоматики ограничения снижения частоты (АОСЧ), а именно его основная составляющая – автоматическая частотная разгрузка (АЧР). Ее назначение – отключение части наименее ответственных потребителей при дефицитах активной мощности в энергосистеме с аварийными уровнями снижения частоты.

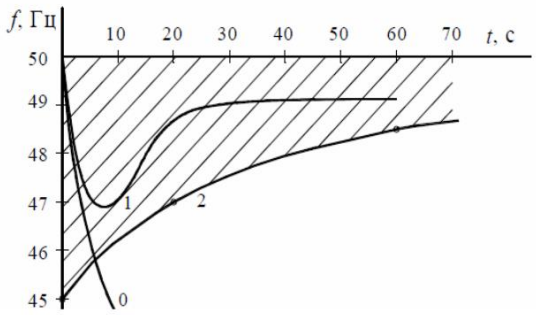


Рис.1. Отклонение частоты.
0 – без действия автоматики. 1 – после действия АЧР. 2 – граница допустимой зоны отклонения.

Постановка задачи:

В данной работе необходимо определить влияние характера нагрузки потребителей на протекание электроэнергетического режима при возникновении дефицитов генерирующих мощностей с целью применения указанной информации для настройки автоматической частотной разгрузки.

В силу отсутствия достаточной экспериментальной информации, необходимой для анализа структуры потребления и характера нагрузки, для корректного использования эффекта нагрузки по частоте в будущем необходимо разработать аналитический подход определения данной структуры и оценить его эффективность.

Описание исследования:

Для восстановления нормальной работы дефицитных энергоузлов (частей энергосистем), отделившихся от крупного энергообъединения, резервов мощности в них может оказаться недостаточно. Снижать частоту в энергообъединении для синхронизации с дефицитным энергоузлом нецелесообразно. В этих условиях вытекает требование к АЧР ряда дефицитных энергоузлов восстанавливать частоту до уровней синхронизации.

Глубина снижения частоты зависит не только от дефицита мощности в первый момент аварии, но и от характера нагрузки. Потребление мощности одной группой потребителей, к которой относятся электроосветительные приборы и другие установки, имеющие чисто активную нагрузку, не зависит от частоты и при ее снижении остается постоянным. Потребление же другой группы потребителей –электродвигателей переменного тока при уменьшении частоты снижается (у асинхронных электродвигателей при снижении частоты потребление уменьшается в большей степени относительно синхронных). Чем больше в энергосистеме доля нагрузки первой группы, тем больше понизится частота при возникновении одинакового дефицита активной мощности. Нагрузка потребителей второй группы будет в некоторой степени сглаживать эффект снижения частоты, поскольку одновременно будет уменьшаться потребление мощности электродвигателями.

С уменьшением частоты нагрузка потребителей системы уменьшается, а при повышении частоты увеличивается. Эти изменения уменьшают небаланс активных мощностей генерации и потребления (дефицит или избыток мощности генерации) и соответственно изменение частоты. Таким образом, сама нагрузка действует подобно автоматическому регулятору частоты. Это явление называется регулирующим эффектом нагрузки (РЭН) и оценивается коэффициентом регулирующего эффекта нагрузки по частоте.

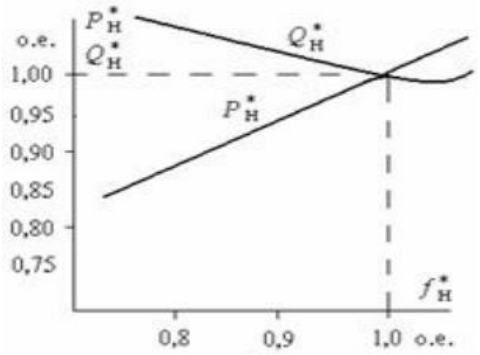


Рис.2. Типовая статическая характеристика нагрузки по частоте:

Где
fн – номинальная частота.
Pн – номинальная активная нагрузка узла.
Qн – номинальная реактивная нагрузка узла.
Коэффициент регулирующего эффекта нагрузки показывает, на сколько процентов уменьшается потребление нагрузки активной мощности на каждый процент снижения частоты. Значение коэффициента регулирующего эффекта

нагрузки определяется по формуле.

$$k = \Delta P\% / \Delta f\%$$

Где
ΔР% – изменение потребления в процентах.
Δ F% – изменение частоты в процентах.
При этом чем выше регулирующий эффект нагрузки, тем меньше отклонение частоты от номинального значения.
Более подробно механизмы и агрегаты потребителей по степени их зависимости от частоты делятся на пять групп:
1. Лампы накаливания, нагревательные приборы и выпрямительные установки, мощность нагрузки которых практически не зависит от частоты.
2. Металлорежущие станки, мельницы, поршневые насосы и компрессоры, мощность нагрузки которых от частоты приблизительно в первой степени.
3. Потери в сетях и специальные установки, мощность нагрузки которых зависит от частоты приблизительно во второй степени.
4. Центробежные насосы и вентиляторы при статическом напоре, мощность нагрузки которых пропорциональна частоте в третьей степени.
5. Насосы с большим сопротивлением статического напора (например, питательные насосы электростанций), мощность нагрузки которых зависит от частоты в более высокой степени.

Для того чтобы выявить требования к АЧР с точки зрения потребителей, необходимо проанализировать прежде всего статические характеристики нагрузки энергосистемы по частоте, т.е. зависимости мощности, потребляемой нагрузкой, от частоты в энергосистеме.

Снижение частоты в энергосистеме приводит, как правило, к одновременному снижению напряжения в узлах нагрузки, что, с одной стороны, может существенно влиять на статические характеристики нагрузки по частоте и, с другой стороны, в наиболее неблагоприятных случаях может приводить к массовым отключениям потребителей. Для анализа реакции энергосистемы на возникновение дефицита мощности особый интерес представляет статическая характеристика энергосистемы (энергообъединения) по частоте в целом, т. е. зависимость суммарной нагрузки энергосистемы от частоты.
Так как снижения частоты до предельно допустимых значений очень опасное явление - тем неменее достаточно редкое явление. Анализ структуры комплексной нагрузки можно проводить следующими способами:
1. Эксперементальный - на основе фактических отклонений при частотных авариях и последующией экстраполяции.
2. Аналитический. Так как уровни напряжения возможно варьировать в гораздо больших отклонениях чем уровни частоты, в том числе локализировав отклонения. Анализ характера изменения комплексной нагрузки по напряжению позволяет приближенно составить структуру электроприемников комплексной нагрузки, и, как следствие, определить её частотные характеристики.

Рассмотрим влияние коэффициенте регулирующего эффекта нагрузки на уровень частоты. В качестве допущения примем, что все нагрузочные узлы относятся к одной группе потребителей (третьей). В результате аварийного отключение генератора мощностью 8 МВт (ΔР%) в изолированной энергосистеме необходимо определить расчетное значение частоты (Fрасч) без учёта действия регуляторов скорости оставшегося в работе генерирующего оборудования. Нагрузка энергосистемы (Рнаг) составляет 100 МВт. Известно, что в указанной энергосистеме коэффициент регулирующего эффекта нагрузки (k) равен 2.

Уровень частоты (fрасч) в послеаварийном режиме, составит:

$$\Delta f\% = \Delta P\%/k$$

$$\Delta f\% = 8/2 = 4$$

$$f_{расч} = f_{ном} - (f_{ном} * \Delta f\%/100)$$

$$f_{расч} = 50 - (50*0{,}04) = 48{,}0 \text{ Гц}.$$

В данной ситуации при коэффициенте регулирующего эффекта нагрузки, равном 2, на каждые 2 МВт дефицита активной мощности приходится снижение частоты на 0,5 Гц.

Очевидно, что при большем коэффициенте регулирующего эффекта нагрузки аналогичная величина аварийного дефицита генерирующей мощности приведет к меньшему отклонению частоты или больший объём отключения генерирующей мощности приведет к снижению частоты до аналогичного уровня.

Например, в энергосистеме с течением времени стала преобладать двигательная нагрузка, кто привело к увеличению коэффициента регулирующего эффекта нагрузки (k). Предположим, он стал равен 4.
Уровень частоты (fрасч) в послеаварийном режиме, составит:

$\Delta f\% = 8/4 = 2$

$f_{расч} = 50 – (50*0,02) = 49,0$ Гц.

Данное обстоятельство применимо при определении объёмов нагрузки, подключенной под действие АЧР.

Заключение:

При исследовании данного вопроса было рассмотрено влияние характера нагрузки потребителей на протекание электроэнергетического режима при возникновении дефицитов генерирующих мощностей.

Регулирующий эффект нагрузки оказывает существенное влияние на значение частоты в послеаварийном установившемся режиме работы.

Корректный учёт характера нагрузки энергосистемы позволит осуществлять наиболее оптимальную настройку АЧР, выбор необходимого объёма нагрузки, подключенной под воздействие конкретных ступеней указанной автоматики, не допуская эффекта перерегулирования или недорегулирования при аварийном снижении частоты.

Список литературы

1. Рабинович Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. М. Энергия, 1980.
2. Павлов Г.М. Автоматизация энергетических систем. ЛГУ, 1977.
3. Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. Энергоатомиздат, 1988.
4. Энергетические установки и технологии / Севастополь: Сев ГУ. – 2019. Т. 5. № 1. С. 75-80.
5. Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 2. С. 61-66.

References:

1. Rabinovich R.S. Automatic frequency unloading. M. Energy, 1980.
2. Pavlov G.M. Automation of energy systems. LGU, 1977.
3. Sovalov S.A., Semenov V.A. Emergency management in rhe energy system. Energoatomizdat, 1988.
4. Power plants and technologies / Sevastopol: Sev GU. - 2019.Vol. 5.No. 1.P. 75-80
5. Power plants and technologies. 2017.Vol. 3.No. 2.P. 61-66.

УДК 620.92

Оценка динамики снижения мощности источников нетрадиционной и возобновляемой электроэнергии (СЭС, ВЭС, далее – ВИЭ). Использование величины снижения мощности ВИЭ в качестве нормативного возмущения

И.Г. Лосева[1], М.Д. Перышкин[2], Е.Г.Какушина[3], Т.В.Решетникова[4], В.В.Небесный[5]

Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ, ул. Шполянской ул., 11, г.Симферополь,295000, Россия, LosevaIG@tavrida.so-ups.ru[1], PeryshkinMD@tavrida.so-ups.ru [2]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [3]littie@mail.ru, [4]reshetnikova.t@tdtime.ru, [5]nebesnyy7171@mail.ru,

Статья поступила 16.11.2020 г.; после доработки 18.11.2020 г.

Аннотация

Возобновляемые источники энергии обладают свойством неравномерности выработки электроэнергии, а также сложностью с планированием периодов генерации. Снижение мощности ВИЭ вследствие изменения погодных условий требует обязательного учета при управлении электроэнергетическим режимом.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, расчетный небаланс ВИЭ, изменение нагрузки ВИЭ при изменении погодных условий.

Assessment of the dynamics of reducing the power of alternative and renewable energy sources (solar power plants, wind farms, hereinafter - renewable energy sources). Using the value of RES power reduction as a normative disturbance

I.G. Loseva[1], M. D Peryshkin[2], E. G. Kakushina[3], T. V. Reshetnikov[4], V.V. Nebesny[5]

Branch of JSC«SO UPS», JSC Chernomorskoye RDU, 11 Shpolyanskaya st., Simferopol, 295000, Russia. Avakyan-MK@tavrida.so-ups.ru[1], PeryshkinMD@tavrida.so-ups.ru[2]

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. [3]littie@mail.ru, [4]reshetnikova.t@tdtime.ru, [5]nebesnyy7171@mail.ru,

Received 16.11.2020 y.; received in final form 18.11.2020 y.

Abstract

Renewable energy sources have the property of uneven generation of electricity, as well as the difficulty in planning periods of generation. Reducing the power of renewable energy due to weather conditions requires mandatory consideration when managing the electric power mode/.

Keywords: renewable energy, estimated unbalance of renewable energy sources, change in the load of renewable energy sources with changing weather conditions

Введение

Развитые страны мира ведут интенсивный поиск альтернатив органическому топливу, одной из которых является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Объем энергии, производимый в них с помощью ВИЭ

[5]., в настоящее время уже превысил 10 % от общего объема энергопотребления.

В России наряду со значительными запасами ископаемого органического топлива имеются большие запасы возобновляемых топливных ресурсов и источников энергии (геотермальной, солнечной, ветровой, океанической, энергия биомассы и др.

Во время перебоев с энергоснабжением в 2015-2016 годах работоспособность энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя удавалось поддержать во многом благодаря работе возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) [6]. В России каждый год вводятся новые СЭС, так, например, в 2021 году в Крыму должны открыть новую солнечную электростанцию в посёлке Владиславовка в Кировском районе мощностью 110 МВт. Именно на данном этапе развития вызовы носят «высокотехнологический» и «менее интуитивный» характер, где требуется еще большая гибкость системы, её способность к самовосстановлению после резких и объемных колебаний выработки [7].

Экономический потенциал ВИЭ постоянно увеличивается в связи с непрерывным удорожанием традиционного органического топлива и сопутствующими его применению проблемами загрязнения окружающей среды.

Лидирующие позиции будет занимать фотоэлектрическая солнечная энергия, за которой будут следовать энергия ветра, гидро - и биоэнергия. Реализация инновационных проектов в области энергетики требует первоначальных значительных затрат [2]. В последние годы активно развивается направление проектирования автономных ветро-солнечных энергетических установок для решения различных задач: это и электроснабжение индивидуальных жилых домов, обеспечение электроэнергией установок для полива
овощных и фруктовых культур, световых дизайнерских решений в парковых зонах и др [8].

Энергосистема Республики Крым и г. Севастополя является уникальной с точки зрения структуры установленной мощности [3]. Генерируются различные сценарии энергоснабжения Крыма, в том числе пиковые и средние режимы энергопотребления с различными вариантами солнечной активности, сезонные, включающие и исключающие строящиеся источники энергии, а также межсезонный ремонт источников питания [4].

По состоянию на 01 мая 2020 года, в Единой энергосистеме России установленная мощность СЭС составляет 1487,72 МВт, ВЭС – 531,71 МВт, что составляет 0,6% и 0,21% от общей мощности электростанций ЕЭС России.

Большинство солнечных и ветровых электростанций эксплуатируется в объединённой энергосистеме (ОЭС) Юга – 1208 МВт. В ОЭС Урала работают СЭС и ВЭС (далее – ВИЭ) общей мощностью 375МВт, в ОЭС Средней Волги – 205 МВт, в ОЭС Сибири — 225МВт, в ОЭС Северо-Запада – 5МВт.

За период 2020-2023 гг. в ОЭС Юга планируется ввод ВИЭ установленной мощностью 5156 МВт.

Анализ проблемы и постановка задачи

ВИЭ обладают свойством неравномерности выработки электроэнергии, зависящей от специфических местных погодных условий (скорость и направление ветра, облачность, активность солнечного излучения и др.), а также сложностью с планированием периодов генерации.

С учетом объемов планируемых вводов ВИЭ в ОЭС Юга увеличивается риск возникновения возможных аварийных небалансов активной мощности, вызванных сбросом мощности ВИЭ, превышающих учитываемые в настоящее время аварийные небалансы при планировании и управлении электроэнергетическим режимом в контролируемых сечениях.

В соответствии с Требованиями к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем», утвержденными приказом Минэнерго России от 03.08.2018 №630[1] одной из важных задач обеспечения надежности является необходимость учета нормативных возмущений, связанных со снижением активной мощности ВИЭ при изменении погодных условий на стадии управления и планирования электроэнергетических режимов [1].

В настоящее время величина аварийного небаланса активной мощности, определяется потерей мощности в энергосистеме при отключении ПГУ, Блока ТЭС или АЭС, систем шин станций и т.д.

В целях определения максимально допустимого перетока активной мощности необходимо рассматривать наиболее тяжелые аварийные возмущения в том числе снижение генерации ВИЭ [7]. В общем случае в качестве аварийного небаланса активной мощности возможно использовать всю фактическую генерацию ВИЭ. Однако

такой подход существенно загрубляет определение области допустимых параметров режима и приводит к избыточному, неоптимальному использованию (включение и загрузка) генерации ТЭС. Необходимо разработать алгоритм определения обоснованной величины возможного небаланса ВИЭ [11], которую необходимо учитывать при управлении и планировании электроэнергетических режимов.

Организация мониторинга сброса мощности ВИЭ

По имеющимся статистическим данным была произведена приблизительная оценка возможной кратковременной неравномерности нагрузки ВИЭ.

Определен коэффициент сброса, учитывающий, на какую величину может единовременно снизится нагрузка ВИЭ при изменении погодных условий.

По оценке мощности СЭС Энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя нагрузка СЭС может снизиться на 93% за 19 минут.

В целях определения величины возможного максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ, расположенных за контролируемым сечением, для учета в таблицах допустимых перетоков в контролируемых сечениях, разработана и внедрена методика расчета, основанная на обработке статистической информации (данных поступающей в диспетчерский центр телеметрии).

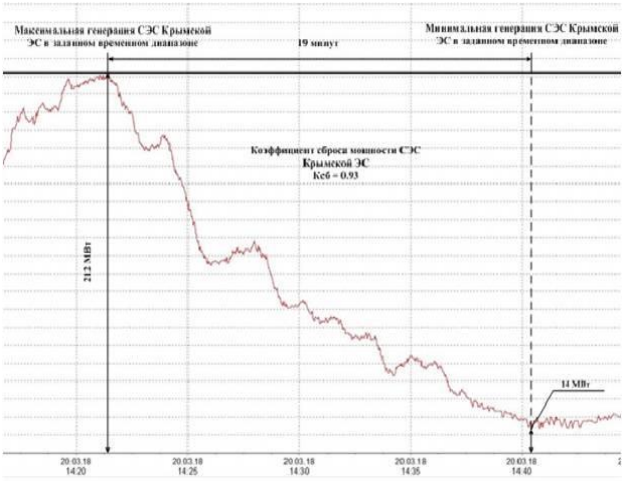


Рис. 1. Сброс мощности СЭС Энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя

Величина максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ (далее – расчетный небаланс ВИЭ) определяется для группы ВИЭ, расположенных за контролируемым сечением.

Величина расчетного небаланса ВИЭ определяется по формуле (1):

$$\Delta P = min\left(P_{\text{ВИЭфакт}}, \Delta P_{max}\right) \quad (1)$$

где: $P_{\text{ВИЭфакт}}$ – текущая фактическая (планируемая) активная мощность ВИЭ, (МВт);

ΔP_{max} – наибольшее снижение активной мощности группы ВИЭ вследствие изменения погодных условий (освещенность, сила и направление ветра), (МВт).

Величина ΔP_{max} определяется на основании статистической информации о нагрузке ВИЭ в соответствии со следующим порядком:

1. Вычисляется усредненное значение фактической активной мощности СЭС (ВЭС) на интервале времени 20 секунд P_СЭС(ВЭС)ср по формуле (2):

$$P_{\text{ВИЭср}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{\text{ВИЭ}i}}{N} \quad (2)$$

Число измерений N должно быть не менее 15.

2. Для каждого j-ого интервала времени 10 минут устанавливается начальное значение максимальной активной мощности ВИЭ $P_{max(0)}$, равное $P_{\text{ВИЭср}(0)}$ при t(0)=0;

Для каждой i-ой точки $P_{\text{ВИЭср}(i)}$ в пределах j-ого интервала времени 10 минут:

при $P_{\text{ВИЭср}(i)} \geq P_{max(j)}$ актуализируется значение $P_{max(j)}=P_{\text{ВИЭср}(i)}$;

при $P_{\text{ВИЭср}(i)} < P_{max(j)}$ определяется элемент вектора-строки ΔP_{1j}, равный $\Delta P_{1j}=P_{max(j)}-P_{\text{ВИЭср}(i)}$.

Для каждого j-ого интервала времени 10 минут определяется максимальный сброс активной мощности ВИЭ по формуле (3):

$$\Delta P_j = max(\Delta P_{1j}) \quad (3)$$

3. ΔP_{max} должна определяться с дискретностью 20 секунд.

4. Величина ΔP_{max} определяется по формуле (4) на основании ΔP_j за весь период времени с момента ввода в работу электростанции:

$$\Delta P_{max} = max\left(\Delta P_j\right) \quad (4)$$

При управлении электроэнергетическим режимом ΔP определяется по формуле (1).

При планировании электроэнергетического режима (для любого этапа планирования) ΔP

определяется по формуле (1), при этом в качестве ΔP_{max} принимается наибольшее снижение активной мощности ВИЭ, зафиксированное до 00:00 суток, в которые выполняется расчет.

При вводе в эксплуатацию нового ВИЭ за контролируемым сечением (далее – новый ВИЭ, допустимый переток активной мощности в котором зависит от величины ΔP_{max}, величина ΔP_{max} для группы ВИЭ с учетом нового ВИЭ определяется как максимальное значение из:

ΔP_{max} группы ВИЭ за период времени до момента ввода в работу нового ВИЭ без учета нового ВИЭ ;

ΔP_{max} группы ВИЭ за период времени с момента ввода в работу нового ВИЭ с учетом нового ВИЭ.

При вводе нового контролируемого сечения, допустимый переток активной мощности в котором зависит от величины ΔP_{max} для новой группы ВИЭ, величина ΔP_{max} для новой группы ВИЭ определяется на основании статистических данных о нагрузке ВИЭ, поступающей в диспетчерский центр телеметрии, за 12 месяцев.

В целях формирования и систематической актуализации информации о величине максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ [10] для использования на стадиях краткосрочного планирования и управления электроэнергетическим режимом работы энергосистем, разработан унифицированный программный модуль «Небаланс ВИЭ» (далее – Модуль).

Модуль обеспечивает выполнение расчета величины максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ за 10 минут с использованием ретроспективной телеметрической информации за заданный период времени для заданных групп ВИЭ [12].

Модуль реализует алгоритм определения величины максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ.

Выводы

Применение описанной Методики позволяет выполнить определение величины возможного максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ, расположенных за контролируемым сечением.

Разработка и внедрение в диспетчерских центрах унифицированного программного модуля «Небаланс ВИЭ» обеспечивает автоматизированное определение расчетного небаланса ВИЭ для любого состава ВИЭ в любом контролируемом сечении за выбранный период.

Таким образом, при получении расчетной величины максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ, сопоставимой с величиной расчетного небаланса активной мощности, связанной с отключением ПГУ, Блока ТЭС или АЭС, систем шин станций и т.д., в формуле расчета максимально допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении, будет обеспечен учет расчетной величины максимального небаланса активной мощности, связанного со снижением активной мощности ВИЭ, при краткосрочном планировании и управлении электроэнергетическим режимом работы энергосистем.

Учёт влияния в качестве дополнительного критерия определяющего пропускную способность электрической сети (максимально допустимый переток в контролируемом сечении) небаланса активной мощности ВИЭ [9] отражает необходимость дополнительного резервирования. Таким образом, вышеописанный алгоритм можно использовать при планировании развития и ввода в работу новых объектов генерации, а также определения необходимого объема ввода резервов традиционной генерации или и дорогостоящих накопителей электрической энергии.

Список литературы

1. Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок //Методические указания по устойчивости энергосистем», утвержденные приказом Минэнерго России от 03.08.2018 №630. – Москва. – 2018 г. – 25 с.2.
2. Какушина Е.Г. Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Соломенникова С.И.//Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 4. С. 55-60.
3. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
4. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимо-

вич Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
5. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А.//Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
6. Гурьев В.В. Оценка потенциала развития возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя /Какушина Е.Г., Небесный В.В., Найдук М.Р., Асанов А.Б.//Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 3. С. 23-29.
7. Гурьев В.В. Обеспечение надежного функционирования энергосистемы республики Крым и г. Севастополя при различных воздействиях ВИЭ /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Калиев Р.Г., Какушина Е.Г.//В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2019. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Под редакцией Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. 2019. С. 499-502.
8. Какушина Е.Г., Технико-экономический анализ эффективности ветро-солнечных установок на основе теории сложности /Соломенникова С.И., Якимович Б.А.//В книге: Системы контроля окружающей среды - 2019. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 74.
9. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.//Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
10. Кувшинов В.В. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования характеристик фотоэлектрических батарей при изменении освещенности их рабочей поверхности /Какушина Е.Г., Васильченко М.А., Киндлер В.В., Кувшинова В.В.//Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 1. С. 81-86.
11. Кувшинов В.В. Обеспечение энергонезависимости Крымского полуострова при использовании автономных термофотоэлектрических станций /Какушина Е.Г., Хайбулаев Э.Л., Решетняк В.В.//В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018. сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. 2018. С. 643-647.
12. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.

References

1. Requirements for ensuring the reliability of electric power systems, the reliability and safety of electric power facilities and energy-receiving installations “Methodological guidelines for the stability of energy systems”, approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated 03.08.2018 No. 630. - Moscow. - 2018 - 25 p.
2. Kakushina E. G. Technical and economic aspects of the development of Autonomous solar energy systems / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Kuznetsov P. N., Solomen-nikova S. I. / / Power installations and technologies. 2018. Vol. 4. No. 4. pp. 55-60.
3. Vologdin S. V. Analysis of various power supply scenarios in the Crimea, taking into account the operating modes of the solar power station / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., AB-Daly L. M., Kakushina, E. G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, No. 4, Pp. 229-234
4. Guryev V. V. Development of renewable energy sources in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Ka-kushina E. G., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V. / / Power installations and technologies-2019. Vol. 5. No. 2. pp. 90-93.
5. Zaichenko V. M. Directions of energy development /Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Makushina E. G., Badulin S. A.//Energy and technology. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-61.
6. Guryev V. V. Assessment of the potential for the development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and Sevastopol /Makushina E. G., heaven, V. V., NAIDOC R. M., Asanov A. B.//power plant technology. 2020. Vol. 6. No. 3. pp. 23-29.
7. Guryev V. V. Ensuring reliable functioning of the energy system of the Republic of Crimea and Sevastopol under various impacts of RES / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Kaliev R. G., Kaku-Shina E. G. // in the collection: Ecological, industrial and energy security-2019. Collection of articles on the materials of the international scientific and practical conference. Edited by L. I. Lukina and N. V. Lyamina. 2019. pp. 499-502.
8. Kakushina E. G., Technical and economic analysis of the efficiency of wind and solar installations based on the theory of complexity /Solomennikova S. I., Yakimovich B. A. // In the book: environmental control Systems-2019. Abstracts of reports of the International scientific and technical conference. 2019. P. 74.
9. Kuvshinov V. V. Experimental study of the energy characteristics of solar installations in the Sevastopol region /Makushina E. G., Kuvshinova V. V., Adzhiev W., Berdyshev, K. Yu.//Power plants and

technologies. 2019. Vol. 5. No. 2. pp. 104-110.
10. Kuvshinov V. V. Comparison of theoretical and experimental results of studying the characteristics of photovoltaic batteries when changing the illumination of their working surface /Kakushina E. G., VA-Silchenko M. A., Kindler V. V., Kuvshinova V. V. // Power installations and technologies. 2019. Vol. 5. No. 1. pp. 81-86.
11. Kuvshinov V. V. Ensuring energy independence of the Crimean Peninsula when using Autonomous thermal photo-electric stations /Kakushina E. G., khaybulaev E. L., Reshetnyak V. V. // in the collection: Environmental, industrial and energy security-2018. collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. edited by L. I. Lukina, N. A. Bezhin, and N. V. Lyamina. 2018. pp. 643-647.
12. Kuvshinov V. V. Experimental study of the energy characteristics of solar installations in the Sevastopol region /Makushina E. G., Kuvshinova V. V., Adzhiev W., Berdyshev, K. Yu.//Power installations and technologies-2019, Vol. 5, No. 2, pp. 104-110.

УДК 620.92

Использование показателей структурной и функциональной надежности при определении решений по перспективному развитию

Л.В. Перышкина[1], М.Д. Перышкин[2], А.С Самчук[2], Ю.В. Безруков[2], В.Н. Балабай[2]
[1]Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ, г. Симферополь, 295000.Peryshkina-lv@tavrida.so-ups.ru, [2]
[2]*ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,г. Севастополь, 299053*

Статья поступила 13.11.2020 г.; после доработки 16.11.2020 г.

Аннотация

Показатели надежности электроснабжения при перспективном развитии электрической сети 110-500 кВ могут быть вычислены вероятностными методами.

Ключевые слова: надежность, вероятностные методы, перспективное развитие.

The use of structural and functional reliability indicators in determining solutions for long-term development

L.V. Peryshkina [1], M.D. Peryshkin[2], A.S.Samachuk[2], U.V.Bezrukov[2], V.H.Balabai[2]
[1]*Branch of «SO UPS», JSC, Regional Dispatching Office of Crimea Republic and Sevastopol Power System, Department of Electric Mode Calculation Simferopol, 295034, Russia,* Peryshkina-lv@tavrida.so-ups.ru,
[2]*FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,Sevastopol, 299053, Russia.*

Received 13.11.2020 y.; received in final form 16.11.2020 y.

Abstract

Reliability indicators of power supply with the prospective development of an electric network of 110-500 kV can be calculated by probabilistic methods.

Keywords: reliability, probabilistic methods, perspective development.

Введение

Одной из основных целей функционирования электроэнергетического комплекса является электроснабжения потребителей. Электроснабжение должно отвечать необходимому уровню по показателям надежности, экономичности и качеству. При недостаточном уровне надежности электроснабжения разрабатываются решения по развитию электрической сети и систем автоматизации, в том числе на перспективный период. Одним из источников средств для обеспечения необходимого развития электрической сети, являются средства существующих и вновь подключаемых потребителей электрической энергии.

При этом надежность в сетях 110 кВ и выше оценивается, как совокупность структурного сочетания отказов и функциональных ограничений по параметрам электроэнергетического режима. Суммарный недоотпуск электрической энергии потребителям как показатель, получаемый с использованием вероятностных методов, а также анализ сравнения компенсации данного недоотпуска с затратами на новое строительств в целях повышения надежности – не используется.

Основой, исходными данными для применения вероятностных методов и расчётного определения показателей надежности электрической сети являются статистические данные (параметр потока отказов, среднее время восстановления, среднее число преднамеренных отключений, среднее время простоя при преднамеренных от-

ключениях) ее составных элементов (ЛЭП, компоненты распределительных устройств).

Вопросы определения показателей структурной надежности электрической сети достаточно освещены начиная со второй половины прошлого века. Однако, критерий n-1 (n-2, n-3), в настоящее время используется с учетом абсолютной вероятности отказа элемента электрической сети, а сочетание ремонтно-аварийных процессов рассматривается для крайних по мощностям активной нагрузки (перетоков) электроэнергетических режимов (максимальных и минимальных нагрузок). Время существования режимов, при которых возникают недопустимые параметры режима может составлять всего 2% в году. А, так, например, вероятность отказа протяженных ЛЭП 110-500 кВ может в разы превышать данный показатель более коротких ЛЭП. Таким образом при выборе между равнозначными вариантами по перспективному развитию (ликвидации «узкого места») дополнительным может быть критерий, по которому предпочтение отдается варианту с меньшей величиной среднего недоотпуска электроэнергии или данной величиной приведенной к укрупненным затратам на реализацию соответствующего мероприятия.

Современные вычислительные комплексы и их мощности позволяют почти неограниченно расширять информационную модель электрической сети. Данное обстоятельство возможно использовать для описания модели для оценки структурной и в последующем результирующей надежности даже в масштабах региональной энергосистемы 110 кВ и выше. Так при прочих равных каждому элементу электрической сети необходимо задать дополнительные параметры, используемые в расчетах надежности.

Анализ проблемы и постановка задачи

Ввиду наличия в настоящее время большого числа готовых алгоритмов и программных наработок по определению показателей структурной надежности, оптимизации целевых функций и информационной модели электрической сети, построенной на объектно-ориентированном принципе, рассматривается алгоритм определяющий дополнительный критерий выявления «узкого места» и выбора решения по его ликвидации.

Под развитием электрической сети предполагается изменение схемы электрической сети в результате сооружения и ввода новых элементов (демонтажа существующих и пр.), изменение пропускной способности (по току и мощности).

В качестве целевой функции, минимум которой необходимо найти, предлагается рассмотреть – недоотпуск электроэнергии в год. При этом, как элемент решения общей задачи, ограничения по внешним контролируемым сечениям, заданным в виде МДП – расчетную величину МДП целесообразно для упрощения представлять в виде нагрузки эквивалентных узлов.

Одним из критериев при ранжировании вариантов по развитию электрической сети рассматривается ограничение целевой функции по ее производной – необходимо ее отрицательное значение.

Так как в ряде случаев мероприятия по повышению надежности состоят из комплекса мер и разрабатываются последовательно, локальный экстремум функции убывания недоотпуска электроэнергии в год, необходимо использовать при рассмотрении функционала. В настоящее время вариационное исчисление используется для решения задач оптимального управления, т.е. формирования оптимального закона регулирования. В задачи оптимального управления развитием электрической сети предлагается рассмотреть функционал, имеющий в своем составе зависимость от функции недоотпуска электроэнергии для множества вариантов развития.

Обязательным компонентом решения по развитию должен является относительный показатель (аналог КПД). Такой показатель эффективности предлагается представить в виде отношения совокупной величиной укрупненных затрат на реализацию мероприятия к приращению (отрицательному) недоотпуска при его реализации.

Наличие большого количества факторов, влияющих на конечное решение по развитию вызывает необходимость формулировки допущений, которые не рассматриваются при решении задачи.

Оценка возможности построения и использования алгоритма по получению дополнительного критерия для решений по развитию электрической сети

На данном этапе приняты следующие допущения:

- в расчётах приняты укрупненные затраты на реализацию мероприятий;
- не учитывается отказ типа «короткое замыкание», как источник электромагнитных и

электромеханических переходных процессов. Для оценки подобных отказов необходимо отдельно моделировать и выполнять оценку соответствия отключающей способности выключателей токам коротких замыканий, динамической устойчивости генерирующего оборудования и пр. что требует более масштабной и глубокой проработки. Подходы по учёту данного отказа могут быть рассмотрены и учтены в дальнейшем [3];

- электрическая сеть представляется в виде графа укрупненно. Не учитываются отказ отдельных составных элементов (выключатели, разъединители, устройства РЗА);
- используется нормальный закон распределения вероятностей параметров режима;
- используются готовые результаты расчётов установившихся режимов.

Для определения интегрального показателя надёжности – недоотпуск электроэнергии в общем случае определяется выражением:

$$\Delta W = M(\Delta W) = \int_0^\infty \int_0^\infty t_{\text{деф}} \cdot P_{\text{деф}} \cdot f(t_{\text{деф}} \cdot P_{\text{деф}}\, dt dP, \quad (1)$$

где $t_{\text{деф}} \cdot P_{\text{деф}}$ – соответственно случайные величины дефицита мощности и продолжительности существования состояний, при которых возникает дефицит мощности у потребителей; $f(t_{\text{деф}} \cdot P_{\text{деф}})$ – плотность вероятности системы указанных случайных величин.

Для учёта функциональной (режимной) составляющей предлагается использовать известные [7] выражения:

$$R_x = 1 - \Phi\left(\frac{x_{\text{д}} - \bar{x}}{\sqrt{D_x}}\right); \quad (2)$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-t^2/2} dt; \quad (3)$$

где, R_x- вероятность превышения параметра режима $x_{\text{д}}$.

Для определения требуемого мероприятия решается локально задача декомпозиции и определяется ранжированный перечень по вкладу каждого элемента графа в совокупный итог. Далее в качестве мероприятия рассматривается дублирование элемента графа (добавление параллельного ребра). После перебора всех вариантов по ранжированному перечню, вычисляется показатель эффективности мероприятия:

$$F_{\text{эф}\,i} = \Delta W_i \cdot \text{З}_{\text{д}i};$$

где $\text{З}_{\text{д}i}$ – укрупненные затраты на реализацию мероприятия i.

После составления ранжированного перечня эффективности изменений $\boldsymbol{F}_{\text{эф}}$, рассматриваются мероприятия по изменению функциональных ограничений и аналогично формируется $\boldsymbol{F}_{\text{эф}}$. На данном этапе $\boldsymbol{F}_{\text{эф}}$ возможно использовать в качестве дополнительного критерия по выбору оптимального мероприятия по развитию.

Заключение

В целях расширения численных методов анализа эффективности мероприятий по развитию электрической сети, в данном исследовании рассмотрены вероятностные методы в расчётах надежности электроснабжения.

Изученные материалы и публикации по расчётам показателей надежности позволяют использовать наработки для составления алгоритма расчёта коэффициентов эффективности мероприятий по развитию электрической сети.

Для реализации автоматизации расчётов необходимо расширение и дополнение существующих информационных моделей статистическими показателями надежности.

Список литературы

1. ГОСТ Р 58057-2018 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Планирование развития энергосистем. Общие требования. Утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 марта 2018 г. N 128 24 с.
2. ГОСТ Р 58670-2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Планирование развития энергосистем. Расчеты электроэнергетических режимов и определение технических решений при перспективном развитии энергосистем. Нормы и требования. Утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2019 г. N 1196-ст – 16 с.
3. Структурная надежность электроэнергетических систем: Учеб. пособие / В. П. Обоскалов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 194 с.
4. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с
5. Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем», утвержденные приказом Минэнерго России от 03.08.2018 №630. – Москва. – 2018 г. – 25 с.2.
6. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / Н.И. Воропай, С.В. Подковальни-

ков, В.В. Труфанов и др.; Отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с..
7. Фокин Ю.А., Осипов Я.Н. Методы расчета показателей надежности сложных электроэнергетических систем, основанные на структурно-функциональных характеристиках. Электричество 2010, №5.

References

1. GOST R 58057-2018 unified energy system and working in isolation of the power system. Energy system development planning. General requirements. Approved by Order of the Federal Agency for technical regulation and Metrology dated March 13, 2018 N 128 –
1. 24 p.
2. GOST R 58670-2019 unified energy system and working in isolation of the power system. Energy system development planning. Calculations of electric power modes and determination of technical solutions for the progressive development of power systems. Norms and requirements. Approved by Order of the Federal Agency for technical regulation and Metrology of November 19, 2019 N 1196-St-16 p.
3. Structural reliability of electric power systems: Textbook / V. P. Oboskalov. Yekaterinburg: UrFU, 2012. - 194 p.
4. Guk Y. B. Theory of reliability in electro-power engineering. - L.: Energoatomizdat, 1990. - 208 p.
5. Requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations "Guidelines for the stability of power systems", approved by the order of the Ministry of energy of the Russian Federation from 03.08.2018 No. 630. - Moscow. – 2018 - 25 p. 2.
6. Justification for the development of electric power systems: Methodology, models, methods, and their use / N. I. Voropai, S. V. Podko-valnikov, V. V. Trufanov, and others; Executive editor N. I. Voropai - Novosibirsk: Nauka, 2015. - 448 p.
7. Fokin Y.A., Osipov Y. N. Methods for calculating reliability indicators of complex electric power systems based on structural and functional characteristics. Elektrichestvo 2010, no. 5.

УДК 621.311.1

Влияние неоднородности электрической сети на оптимальность параметров электроэнергетического режима

Н.В. Семенюк

Филиал АО «СО ЕЭС», «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя», Служба электрических режимов, 295034, Российская Федерация, Республика Крым, г.Симферополь, ул.Киевская 74/6, semenyuknv@tavrida.so-ups.ru

Статья поступила 20.11.2020 г; после доработки 24.11.2020 г.

Аннотация

В статье предложена методика выделения из суммарных технологических потерь составляющей, обусловленной неоднородностью сети. Показано, что при оптимизации целесообразно анализировать возможность снижения составляющей дополнительных потерь. Практическими расчетами подтверждена возможность использования метода при выборе проектировании развития и реконструкции электрической сети. С учетом особенностей функционирования и перспектив развития рынка электроэнергии, применение метода может быть рассмотрено при решении задачи согласования экономических аспектов составления двусторонних договором на рынке электрической энергии с физическими процессами передачи электроэнергии.

Ключевые слова: неоднородность сети, нагрузочные потери, узловые токи, оптимизация режима.

Influence of inhomogeneity of electric network on optimality of electric energy mode parameters

Semenyuk N.V.

Branch of «SO UPS», JSC, Regional Dispatching Office of Crimea Republic and Sevastopol Power System, Department of Electric Mode Calculation, 74/6, Kiyevskaya Str., Simferopol, 295034, Russian Federation, semenyuknv@tavrida.so-ups.ru

Received 20.11.2020 y.; received in final form 24.11.2020 y.

Abstract

The article suggests the methodology of allocation the additional power loss caused by inhomogeneity of the grid. It is shown that additional power loss component is appropriate to use as an optimization criterion. Practical calculation prove the suggested methodology potential for efficient engineering of operating grid development and reconstruction. Due to the peculiarities of energy market functioning and developing it can be useful while solving the problems of coordination the economic aspects of contracting bilateral agreements and physical processes of energy supply/

Keywords: inhomogeneity of network, power loss, node currents, mode optimization

Введение

Стремительное развитие программирования, ресурсов и возможностей вычислительной техники открывает новые возможности как для совершенствования решений существующих задач электроэнергетики, так и для постановки новых, на текущий момент кажущихся сложно реализуемыми. Благодаря достигнутым успехам и эффективной реализации методик оценки состояния по данным телеизмерений [3], расширению телеизмеряемости режима, включая использование технологии синхронизированных векторных измерений [2, 4] – фактически, осуществляется управление ЭЭС в режиме реального времени.

Современные средства АСДУ позволяют обеспечивать обработку огромных массивов телеметрической информации при непрерывном ее

поступлении. Увеличивается скорость управления процессами, в рамках цифровизации электроэнергетики [1], перспективного применения технологий Smart Grid, управления спросом, применения систем накопления энергии – закладываются основы новых форматов управления работой энергосистем, которые смогут обеспечивать оптимизацию неразрывно связанных технологических и экономических процессов для достижения целевого состояния всего топливо-энергетического комплекса. Станет возможным применение более сложных оптимизационных методов высокого порядка, учитывающих все аспекты функционирования энергетики в конкурентно-рыночных условиях. Сложно сказать, будущее изменит электроэнергетику, или она, как основа всего, изменит мир – ответ на этот вопрос даст время.

Постановка задачи исследования

В качестве одного из показателей решения комбинационной многоуровневой задачи оптимизации режимов работы электроэнергетической системы может рассматриваться критерий минимума нагрузочных потерь активной мощности в сети.

В соответствии с действующим законодательством, нормативная величина технологического расхода электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям рассчитывается в процентах от объема отпуска электрической энергии в электрическую сеть потребителя электрической энергии, при этом не учитывается нелинейная зависимость изменения указанного параметра от значений токораспределения в сложнозамкнутой электрической сети.

Целью данной работы является рассмотрение перспективной возможности

- выделения из суммарных технологических потерь составляющей, обусловленной неоднородностью сети;
- использования ее для принятия решений при проектировании развития сети; в целях разработки альтернативных подходов при нормировании потерь; в качестве ценообразующего фактора при выполнении рыночных процедур.

Характеристика неоднородности сети

Для характеристики неоднородности электрической сети в [7] предложено использовать отношение индуктивного к активному сопротивлению ветвей сети $\nu = x_i/r_i$. Значения ν в зависимости от параметров ЛЭП (класс напряжения, марка провода, количество проводов в фазе) варьируются в пределах 1,5 (110 кВ) ÷ 19 (500 кВ).

Уменьшение нагрузочных потерь активной мощности в неоднородных электрических сетях может быть достигнуто двумя путями:

- приближением параметров сети по технико-экономическим показателям к однородной;
- принудительным изменением токораспределения в замкнутых контурах.

Сделать это возможно введением в контуры э.д.с., причем величина их и направление должны быть такими [7], чтобы принудительное токораспределение приближалось к токораспределению, рассчитанному по схеме замещения сети, содержащей только активные сопротивления, то есть по r-схеме замещения.

Метод определения составляющих потерь активной мощности с использованием матрицы узловых сопротивлений сети

Для выделения составляющей потерь, вызванной неоднородностью сложнозамкнутой электрической сети, суммарные нагрузочные потери активной мощности представим в виде суммы двух составляющих [5, 6]:

$$\Delta P = \delta P_{min} + \delta P_{\text{доп}} = \\ = \hat{\jmath}^{\mathrm{T}}\left(\mathrm{M}^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\left(\mathrm{R_в} - \mathrm{R_в N^T R_k}^{-1}\mathrm{N R_в}\right)\mathrm{M}^{-1}\dot{\mathrm{j}} + \\ + \left(\hat{E}_{\text{ну}} - \hat{E}_{\text{ур}}\right)^T G_k^T \left(\dot{E}_{\text{ну}} - \dot{E}_{\text{ур}}\right)^T, \quad (1)$$

где δP_{min} – минимальное значение потерь активной мощности; $\delta P_{\text{доп}}$ – дополнительные потери в замкнутой сети.

В (1) $\hat{J}^T$, $\dot{J}$ – векторы узловых токов, которые определяются мощностью $\dot{S}$ и напряжением $\dot{U}$ в узлах ($\hat{J}^T$ – транспонированный, $\dot{J}$ – сопряженный); $\hat{E}_{\text{ну}}$, $\hat{E}_{\text{ур}}$ – векторы э.д.с. неуравновешенности и уравнительных э.д.с.; M – первая матрица соединений графа замкнутой сети, приведенная к квадратной с помощью введения дополнительных узлов; N – вторая матрица соединений; $R_{\text{в}}$, $R_k = NR_{\text{в}}N^T$ – соответственно квадратные матрицы активных сопротивлений ветвей и контуров сети; $G_k = Re(NR_{\text{в}}N^T)^{-1}$ – матрица активных контурных проводимостей.

Для однородной сети активные сопротивления ветвей, соответствующие минимально возможному уровню потерь в этой сети, определятся как

$$R_{min} = R_{\text{в}} - R_{\text{в}}N^T R_k{}^{-1} N R_{\text{в}}$$

Соответственно, минимально возможные

потери для данной сети при экономическом перераспределении мощностей, которое определяется только активными сопротивлениями элементов сети и может быть рассчитано по R_{min}-схеме:

$$\delta P_{min} = \hat{J}^T (M^T)^{-1} R_{min} M^{-1} \dot{J},$$

или

$$\delta P_{min} = \hat{J}_a^T \Re J_a + \hat{J}_p^T \Re J_p,$$

где J_a, J_p – активная и реактивная составляющие токов в узлах.

Матрицу

$$\Re = (M^T)^{-1}(R_{\text{в}} - R_{\text{в}} N^T {R_k}^{-1} N R_{\text{в}}) M^{-1})$$

можно воспринимать, как $\Re$-матрицу экономических узловых сопротивлений сети, которая состоим из значений входных сопротивлений контуров схемы. Таким образом, потокораспределение в электрической сети ЭЭС будет совпадать с потокораспределением, рассчитанным по $\Re$-схеме замещения со сбалансированными коэффициентами трансформации.

Это обеспечивает минимум потерь активной мощности ЭЭС от взаимных и транзитных перетоков мощности.

Оптимальную величину потерь для какого-либо установившегося режима при управлении величиной э.д.с. неуравновешенности можно определить исходя минимизации составляющей потерь, вызванной неоднородностью электрической сети [5]:

$$\Delta P_{\text{опт}}(t) = \min_{\boldsymbol{E}_{\text{ну}}} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}_{a\text{ну}} + \\ +(G_k{}^{-1}H)^T \hat{J}_p \end{pmatrix}_T G_k{}^T \begin{pmatrix} E_{a\text{ну}} + \\ +(G_k{}^{-1}H)^T J_p \end{pmatrix} + \\ + \begin{pmatrix} \hat{E}_{p\text{ну}} - \\ -(G_k{}^{-1}H)^T \hat{J}_a \end{pmatrix}_T G_k{}^T \begin{pmatrix} E_{p\text{ну}} - \\ -(G_k{}^{-1}H)^T J_a \end{pmatrix} + \\ + \hat{J}_a \left(R - H(G_k^{-1}H)^T\right) J_a + \\ + \hat{J}_p \left(R - H(G_k^{-1}H)^T\right) J_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

где $G_k = Re\left(N \dot{Z} N^T\right)^{-1}$ – матрица активных контурных проводимостей сети, $H = Im(-\dot{Y}_k \dot{Z} M^{-1})$ – мнимая часть условной матрицы коэффициентов распределения токов расчетной схемы ЭЭС, связывающей узловые токи с контурными токами для системы базовых контуров; $E_{a\text{ну}}, E_{p\text{ну}}$ – активная и реактивная составляющие контурных э.д.с., обусловленных неоднородностью электрических сетей.

Поскольку матрица G_k всегда является положительно определенной, то, исходя из определения квадратичной формы, первые два члена уравнения (2) всегда неотрицательны, и минимум функции достигается при условии:

$$\begin{matrix} E_{a\text{ну}}^{(\text{опт})} = -(G_k{}^{-1}H)^T J_p \\ E_{p\text{ну}}^{(\text{опт})} = (G_k{}^{-1}H)^T J_a \end{matrix},$$

где $E_{a\text{ну}}^{(\text{опт})}, E_{p\text{ну}}^{(\text{опт})}$ – векторы активной и реактивной составляющих оптимальной э.д.с. неуравновешенности.

В (2) величины $-(G_k{}^{-1}H)^T J_p$, $(G_k{}^{-1}H)^T J_a$ выражают уравнительные э.д.с., вызванные перетеканием уравнительного тока в замкнутых контурах сети. Величины $E_{a\text{ну}}^{(\text{опт})} + (G_k{}^{-1}H)^T J_p$, $E_{p\text{ну}}^{(\text{опт})} - (G_k{}^{-1}H)^T J_a$ определяют э.д.с. небаланса в контурах сети, наличие которых вызывает рост потерь активной мощности по отношению к минимально возможным. Если допустить, что $\dot{E}_{\text{ну}} = 0$, то получим удобное выражение для определения дополнительной составляющей потерь, вызванных неоднородностью сети, которую можно использовать в качестве показателя целесообразности проведения мер по оптимизации.

$$\delta P_{min} = \hat{J}_a \left(-G_k^{-1}H\right)^T G_k{}^T (-G_k^{-1}H) J_a + \\ + \hat{J}_p \left(-G_k^{-1}H\right)^T G_k{}^T (-G_k^{-1}H) J_p, \quad (3)$$

где можно выделить

$A = \left(-G_k^{-1}H\right)^T G_k{}^T (-G_k^{-1}H)$ – квадратную матрицу собственных и взаимных сопротивлений узлов сети, которые характеризуют дополнительные потери активной мощности.

Используя (3), можно определить для любого k-того узла схемы из n узлов минимальную и дополнительную составляющие потерь можно выразить через задающие узловые токи:

$$\delta P_{min}\langle k \rangle = J_{ak} \sum_{j=0}^{n} J_{aj} \Re_{k,j} + J_{pk} \sum_{j=0}^{n} J_{pj} \Re_{k,j} \ ,$$

$$\delta P_{\text{доп}}\langle k \rangle = J_{ak} \sum_{j=0}^{n} J_{aj} A_{k,j} + J_{pk} \sum_{j=0}^{n} J_{pj} A_{k,j} \ .$$

Пересчет значений матриц $\Re$ и A требуется только при изменении топологии электрической сети (выполнении коммутаций); при организации определения составляющих потерь в режиме онлайн для расчетов в качестве входной информации требуются только оцененные значения задающих узловых токов. Применение рассмотренного метода с использованием матриц узловых сопротивлений для передачи мощности к узлу потребления (либо узлов потребления, входящих в группу точек поставки) позволяет

учесть влияние всех нагрузок сети.

Пример оценки нагрузочных потерь, обусловленных неоднородностью электрической сети, на этапе проектирования

Фактически, существующая модель рынка за счет применения котлового тарифа и требований недискриминационного доступа к услугам по передаче электроэнергии позволяет компенсировать, усреднить затраты лицензиатам. Но если к понятию обоснованности недискриминационного доступа к услугам по передаче подходить с физической точки зрения происходящего процесса, то очевидно, что в конкурентной рыночной среде повышение составляющей потерь для одного поставщика за счет включения в них потерь от транзита мощности к остальным является экономически не совсем справедливым.

Возможность применения физически обоснованного подхода к расчетам технологических потерь на передачу с помощью $\Re$-матрицы экономических узловых сопротивлений расчетной модели и A-матрицы сопротивлений схемы, характеризующих дополнительные потери активной мощности, вызванные неоднородностью сети, открывает новые возможности для обеспечения организации прозрачного и эффективного функционирования ТЭК.

Составляющие δP_{min}, $\delta P_{\text{доп}}$, вызванные протеканием мощности к узлу потребления, целесообразно определять и на этапе проектирования электрической сети. Для примера рассмотрим фрагмент сети 110 кВ и определим потери для разных вариантов технологического присоединения некоторой условной ПС №6 (Рис. 1, 2).

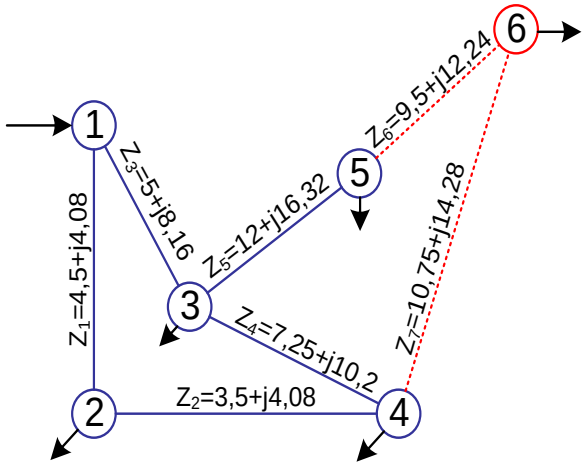


Рис. 1. Вариант I присоединения проектируемой ПС №6 воздушными линиями к ПС 110 кВ №4, № 5.

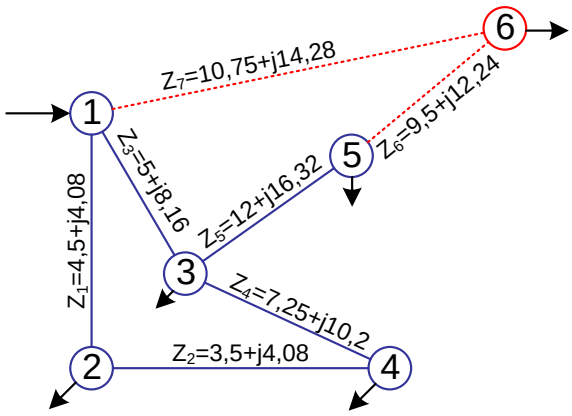


Рис. 2. Вариант II присоединения проектируемой ПС №6 воздушными линиями к ПС 110 кВ №1, № 5.

Для простоты анализа примем, что параметры проектируемых воздушных ЛЭП для обоих вариантов идентичны, и приведенные на рисунках сети отличаются лишь точкой присоединения ЛЭП – Либо ПС № 4, либо ПС №1.

Результаты расчета сведены в Таблицу 1.

Таблица 1. *Результаты расчета потерь, обусловленных транзитом мощности к узлам потребления для различных проектных вариантов*

№ узла	Потребление в узлах, P+jQ	I вариант		II вариант	
		δP_{min}	$\delta P_{\text{доп}}$	δP_{min}	$\delta P_{\text{доп}}$
2	30 + j14,53	0,636	0,018	0,479	0,011
3	15 + j7,26	0,322	0,0084	0,23	0,0048
4	10 + j4,84	0,276	0,0075	0,182	0,0048
5	20 + j9,68	0,933	0,014	0,608	0,0042
6	15 + j7,26	0,689	0,011	0,367	0,0017
Σ	**90 + j43,57**	**2,855**	**0,058**	**1,866**	**0,027**

Для приведенной в примере схемы можно было бы сказать и без дополнительных расчетов, что II вариант присоединения будет более экономичным (потери δP_{min} в сети уменьшились на 32,4%, $\delta P_{\text{доп}}$ – на 52,6%), поскольку одна из питающих ЛЭП присоединяется непосредственно к точке генерации (ПС № 1 – балансирующий узел). Это всего лишь еще раз убеждает в корректности расчетов.

В случае сложнозамкнутой разветвленной сети нескольких уровней напряжения сложность подобной задачи возрастает в квадратической зависимости от количества участников энергообмена. Использование предложенного подхода [8] дает возможность определить потери на передачу мощности к каждому узлу потребления с

учетом взаимного влияния значений потребления и генерации в сети. Это наилучшим образом может быть использовано для гармонического объединения физической сути процесса производства, передачи, потребления электрической энергии и экономических основ функционирования балансирующего рынка двусторонних договоров.

Перспективное применение отклонения от минимально возможного значения в качестве показателя оптимальности режима

На сегодня нормирование величины технологического расхода электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям рассчитывается в процентах от объема отпуска электрической энергии в электрическую сеть потребителя электрической энергии, осуществляющего деятельность по оказанию услуг по передаче электрической энергии, как сетевой организации и используется органом исполнительной власти субъекта Российской Федерации в области государственного регулирования тарифов при установлении единых (котловых) тарифов. При этом не учитывается нелинейная зависимость изменения нагрузочных потерь от значений потребления и токораспределения в сложнозамкнутой электрической сети.

В качестве альтернативного подхода при нормировании потерь, обеспечивающего объективную оценку функционирования субъектов электроэнергетики, может быть использована возможность выделения нагрузочных потерь из общего объема технологического расхода на передачу электроэнергии. Целесообразно рассматривать возможность включения в единый тариф условно-постоянных составляющих потерь, а при выполнении рыночных процедур по конкурентному отбору ценовых заявок поставщиков и покупателей, определению цен и объемов поставки на каждый час наступающих суток – обеспечить возможность определения у учета фактических составляющих потерь δP_{min}, $\delta P_{\text{доп}}$. В силу различий причин, обуславливающих их возникновение, необходимо применять соответствующие подходы к их оценке и компенсации в конкурентных условиях. Определение значения $\delta P_{\text{доп}}$ в режиме реального времени может использоваться в качестве одного из индикаторов степени приближенности фактического электрического режима к оптимальному.

Отклонение составляющей потерь, обусловленной неоднородностью электрической сети $\delta P_{\text{доп}}$, от минимально возможного значения нагрузочных потерь активной мощности δP_{min} – также рационально использовать для определения плановых показателей по необходимости сокращения фактических потерь электрической энергии.

Выводы

В результате исследования показано, что неоднородность электрической сети оказывает влияние на оптимальность параметров электроэнергетического режима; при этом в качестве критерия оптимальности в работе рассматривались нагрузочные потери активной мощности.

Предложенная методика по выделению из суммарных технологических потерь составляющей, обусловленной неоднородностью сети, может использоваться для принятия решений по выбору оптимальных вариантов при проектировании развития и реконструкции электрической сети.

Возможность выделения нагрузочных потерь из общего объема технологического расхода на передачу электроэнергии может быть использована при разработке альтернативных подходов к нормированию потерь, обеспечивающего объективную оценку функционирования субъектов электроэнергетики. Плановые показатели по снижению фактических потерь не могут превышать значений составляющей дополнительных потерь.

С учетом особенностей функционирования и перспектив развития рынка электроэнергии, применение метода может быть рассмотрено при решении задачи согласования экономических аспектов составления двусторонних договором на рынке электрической энергии с физическими процессами передачи электроэнергии. С помощью использования показателей потерь $\delta P_{min}\langle k\rangle$, $\delta P_{\text{доп}}\langle k\rangle$ в качестве ценообразующего фактора можно повысить эффективность производства и передачи электроэнергии в электроэнергетической системе, используя способность конкурентных рыночных механизмов к саморегуляции.

Список литературы

1. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: указ Президента РФ от 07.05.2018 №204 // Собрание законодательства РФ. – 2018. – № 20. – Ст. 2817.
2. A.G. Phadke, J.S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, DOI:

10.1007/978-0-387-76537-2_10, © Springer Science+Business Media, LLC 2008.
3. Аюев, Б.И. Новые подходы к мониторингу запаса устойчивости электроэнергетических систем/ Б.И. Аюев, А.В. Жуков // Энергосистема: управление, конкуренция образование. Сборник докладов III международной научно-практической конференции. В 2 т. Екатеринбург: УГТИ-УПИ.- 2008.- Т. 1. –С.453
4. Есипович, А.Х. Анализ результатов мониторинга режимных параметров ЕЭС России с помощью СМПР в различных схемно-режимных условиях / А.Х. Есипович, А.Н. Смирнов // Известия НТЦ Единой энергетической системы.- 2014.- №1(70).- С.70-83.
5. Лежнюк П.Д. Інформаційне забезпечення розрахунків втрат потужності й електроенергії від транзитних перетоків / П. Д. Лежнюк, Н. В. Семенюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. №1. – С. 66-69.
6. Лежнюк П.Д. Визначення втрат від адресних транзитних перетоків за даними ОІУК / П. Д. Лежнюк, Л. Р. Пауткіна, Н. В. Семенюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2013. – №1. – С. 163-167.
7. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. М.: Высшая школа, 1975. – 230 с.
8. Семенюк Н.В. Практичне значення розрахунків втрат потужності від транзитних перетоків в електричних мережах на етапі проектування [Текст] /Н.В. Семенюк, П.Д. Лежнюк // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об’єктів: І Міжнарод. наук.-техн. конф. викладачів, аспірантів і студентів: тези доповіді. – Донецьк, 2013. – С. 91–92

References

1. O natsionalnykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda: ukaz Prezidenta RF ot 07.05.2018 №204 // Sobraniye zakonodatelstva RF. – 2018. – No20. – Art. 2817.
2. A.G. Phadke, J.S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, DOI: 10.1007/978-0-387-76537-2_10, © Springer Science+Business Media, LLC 2008.
3. Ayuev B. I. Novye podhody k monitoringy zapasa ustoychivosti elektroenergeticheskikh system / B.I. Ayuev, A.V. Zhukov // Energosystma: ypravleniye, konkyrenciya, obrazovaniye. Sbornik dokladov III mezhdunarodnoy naychno-prakticheskoy konferenciyi. In 2 Vol. Yekaterinburg: UGTE-UPE.- 2008.- Vol. 1. –P.453
4. Esipovich A. H., Smirnov A. N. Analysis of results of UPS of Russia operating conditions monitoring obtained from WAMS in various scheme configurations and operating modes // Izvestiya NTC Yedinoy energeticheskoy Sistemy.-2014.- No1(70).- P.70-83
5. Lezhnyuk P.D. Informatsiyne zabezpechennya rozrahunkiv vtrat potuzhnosti i elektroenergiyi vid tranzytnykh peretokiv/ P. D. Lezhnyuk, N. V. Semenyuk // Visnyk Vinnitskogo politekhnichnogo institutu. – 2012. No 1. – P. 66-69.
6. Lezhnyuk П.Д. Vyznachennia vtrat vid adresnykh tranzytnykh peretokiv za danymy OIUK / P. D. Lezhnyuk, L. R. Pautkina, N. V. Semenyuk // Naukovi praci Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. – 2013. – No1. – P. 163-167.
7. Holmskiy V. G. Raschet i optimizatsiya rezhimov ekektricheskikh setey. M.: Vysshaya shkola, 1975. – 230 p.
8. Semenyuk N. V. Praktychne znachennya rozrakhunkiv vtrat potuzhnosti vid tranzytnykh peretokiv v elektrychnykh merezhah na etapi proektuvannya [Tekst] /N.V. Semenyuk, P.D. Lezhnyuk // Sychasni problemy system elektropostachannya promyslovykh ta pobutovykh obyektiv: I Mizhnarod. nauk.-tekhn. konf. vykladachiv, aspirantiv i studentiv: tezy dopovidi. – Donetsk, 2013. – P. 91–92

УДК 620.92

Комбинированная биогазовая станция

И.В. Симонов[1], В.В.Кувшинов [2], Е.Р. Портнова [2], А.В. Куренкова [2], А.П. Кулемина [2]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,г. Севастополь, 299053, Россия. Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[1], VVKuvshinov@sevsu.ru[2], Portovakatya@mail.ru[2], anetta902tav@mail.ru[2], jaens@bk.ru[2]

Статья поступила 01.10.2020 г.; после доработки 05.10.2020 г.

Аннотация

Постоянно ведется поиск альтернативных источников энергии, которые могли бы заменить ископаемые энергетические ресурсы. В данной статье рассматривается получение биогаза малыми фермерскими хозяйствами. Данные комбинированные биогазовые станции позволяют перерабатывать биологические отходы животноводства этот процесс сопровождается выделением биогаза для дальнейшего использования.

Ключевые слова: Возобновляемая энергетика, биогаз, комбинированные системы, экологическое топливо.

Combined biogas station

I.V. Simonov [1], V.V. Kuvshinov [2], E.P. Portnova [2], A.V. Kurenko [2], A.P. Kulemina [2]

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,Sevastopol, 299053, Russia Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[1], VVKuvshinov@sevsu.ru[2], Portovakatya@mail.ru[2], anetta902tav@mail.ru[2], jaens@bk.ru[2]

Received 01.10.2020 y.; received in final form 05.10.2020 y.

Abstract

There is a constant search for alternative energy sources that could replace fossil energy resources. This article discusses the production of biogas by small farms. These combined biogas plants allow the processing of biological waste from animal husbandry, this process is accompanied by the release of biogas for further use.

Keywords: Leave Renewable energy, biogas, combined systems, ecological fuel.

Введение

С каждым годом население нашей планеты увеличивается вместе с этим растет потребление молочной и мясной продукции. Следовательно, растет и количество крупно рогатого скота (КРС). И хотя по данным Росстата количество фермерских хозяйств с 2006г по 2016г уменьшилось(рис.1), однако средняя общая площадь земли на одно хозяйство увеличилась (рис.2) [1]. Большие сельскохозяйственные фермы являются прекрасным источником биотоплива, которое в дальнейшем можно использовать для получения биогаза.



Рис.1. Количество сельскохозяйственных предприятий в РФ

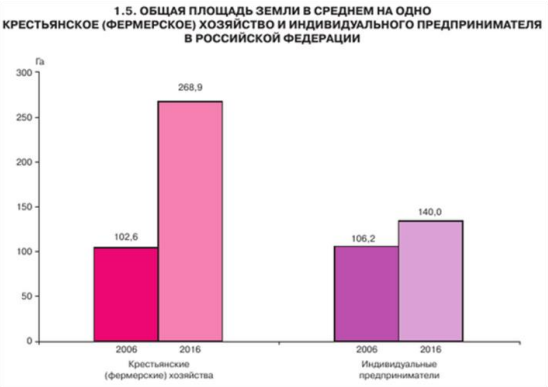


Рис.2. Площадь земли занимаемая сельскохозяйственными предприятиями.

Постановка задачи

Стоимость ископаемого топлива довольно высока и использование электрогенераторов на подобном топливе экономически не эффективно на сельскохозяйственных объектах. Так же у предпринимателей занимающихся животноводством есть трудности с утилизацией экскрементов животных, которые являются веществами 3 класса опасности [2]. Регламент утилизации подобных отходов описан в ГОСТ 26074-84 (СТ СЭВ 2705-80). Правильная утилизация для дальнейшего использования в качестве удобрения необходима, так как в экскрементах находится большое количество вредителей:

- Яйца, личинки глистов и прочих паразитов
- Бактерии которые могут вызвать различные инфекции
- Споры сорняков

Все эти факторы являются отличным подспорьем для внедрения биогазового комплекса.

Преимущества комбинированной биогазовой станция

Современные биогазовые станции представляют собой комплекс сооружений и технического оборудования по сбору, подаче, переработке сырья и дальнейшему накоплению биогаза. А также отводу перебroженой массы (Рис.3.).

Недостатком такого типа станции является то, что ей необходим подвод тепла и электроэнергии. Однако если использовать тепло необходимое для создания оптимального температурного режима от солнечного коллектора, а также использовать в перемешивающих и транспортирующих устройствах энергию ветра, то можно значительно сократить дополнительные расходы на собственные нужды данной станции.

В зависимости от конструкции водяная баня может быть совмещена с солнечным коллектором для упрощения конструкции.

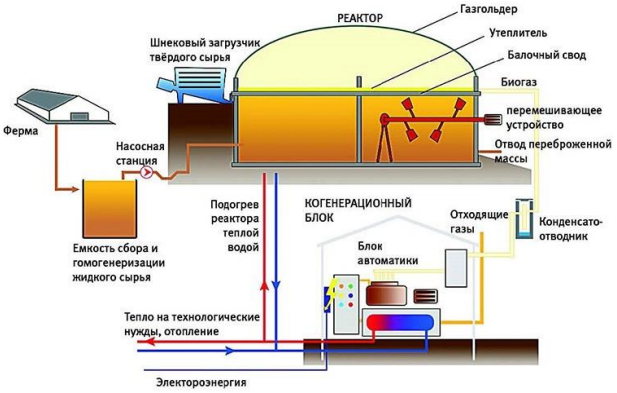


Рис.3. Схема биогазовой станции



Рис.4. Упрощенная схема биогазовой установки

Применение биогазовой установки, принцип работы

Биогаз- это вид биотоплива, который получается при брожении органических веществ.

Исходное сырье разлагают гидролизные, кислотно/ метанобразующие бактерии. Полученный газ горюч, так как содержит большое количество метана. Концентрация метана в биогазе может составлять до 90%. Это зависит от химического состава сырья.

Уже разработаны и используются на практике различные технологии получения биогаза. Эти технологии отличаются разными температурами режимами, влажностью и длительностью протекания процесса.

Сам процесс получения биогаза состоит из двух фаз, которые описал Орас Баркер. В первой фазе из сложных органических веществ с участием воды сапрофитные анаэробные бактерии образуют кислоты (уксусная, муравьиная, масляная и т.д), газы (водород, сероводород, аммиак).

Во второй фазе метано-образующие бактерии разлагают уже полученные вещества. В итоге получаем смесь газов: метана (40-90%), углекислого газа (10-50%) и примеси, составляющие ≈0,5-2% такие как азот, водород и сероводород. Затем необходимо произвести очистку биогаза для повышения удельной концентрации метана. Так же процесс анаэробного брожения подразделяют на три температурных диапазона: психрофильное брожение(15-25°C), мезофильное брожение(30-40°C), термофильное брожение(50-56°C) [3]. Они отличаются временем образования биогаза. Психрофильное брожение длиться от одного до нескольких месяцев и не требует больших затрат на поддержание температуры. Мезофильное брожение занимает около 13-20 дней. Термофильное брожение происходит за 7-10 дней, почти все болезнетворные бактерии погибают, получаемое биоудобрение имеет низкое качество по сравнению с удобрением, полученным при другом температурном режиме.

Комбинированная энергетическая система

Схема комбинированной системы на основе возобновляемой и водородной энергии представлена на рис.4. Электроэнергия с солнечных панелей или ветроустановок приходит в управляющий блок, который необходимое количество электричества подает на нагрузку, а оставшуюся часть на электролизер. Произведенные газы закачиваются в раздельные ресиверы.

Дальнейшее сжижение водорода не эффективно так как требует больших затрат, а также чистый водород может храниться достаточно долго. Далее в темное время суток или в безветренную погоду водород и кислород поступают из ресиверов в водородный генератор, для сжигания и получение электроэнергии

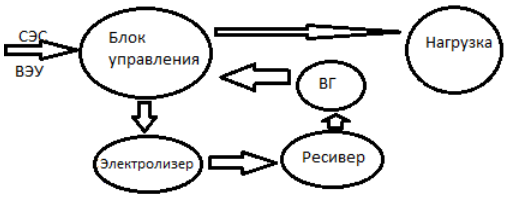


Рис.4. Схема комбинированной системы электроснабжения;

Расчет параметров станции

Усреднённое количество отходов от 1 КРС в день 25 кг. Влажность навоза достигает 70%, необходимо повысить влажности до 85%. Для малого фермерского хозяйства, имеющего 10 коров, бродильный аппарат необходим объемом 0.5 м^3 для утилизации суточных отходов. Это вызвано различной плотностью экскрементов крупно рогатого скота и необходимостью наличия 20% газового буфера. Примем время необходимое на мезофильное брожение равное 16 суткам. Тогда объем биореактора составит 10м^3 по формуле (1).

$$V = \frac{v*n}{100-20} * 100 \quad (1)$$

При увеличении влажности вес сырья составит 500 кг. Получаемый выход газа при температуре 35°C представлен в таблице 1.

Таблица 1. *Выход биогаза в зависимости от типа сырья*

Тип сырья	Выход газа (м^3 на 1 кг сухого вещества)	Выход газа (м^3 на 1 тонну при влажности 85 %)
Навоз КРС	0,250 -0,340	38-51.5
Свиной навоз	0,340 -0,580	51,5-88
Птичий помет	0,310 -0,620	47-94
Конский навоз	0,200 -0,300	30.3-45,5
Овечий навоз	0,300 -0,620	45,5-94

При сжигании 1м^3 биогаза можно получить до 2 кВт*ч. Из таблицы 1 видно, что минимальный объем выделяемого газа из 500кг навоза КРС (при 85% влажности) составит 19м^3. Ежесуточная выработка электроэнергии может составить 38кВт*ч.

Ветроустановка

Улучшение эффективности работы биогазовой установки можно достичь периодическим перемешиванием биомассы. Это можно осуществить, используя ветроустановку с вертикальной осью вращения, что позволит легко передавать вращающий момент с вала ветроустановки на вал перемешивающего устройства или использовать гидравлический погружной насос. Периодическое перемешивание осуществляет важные задачи [4]:

- Высвобождает произведённый биогаз
- Предотвращает формирование корки на поверхности и осадка
- Уравнивает температуру внутри бродильного аппарата
- Распределяет бактерии по всему объему равномерно
- Предотвращает образование пустот.

Солнечный коллектор

Образование биогаза происходит при определённых температурах, есть несколько способов по-

догрева биореактора. Можно установить трубчатые электронагреватели (ТЭНы) внутри бродильного аппарата, однако такой способ высокозатратный.

Поэтому эффективнее использовать теплообменники вдоль стенок реактора. Рабочее тело-вода, которую можно подогревать различными способами: используя уже выработанный биогаз, тепловой насос или солнечный коллектор. Способ обогрева зависит от индивидуальных особенностей конкретного объекта [5,6]. Нужно учесть, что мощность нагревательной системы не должна быть большой так как допустимая скорость нагревания субстрата составляет 1°С/ч.

Продукты биогазовой станции

Полученный биогаз можно использовать для обогрева различных сооружений, а также для получения электроэнергии. Для длительного хранения биогаза его необходимо очистить до биометана. Биометан содержит более 95% метана. Вырабатываемый шлам хорошо храниться. При больших объемах шлам сепарируют. В этом случае твёрдый шлам складируют, а жидкую составляющую подают обратно в установку для создания необходимой влажности.

Заключение

Описанные биогазовые системы имеют большой потенциал к развитию как в России, так и в других странах. Ведь помимо правильной утилизации биологических отходов полученный газ можно использовать для различных целей. Например, крупные фермы могут производить очистку биогаза до биометана и продавать. Потенциал производства биометана в России оценивается 40 млрд.м^3 в год [6]. В ряде европейских стран уже внедрены подобные установки, и они показали эффективность в сельскохозяйственной отрасли (рисунок 5.).

Использование биоэнергетики позволяет значительно сократить традиционные энергетические ресурсы. Внедрение технологий, использующих для производства биогаза отходы деревообрабатывающей промышленности, сельского хозяйства, животноводства, а также технологии по добыче и переработке торфа, способствуют развитию мировой альтернативной и возобновляемой энергетики. Для Российской Федерации использование биоэнергетических технологий позволяет более полно использовать отходы деятельности человека и значительно уменьшить выбросы жидких и твердых бытовых отходов.



Рис.5. Биометановые установки в Европе;

Список литературы

1. Росстат, Всероссийская сельскохозяйственная перепись 2016 г
2. Федеральный классификационный каталог отходов, утвержденный Приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (в ред. от 28.11.2017)
3. Форстрес К.Ф., Экологическая биотехнология. 2002г
4. Шеина А.О., Биохимия процесса производства биогаза как альтернативного источника энергии. 2009 г.
5. А.Самородов, М.Юлкин, Возможности производства биометана в России., Санкт-Петербург 2015г.
6. *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018 //Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой /* Севастополь: Сев ГУ. – *2018. С. 637-642.*

References

1. Rosstat, All-Russian Agricultural Census 2016
2. Federal classification catalog of waste approved by Order of Rosprirodnadzor dated May 22, 2017 No. 242 (as revised on November 28, 2017)
3. Forstres K.F., Environmental Biotechnology. 2002y
4. Sheina A.O., Biochemistry of the biogas production process as an alternative energy source. 2009 year
5. A. Samorodov, M. Yulkin, Possibilities of biomethane production in Russia., St. Petersburg 2015.
6. Environmental, industrial and energy safety - 2018 // Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. ed. L. I. Lukina, N. A. Bezhina, N. V. Lyamina / Sevastopol: Northern GU. - 2018.S. 637-642

УДК 621.3.064.35

Особенности опробования напряжением воздушной линии с шунтирующими реакторами

С.А. Ситников[1], И.В.Симонов[2], Ю.В. Безруков[2], В.Н. Балабай[2], Т.А.Львов[2]

[1]Филиал АО «СО ЕЭС», «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя», Оперативно-диспетчерская служба, 295034, Россия, г. Симферополь, sitnikovsa@tavrida.so-ups.ru
[2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 19.10.2020 г.; после доработки 21.10.2020 г.

Аннотация

В цикле АПВ при опробовании напряжением воздушной линии с шунтирующими реакторами возникает апериодическая составляющая тока включения.

Ключевые слова: апериодическая составляющая тока, постановка под напряжение, автоматика управления

Peculiar properties features of voltage testing of the overhead line with shipping reactors

S.A. Sitnikov[1],I.V.Simonov[2], U.V. Bezrukov[2], V.H.Balabai[2], T.A.Lvov[2]

[1]«SO UPS», JSC, Regional Dispatching Office of Crimea Republic and Sevastopol Power System, Department of Operational Dispatching, Simferopol, 295034, Russian Federation, sitnikovsa@tavrida.so-ups.ru
[2]FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,Sevastopol, 299053, Russia.

Received 19.10.2020 y.; received in final form 21.10.2020 y.

Abstract

In the cycle of automatic repeated switching on when testing the voltage of the overhead line with shunt reactors, an aperiodic component of the switching current occurs.

Keywords: aperiodic current component, voltage on method, circuit control

Введение

Данная работа стала возможной благодаря проведению исследований переходных процессов при постановке под напряжение воздушной линии с шунтирующими реакторами (далее – ВЛ с ШР) в различных режимах. Для проведенных расчетов была использована верифицированная математическая модель (далее – модель) ВЛ с ШР, созданная в среде моделирования MATLAB [1].

В данной работе описаны причины возникновения апериодической составляющей в токе включения, а также описана идея метода постановки под напряжение ВЛ с ШР, обеспечивающая отсутствие апериодической составляющей. Проведя моделирование различных режимов постановки под напряжение с последующим отключением ВЛ с ШР в математической модели, были сделаны следующие выводы:

- величина частоты свободного процесса зависит от степени компенсации емкости линии индуктивностью шунтирующих реакторов, что, в свою очередь, оказывает влияние на переходный процесс при последующем

автоматическом опробовании;

- продолжительность влияния апериодической составляющей на ток включения варьируется от 3 до 5 секунд, при этом зависит она как от величины индуктивности шунтирующих реакторов, так и от величины разности напряжений на контактах линейного выключателя в момент коммутации;

Опираясь на вышеуказанные факты, был разработан метод постановки под напряжение ВЛ с ШР, позволяющий исключить возникновение апериодической составляющей в токе в цикле АПВ. Идеей данного метода является возможность «синхронизации» напряжения сети и напряжения свободного процесса ВЛ с ШР, имеющего собственную частоту.

Метод «синхронизации» свободного процесса в воздушной линии с шунтирующими реакторами

Метод «синхронизации» свободного процесса в воздушной линии с шунтирующими реакторами и напряжения на шинах подстанции схож с процессом точной синхронизации генератора [2]. Но в данном методе есть свои особенности:

- увеличение угла между векторами напряжений свободного процесса в линии и на шинах подстанции, и напротив уменьшение у генератора и сети;
- постоянная частота синусоидального тока свободного процесса отличная от частоты сети, в отличие от изменения частоты генератора, подгоняемого до синхронной с системой;
- уменьшение модуля вектора напряжения свободного процесса в линии, и напротив поддержание у генератора на уровне системы;
- неизменный период биений разности потенциалов на контактах выключателя опробующего линию, при неизменной частоте сети, и при этом увеличение у генераторного выключателя.

Сложность данного метода в отличие от синхронизации генератора в том, что мы не можем никак воздействовать на параметры свободного процесса в линии (частоту, модуль напряжения).

На рис. 1 приведена расчётная осциллограмма разности напряжений на контактах линейного выключателя. Момент замыкания контактов линейного выключателя должен приходиться на затухание разности потенциалов, то есть при разности синусоид напряжений равной нулю. Назовем момент замыкания контактов линейного выключателя, обеспечивающий отсутствие апериодической составляющей тока включения, моментом успешного включения (далее – МУВ).

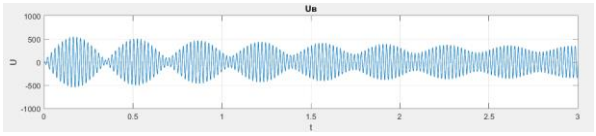


Рис. 1. График разности синусоид напряжений на контактах выключателя

Тогда, опираясь на расчетные осциллограммы процесса, показанные на рис. 1, и на указанные выше особенности, изобразим диаграмму, поясняющую принцип работы метода нахождения МУВ. На рис. 2 показаны периоды напряжения биений (T_i), которые равны между собой; ΔT - половина периода биений, симметричная с некой погрешностью расчета нисходящей части напряжения биений ($\Delta T + t_з$); ΔU_i - модуль напряжения биений; $\phi_{ош}$ - угол ошибки, допускающий погрешность при расчете момента включения; $t_{вв}$ - собственное время включения выключателя.

Время, через которое необходимо подать разрешающий сигнал на включение выключателя, после прохождения максимума амплитуды напряжения $T_{упр}$ (время упреждения) будет равно:

$$T_{упр} = \Delta T - t_з - t_{вв} \quad (1)$$

где $t_з$ - время запаса, определяемое погрешностью вычислений ΔT.

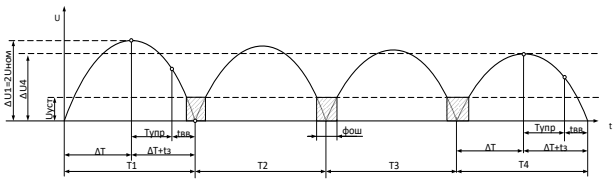


Рис. 2. Описание расчета выдержки времени для отдачи команды на включение

Напряжение биений можно описать формулой:

$$U_б = \left| \sin\left(\frac{\omega_ш - \omega_л}{2} t \right) \right| \quad (2)$$

С помощью непрерывного расчета функции

напряжения биений можно непосредственно рассчитать момент включения, учитывающий собственное время включения выключателя, и позволяющий замыкать контакты выключателя с заданной погрешностью по времени без возникновения апериодической составляющей тока.

На рис. 3 приведены осциллограммы, снятые с модели ВЛ с ШР, при помощи измерения модуля разности потенциалов на контактах линейного выключателя (верхняя осциллограмма) и расчета напряжения биений $U_б$ по формуле (2) (нижняя осциллограмма).

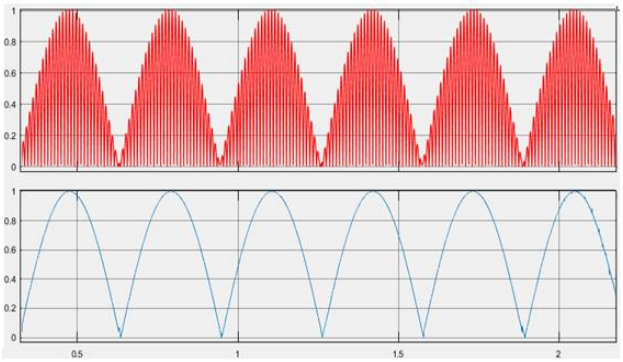


Рис. 3. Осциллограммы, полученные путем моделирования процесса отключения ВЛ с ШР

Из рис. 3 видно, что применяемая формула (2) позволяет с необходимой точностью рассчитать напряжение биений путем измерения частот напряжений на шинах подстанции и свободного процесса в линии.

Для достижения поставленной цели по обеспечению безаварийной постановки под напряжение с последующим отключением ВЛ с ШР, необходимо разработать алгоритм работы АУВ в цикле АПВ при наличии на линии свободного процесса. Для решения данной задачи в АУВ можно добавить блок управления МУВ.

Необходимые пусковые органы (ПО) для работы блока управления МУВ:

- сигнал на включение выключателя от АПВ;
- фиксация отключенного положения контактов линейного выключателя;
- фиксация включенного положения контактов выключателей шунтирующих реакторов;
- ПО максимального напряжения линии;
- ПО контроля наличия напряжения на шинах.

А так же измерительные органы (ИО):

- ИО контроля разности модулей напряжений на шинах и линии;
- ИО контроля разности частоты синусоидального напряжения на шинах и линии.

На рис. 4 представлена схема поясняющая принцип получения информации блока управления МУВ в составе АУВ.

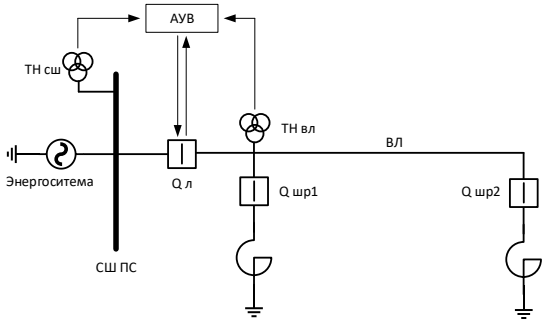


Рис. 4. Схема, поясняющая принцип управления

Для определения момента включения линейного выключателя необходим логический блок, обеспечивающий расчет времени от поступившего сигнала от АПВ до непосредственной подачи команды на включение. Тем самым данный блок должен обеспечивать выдержку времени, необходимую для замыкания контактов с заданным $\phi_{ош}$. Эту выдержку времени назовем – временем упреждения, расчет которой произведен по формуле (1).

Структурная схема данного блока приведена на рис. 5. Пунктирной линией выделена область алгоритма, в которой будет производиться расчет МУВ и выходным сигналом, которой является команда на включение выключателя.

Для обеспечения быстродействия алгоритма при выдаче управляющего воздействия, будет производиться фиксация отключенного положения контактов линейного выключателя. Тем самым при появлении команды на включения от АПВ будет иметься заранее рассчитанная выдержка времени на включение.[3-7]

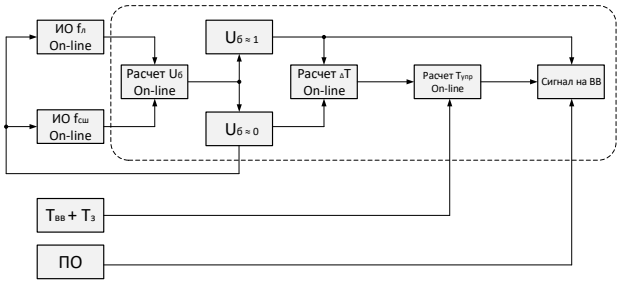


Рис. 5. Структурная схема блока расчета выдержки времени на подачу команды включения выключателя

Далее алгоритм определяет моменты, при которых $U_б = 0$ и $U_б = 1$, тем самым позволяя определить ΔT, с помощью которого по формуле (1) находится $T_{упр}$. И при наличии сигналов от всех пусковых органов, а так же сигнала $U_б = 1$ запускается отсчет выдержки времени $T_{упр}$ и подается команда на включение выключателя.
Графически этот процесс показан на рисунке ниже, здесь представлены осциллограммы сигналов, рассчитанных с помощью логических блоков, получающих измерения с модели ВЛ с ШР, выполненной в среде моделирования MATLAB

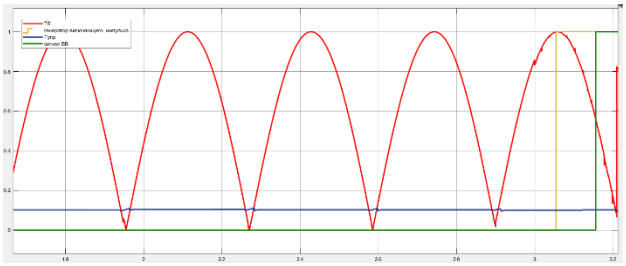


Рис. 6. Осциллограмма результата работы блока управления МУВ

На рис. 6 можно видеть: расчетные напряжения биений, а также величину времени упреждения команды включения, ПО максимума напряжения биений ($U_б \approx 1$) и расчетный момент подачи команды на включение выключателя с учетом собственного времени включения выключателя (сигнал ВВ).

Данный блок управления МУВ в составе АУВ позволяет определить затухание напряжения биений на контактах линейного выключателя и выдать управляющий сигнал на включение после команды от АПВ.
Эффективность данного метода продемонстрируем на рисунках ниже

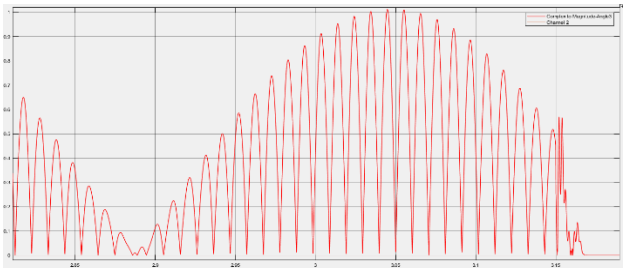


Рис. 7. Результат расчета разности напряжений на системе шин и на линии при включении в Uб ≠ 0

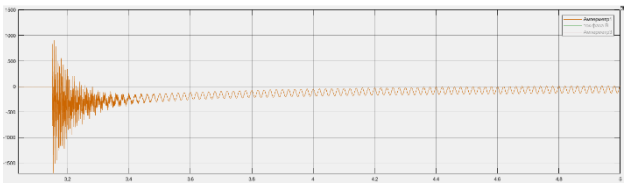


Рис. 8. Осциллограмма тока через линейный выключатель при включении в $U_б \neq 0$

В данном режиме было произведено включение с недопустимой погрешностью угла ошибки, что привело к включению с некоторой величиной разности потенциалов на контактах линейного выключателя и, как следствие, к возникновению апериодической составляющей в момент включения на уровне 500 А.

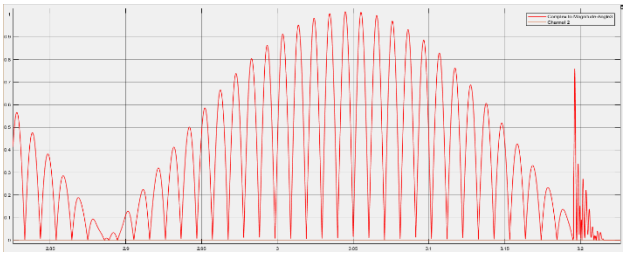


Рис. 9. Результат расчета разности напряжений на системе шин и на линии при включении в $U_б = 0$

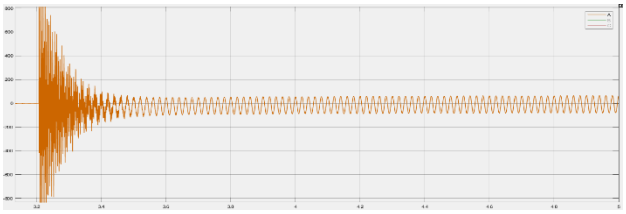


Рис. 10. Осциллограмма тока через линейный выключатель при включении в $U_б = 0$

В представленном на рис. 9 и рис. 10 режиме момент включения выключателя рассчитывался при помощи блока управления МУВ, реализованного в MATLAB. Как можно увидеть, реализация данной логики позволила замкнуть контакты линейного выключателя без возникновения апериодической составляющей, что обеспечило возможность последующего безаварийного отключения.

Выводы

Таким образом, в данной работе сформулирован один из наиболее перспективных методов устранения апериодической составляющей тока включения воздушной линии с установленными

по концам шунтирующими реакторами.

Данный метод был проверен с помощью моделирования переходных процессов в различных режимах на верифицированной математической модели в среде моделирования MATLAB. Так же была вынесена оценка эффективности данного метода путем сравнения его результатов с режимом включения в произвольный момент времени, когда $U_б \neq 0$.

Список литературы

1. Ситников С.А., Климентьев А.М. Исследование переходных процессов отключения ВЛ 500 кВ при не успешном повторном включении. Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования»/ «Лик». – Новочеркасск, 2018. – 592 с.
2. Беркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А. Автоматика энергосистем/ Энергоатомиздат/ Москва, 1991. – 238 с.
3. Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими реакторами/ Приложение 1 к распоряжению ОАО «ФСК ЕЭС» от 10.12.2012 № 838р. – 30 с.
4. В.Е. Качесов, Д.В. Качесов О негативном влиянии апериодической составляющей тока на отключение линейных выключателей: Статья является расширенной версией доклада, представленного на Международной конференции по переходным процессам в электрических системах, «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» № 9/2012, - 8 с.
5. Епифанов А.М., Пугаченко З.Е., Коновалов А.А. Возникновение апериодической составляющей при отключении реактированных ЛЭП и методы борьбы с ней. – Москва, 2016.-29 с.
6. Наумкин И.Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500–1150 кВ. / «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» № 10, 2012.
7. Энергетические установки и технологии / Севастополь: Сев ГУ 2019. Т. 5. № 3. С. 53-61.

References

1. Sitnikov S.A., Klimentyev A.M. Study of transition processes of disconnecting power line 500kv with not successful repeated inclusion. Cybernetics of energy systems: Collection of materials of the XL session of the scientific seminar on the topic “Diagnostics of energy equipment” / “Face”. - Novocherkassk, 2018 .-- 592 p.
2. Berkovich M.A., Gladyshev V.A., Semenov V.A. Automation of energy systems / Energoatomizdat / Moscow, 1991 .-- 238 p.
3. Methodology for calculating and selecting means for tripping SF6 circuit breakers during switching of power transmission lines and busbars equipped with shunt reactors / Appendix 1 to the order of JSC FGC UES dated 10.12.2012 No. 838p. - 30 s.
4. V.E. Kachesov, D.V. Kachesov On the negative impact of the aperiodic component of current on the tripping of linear circuit breakers: This article is an extended version of the report presented at the International Conference on Transients in Electrical Systems, ELECTRICITY No. 9/2012, - 8 p.
5. Epifanov A.M., Pugachenko Z.E., Konovalov A.A. The occurrence of an aperiodic component when disconnecting reacted power lines and methods of dealing with it. - Moscow, 2016.29 p.
6. Naumkin I.E. Emergency failures of gas-insulated circuit breakers during switching of compensated OHL of 500–1150 kV. / “ELECTRICITY” No. 10, 2012.
7. Power plants and technologies / Sevastopol: Sev GU 2019. T. 5. No. 3. P. 53-61.

УДК 620.92

Влияние насыщения трансформаторов тока на работу РЗА

П.Д. Шагимарданов [1,2], П.А. Звада[3], И.О. Таран[4], Е.Г. Какушина[5], Е.Р. Портнова[6]
Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ, ул. Шполянской ул., 11,
г.Симферополь,295000, Россия,
[1]ShagimardanovPD@gmail.com, [3]pzvada@ncfu.ru ,[4]tio260996@gmail.com
ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь,355029, Россия
[2] ShagimardanovPD@gmail.com
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, [5]littie@mail.ru, [6]Portnova_katya@mail.ru

Статья поступила 05.11.2020 г.; после доработки 09.11.2020 г.

Аннотация

Несмотря на то, что эффект насыщения трансформаторов тока известен давно, в настоящее время данный вопрос остается актуальным. В данной статье рассматриваются организационно-технические мероприятия, а также современные инструменты фиксации насыщения ТТ, с целью исключения излишнего срабатывания РЗА.

Ключевые слова: насыщение трансформаторов тока, релейная защита

The effect of saturation of current transformers on the operation of relay protection and automation equipment

P.D. Shagimardanov [1,2], P.A. Zvada[3], Taran I.O.[4], E. G. Kakushina[5], E. R. Portnova[6]
Branch of JSC«SO UPS», JSC Chernomorskoye RDU,
11 Shpolyanskaya st., Simferopol, 295000, Russia.
[1]ShagimardanovPD@gmail.com, [3]pzvada@ncfu.ru ,[4]tio260996@gmail.com
North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation,
Stavropol, 355029, Russia.
[2] ShagimardanovPD@gmail.com
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[5]littie@mail.ru, [6]Portnova_katya@mail.ru

Received 05.11.2020 y.; received in final form 09.11.2020 y.

Abstract

Despite the fact that the saturation effect of current transformers has been known for a long time, currently this issue remains relevant. This article discusses organizational and technical measures, as well as modern instruments for fixing CT saturation, in order to exclude excessive relay protection operation.

Keywords: saturation of current transformers, relay protection

Введение

Работы по изучению проблем насыщения трансформаторов тока (далее ТТ) в переходных режимах ведутся в нашей страны еще с 60-х годов прошлого века, однако, до настоящего времени данный вопрос является актуальным.

Данный интерес обусловлен влиянием переходных режимов на метрологические свойства трансформаторов тока, что как следствие приводит к не правильной работе устройств релейной защиты и автоматики (далее УРЗА). Реализация инновационных проектов в области энергетики требует первоначальных значительных затрат [7].

К наиболее крупным авариям, вызванными насыщением трансформаторов тока апериодической составляющей тока короткого замыкания и

наличием остаточного намагничивания сердечника являются:

– Излишняя работа устройств релейной защиты на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС 04.11.2014 г., которая привела к дальнейшему развитию аварии вплоть до отделения части ОЭС Юга от ЕЭС России;
– Излишняя работа дифференциальной токовой отсечки на ПС 500 кВ Тамань, вследствие появления небаланса в токовых цепях, что привело к отделению энергосистемы Республики Крым и переходу на изолированную работу.

В 2017 г. ОАО «ВНИИР» проведены испытания работы релейной защиты ряда известных производителей в условиях одного и того же набора схемно-режимных ситуаций при насыщении трансформаторов тока в программно-аппаратном комплексе моделирования энергосистем в реальном времени.

В процессе испытаний было выявлено, что при внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, замедляется срабатывание дифференциальной защиты линии (далее ДЗЛ), дифференциально фазной защиты (ДФЗ) (особенно при трехфазных замыканиях), первой ступени дистанционной защиты (далее ДЗ), а также первой ступени токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП). При внешних КЗ возможно излишнее срабатывание ДЗЛ, ДФЗ (преимущественно при трехфазных замыканиях) и ДЗ, включенных на ток линии.

По статистике, примерно в 5 % технологических нарушений, причиной отказов является неправильная работа измерительных трансформаторов [1,9]. Оптические трансформаторы тока не подвержены влиянию насыщения, однако, основную часть измерительных трансформаторов составляют традиционные трансформаторы. При глубоком насыщении такие трансформаторы [10]. дают искаженный измеренный сигнал, что и приводит к снижению чувствительности и избирательности защит.

Насыщение ТТ

Работа трансформатора тока характеризуется уравнением намагничивающих сил (1):

$$I_1 \cdot W_1 + I_2 \cdot W_2 = I_{нам} \cdot W_1 \qquad (1)$$

Данной выражение иллюстрирует, что первичный ток во вторичную обмотку трансформируется не полностью. Оставшаяся его часть уходит на формирование тока намагничивания, который создает рабочий магнитный поток в сердечнике ТТ. Данное явление наблюдается как в установившихся режимах, так и в переходных режимах. В переходном процессе каждая составляющая, протекая по первичной обмотке трансформатора тока, делится на две части: одна трансформируется во вторичную обмотку, а вторая идет на намагничивание сердечника. В связи с тем, что скорость изменения апериодической составляющей гораздо меньше скорости изменения переменной составляющей, а периодическая составляющая плохо трансформируется во вторичную цепь и большая ее часть идет на насыщение сердечника. Это, в свою очередь, ухудшает трансформацию периодической составляющей во вторичную цепь и также повышает долю этого тока в токе намагничивания. Возникает так называемое, «подмагничивающее действие». Учитывая, что в сердечниках ТТ во многих случаях имеет место остаточная магнитная индукция, которая сохраняется в течение длительного времени (дни, недели и даже месяцы), наихудший режим работы возникает в случае, если остаточный магнитный поток в сердечнике совпадает по направлению с магнитным потоком, создаваемым апериодической составляющей тока намагничивания.

В результате трансформатор тока начинает работать в режиме насыщения, то есть намагничивающий ток растет существенно быстрее рабочего тока магнитного потока.

На рисунке 1 представлен график затухающего периодического изменения тока, на котором можно наблюдать, что при насыщенном состоянии измерительного трансформатора ток отличается по амплитуде. Действующее значение тока при насыщении ТТ значительно ниже идеального, и если принять во внимание, что токовые релейные защиты срабатывают именно на него, то можно сделать вывод о причинах неправильной работы РЗА в случаях насыщения.

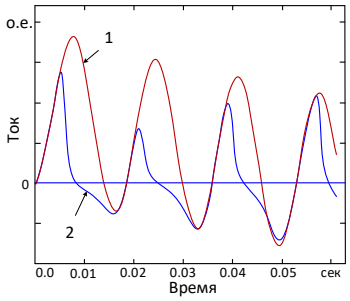


Рис. 1. Форма сигналов тока, где 1 – вторичный ток идеального ТТ, 2 – ток с учетом насыщения ТТ.

Организационно-технические мероприятия

Одной из причин возникновения аварий на Ростовской АЭС и ПС 500 кВ Тамань являлось отсутствие в нормативно-технической документации РФ требований о необходимости обеспечения техническими характеристиками ТТ и подключенных к ним устройств РЗ, правильной работы устройств РЗ при коротких замыканиях, в том числе при возникновении апериодической составляющей тока.

Данные требования в данный момент указаны в Правилах технологического функционирования электроэнергетических систем, утвержденных Постановлением Российской Федерации от 13 августа 2018 №937, а также в предварительном стандарте ПНСТ 283-2018 «Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока», введенный в действие с 30 октября 2018 №51-пнст Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

1 января 2019.

Методика определения времени до насыщения трансформатора тока указана в [2] и необходима для:

- выбора трансформаторов тока с учетом требований производителей устройств релейной защиты при новом строительстве, реконструкции и техническом перевооружении объектов электроэнергетики;
- выбора устройств релейной защиты при создании новых или модернизации существующих устройств релейной защиты на существующих трансформаторах тока;
- проверки правильности функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах при коротких замыканиях на существующих трансформаторах тока.

В [2] выделены следующие методы расчетов времени до насыщения измерительных ТТ:

- Аналитический метод;
- Графический метод по паспортным данным;
- Графический метод с использование ВАХ ТТ;
- Графический метод с использованием характеристик намагничивания.

В целях исключения ложной работы устройств РЗА при переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ рекомендуется:

Для существующих комплексов и устройств РЗА выполнить расчет времени до насыщения ТТ и на основании этих расчетов провести анализ необходимости разработки мероприятий, исключающих риски неправильной работы РЗА при насыщении ТТ.

При строительстве и комплексном техническом перевооружении объектов электроэнергетики на этапе выполнения проектной документации произвести выбор ТТ, который гарантированно будет обладать характеристиками, обеспечивающими правильную работу устройств РЗА в переходных режимах.

В случае модернизации устройств РЗА без замены ТТ, определиться с требованиями минимально необходимого времени достоверного измерения значений тока ТТ.

Программно-технические методы борьбы с последствиями насыщения ТТ

Современные авторы научных работ и производители устройств РЗА предлагают свои методы борьбы с последствиями насыщения ТТ.

Так некоторыми производителями были предложены способы блокировки защит при внешних коротких замыканиях:

- Блокировка, реализованная на сравнении направления токов в ветвях выключателей;
- Блокировка быстродействующей ступени дистанционной защиты по факту фиксации внешнего КЗ.

К примеру, в работе [3] предлагается использовать алгоритмы, отвечающие за адаптацию устройства РЗА в условиях переходного режима КЗ с насыщением ТТ. В работе выделяются следующие алгоритмы:

- Гармоническое торможение в дифференциальной защите трансформатора;
- Применение детекторов насыщения ТТ;
- Сегментация и восстановление искаженного сигнала;
- Введение дополнительной зоны торможения ДЗ.

В работе [4] предлагается использование алгоритма восстановления сигнала. Для этого используется эквивалентный тепловому эффекту действующего значения сигнал, соответствующий неискаженной форме первичного тока.

В данной методике используется алгоритм двух выборок, который широко распространён в технике цифровой обработки сигналов и не требуется значительных затрат машинного времени, позволяющий использовать начальный момент времени восстановленного сигнала, когда сердечник измерительного трансформатора не вошел в насыщение и сигнал еще не искажен

[5,6].

Можно классифицировать методы борьбы с насыщением магнитной систем [8] по следующим признакам: блокировка защит от неселективной работы не зависимо от факторов, лежащих в основе блокировки, и адаптация алгоритма к условиям насыщения. При этом в основе данных двух групп лежит множество способов и алгоритмов сегментации факта насыщения магнитной системы трансформаторов тока или косвенных факторов являющимися неотъемлемыми спутниками данного явления.

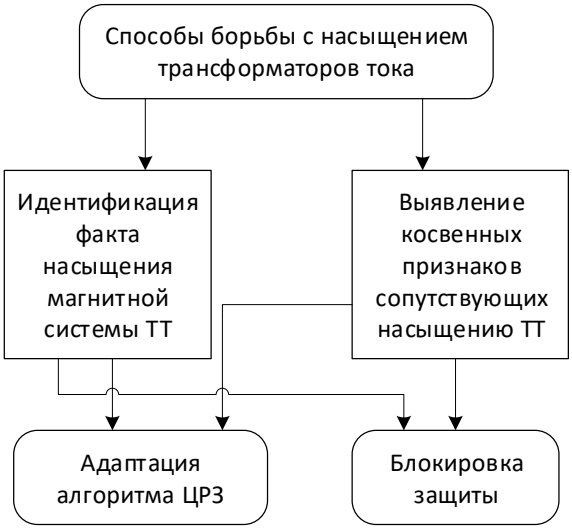


Рис. 1. Классификация способов борьбы с насыщением магнитной системы трансформаторов тока

Также необходимо отметить существование в режимах работы электрических сетей ситуаций с заведомо известным временем возникновения фактора, негативно влияющего на работу различных защит. В этих случаях защиты заблаговременно блокируются или изменяется набор уставок соответствующих новой ситуации в режиме работы сети. Например, применение устройств продольной компенсации реактивной мощности на линиях электропередач. Данная ситуация как правило не вызывает насыщений магнитной системы трансформаторов тока, но требует дополнительных подтверждающих расчетов по методике [2], так как приводит к изменению величин и характера тока замыкания в зависимости от места возникновения.

Выводы

В данной статье был проведен краткий обзор современных тенденций и способов по борьбе с последствиями насыщения измерительных трансформаторов тока с целью предотвращения ложного срабатывания устройств релейной защиты и автоматики.

Выполнена классификация способов борьбы с насыщением магнитной системы трансформаторов тока.

В результате анализа способов предотвращения влияния насыщения магнитной системы трансформаторов тока на селективность защит необходимо отметить тренд к развитию в большей степени методов, основанных на развитии и увеличении мощностей электронно-вычислительных машин в части повышения объемов и скорости обрабатываемой информации, позволяющих открывать новые возможности обработки сигналов, поступающих с измерительных устройств. Данный факт активно используется многими авторами и в целом позволяет повысить метрологических характеристик существующих измерительных систем, а также соблюсти предъявляемые требования по быстродействию и селективности комплексов релейных защит и автоматик.

Список литературы

1. Годовой отчет ОАО «ФСК ЕЭС» за 2010 год [Электронный ресурс]. www.fsk-ees.ru/upload/docs/fsk_ees_ru_1108/production/improvement.html (Дата обращения: 08.08.2019)
2. ГОСТ 58669-2019 Национальный стандарт Российской Федерации Единая энергетическая система и изолированноработающие энергосистемы. Релейная защита. трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях
3. Атнишкин А.Б. Гармоническое торможение в дифференциальной защите трансформатора Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук
4. Звада П. А. Метод восстановления сигнала для повышения производительности цифровой релейной защиты / Д. С. Тучина, Т. В. Стребкова, А. В. Миронов// 2-я Международная молодежная научно-техническая конференция по релейной защите и автоматике (РЗА)
5. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.:Энергоатомиздат, 2007. С. 549
6. Никитин А.А. Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле: тескт лекций /А.А. Никитин// – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2014. – 240 с.
7. Какушина Е.Г. Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем /Якимович Б.А., Кувшинов В.В.,

Кузнецов П.Н., Соломенникова С.И.//Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 4. С. 55-60.
8. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
9. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
10. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.

References

1. Annual report of JSC "2010" 2010 2010 2010 [electronic resource]. www.fsk-ees.ru/upload/docs/fsk_ees_ru_1108/production/improvement.html (accessed: 08.08.2019)
2. GOST 58669-2019 national standard of the Russian Federation unified energy system and isolated power systems. Relay protection. current transformers are measuring inductive with a closed magnetic conductor for protection. Guidelines for determining the time to saturation in short circuits
3. Anichkin A. B. Harmonic inhibition in differential transformer protection the Dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences
4. Zvada P. A. signal recovery Method for improving the performance of digital relay protection / D. S. Tuchina, T. V. strebkova, A.V. Mironov/ / 2nd international youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RZA) Shneerson E. M. Digital relay protection. - M.: Energoatomizdat, 2007. 549 p.
5. Zvada P. A. signal recovery Method for improving the performance of digital relay protection / D. S. Tuchina, T. V. strebkova, A.V. Mironov // 2nd international youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RZA)
6. Schneerson E. M. Digital relay protection, Moscow: Energoatomizdat, 2007, 549 p.
7. Kakushina E. G. Technical and economic aspects of the development of Autonomous solar energy systems / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Kuznetsov P. N., Solomennikova S. I. // Power installations and technologies. 2018. Vol. 4. No. 4. pp. 55-60.
8. Vologdin S. V. Analysis of various scenarios of energy supply to the Crimea, taking into account the modes of operation of a solar power plant / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Abdali L. M., Kakushina, E. G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 229-234
9. Guryev V. V. Development of renewable energy sources in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kakushina E. G., Yakimonovich B. A., Kuvshinov V. V. // Power installations and technologies-2019. Vol. 5. No. 2. pp. 90-93.
10. Zaichenko V. M. Directions of energy development /Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Makushina E. G., Badulin S. A.//Energy and technology. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-619.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.92

Функционирование релейной защиты энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь, анализ неправильной работы и методы ее устранения

А.Г. Балла[1], В.С. Скопинский[2], И.В. Симонов [2], Е.В. Новак [2], Б.О. Ленивенко [2]
[1]Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ, Шполянской ул., д. 11, г. Симферополь, 295000, Россия.
Balla-AG@tavrida.so-ups.ru
[2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,г. Севастополь, 29905

Статья поступила 08.10.2020 г.; после доработки 12.10.2020 г.

Аннотация
Релейная защита и автоматика очень важный аспект в поддержании энергосистемы в нормальном, устойчивом режиме, неправильная работа которой, усугубляет режимы.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, анализ неправильной работы релейной защиты и автоматики

The functioning of the relay protection of the power system in the Republic of Crimea and the city Sevastopol, the analysis of malfunction and methods for its elimination

A. G. Balla[1], V.S. Skopinskiy[2], I.V Simonov [2], E.V. Novak [2], B.O. Lenivenko [2]
[1]Branch of JSC "SO UES" Chernomorskoye RDU, Shpolyanskaya St., 11, Simferopol, 295000, Russia.
Balla-AG@tavrida.so-ups.ru
[2]FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,Sevastopol, 299053, Russia.

Received 08.10.2020 y.; received in final form 12.10.2020 y.

Abstract
Relay protection and automation is a very important aspect in maintaining the power system in a normal, stable mode, the malfunctioning of which aggravates the modes.

Keywords: relay protection and automation, analysis of the malfunctioning of relay protection and automation

Введение

С появлением электричества жизнь человечества значительно улучшилась. На сегодняшний день тяжело представить жизнь без электрической энергии, которая дарит нам комфорт и большие возможности, для повышения качества которой осуществляются реконструкция действующих и построение новых электростанций, ввод нового оборудования, построение новых линий электропередачи, также регулярно модернизируются устройства релейной защиты и автоматики при технологическом присоединении объектов электроэнергетики, при строительстве (реконструкции, техническом перевооружении модернизации), а также по заданию ДЦ. В уточнение вышесказанному заменяются электромеханические и микроэлектронные устройства на микропроцессорные.

С каждым годом наблюдается тенденция снижение количества устаревших устройств,

так, за период 2019 – 2020 год в связи с реконструкцией было заменено 67 устройств на микропроцессорные.

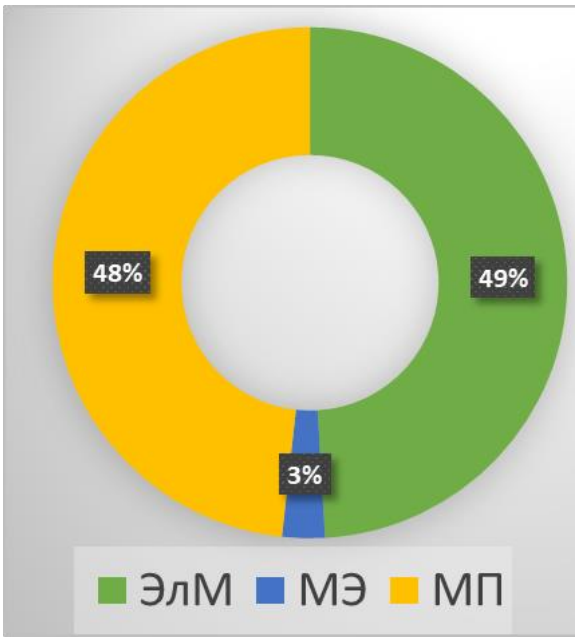


Рис. 1. Количество УРЗА 110-220 кВ в ОЗ ЧРДУ

На рисунке (1) видно, что в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополь (далее – Крымская ЭС) [1-5] преимущественно электромеханические и микропроцессорные устройства, в свою очередь у микропроцессорных устройств есть ряд значительных преимуществ:

- реализация новых принципов действия, улучшения характеристик при использовании традиционных принципов действия;
- малые массогабаритные показатели;
- низкие значения потребляемой мощности по цепям переменного тока и напряжения, а также оперативного тока;
- удобство при наладке и эксплуатации;
- высокий коэффициент готовности;
- многозадачность;
- наличие систем самодиагностики выполняющую проверку целостности исполняемых программ и данных;
- наглядность;
- точность измерения;
- терминалы защит подключаются к системе SCADA, на которой отображается вся схема подстанции, значения нагрузок по каждому присоединению, напряжение на шинах подстанции, а также фиксация в реальном времени возникших аварийных ситуаций.

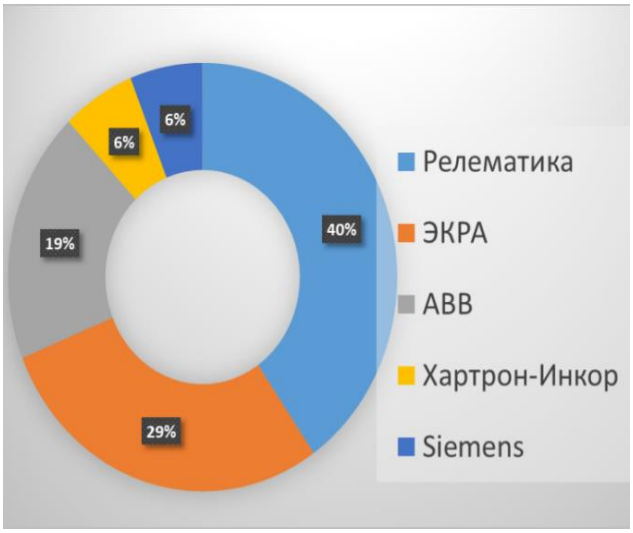


Рис. 2. Распределение оснащенности микропроцессорными терминалами по производителям

Однако какое бы ни было устройство, всегда есть вероятность его неправильной работы.

Технический учет и анализ функционирования РЗА

В соответствии с требованием пункта 7 к Приказу Минэнерго России от 08.02.2019 №80 «Об утверждении Правил технического учета и анализа функционирования релейной защиты и автоматики и о внесении изменений в приказ Минэнерго России от 23 июля 2012 г. №340 «Об утверждении перечня предоставляемой субъектами электроэнергетики информации, форм и порядка ее предоставления» технический учет и анализ функционирования устройств (комплексов) РЗА должны осуществляться субъектом оперативно-диспетчерского управления в отношении:

a) устройств (комплексов) РЗА ЛЭП, оборудования напряжением 110 кВ и выше и функции РЗА, реализованных в указанных устройствах;
b) устройств (комплексов) РЗА, для которых расчет, выбор или согласование параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования осуществляет субъект оперативно-диспетчерского управления, и функции РЗА, реализованных в указанных

устройствах (комплексах) РЗА;

c) устройств автоматической частотной разгрузки;

d) устройств (комплексов) противоаварийной и режимной автоматики, установленных в диспетчерских центрах субъекта оперативно-диспетчерского управления, собственником или иным законным владельцем которых является данный субъект оперативно-диспетчерского управления, и функций РЗА, реализованных в указанных устройствах (комплексах) РЗА» [1, 2].

В ходе технического учета осуществляется анализ работы устройств (комплексов) функций РЗА и осуществляется на его основе оценка работы устройств. Таким образом оценку работы устройств классифицируют на:

- правильная;
- неправильная:
  - отказ;
  - излишняя работа;
  - ложное;
  - допущенное неправильное срабатывание или несрабатывание.

Анализ неправильной работы УРЗА

Назначением релейной защиты является скорейшее отключение поврежденного элемента или участка энергосистемы от неповрежденных. Если повреждение не грозит немедленным разрушением защищаемого объекта, не нарушает непрерывности электроснабжения и не представляет угрозы по условиям техники безопасности, то устройства защиты могут действовать не на отключение, а на сигнал, предупреждающий дежурный персонал о неисправности.

Основными требованиями к релейной защиты являются:

- ✓ быстродействие;
- ✓ селективность;
- ✓ чувствительность;
- ✓ надежность.

Анализ неправильной работы позволяет выявлять характерные причины их неправильных срабатываний и отказов срабатывания для разработки организационных и технических мероприятий по улучшению работы устройств РЗА, предъявлять претензии проектным, монтажным, наладочным организациям, организациям-разработчикам и заводам-поставщикам.

В 2019 году произошло 436 правильных действий РЗ и АПВ ЛЭП и оборудования напряжением 110-220 кВ, при этом неправильных действий произошло 30, что составляет 6,42% от общего количества срабатываний.

В основном неправильные действия в 2019 году были связаны:

- ✓ ДФЗ – с невыполнением требований директивных документов;
- ✓ ТАПВ – с неисправностью электромеханических устройств;
- ✓ ДЗЛ – с дефектом или неисправностью аппаратуры, предназначенной для обеспечения функционирования взаимосвязанных устройств;
- ✓ ДЗ – с неисправностью электромеханических устройств;
- ✓ МТЗ – с ошибками в заданных уставках;
- ✓ ДЗШ – с неисправностью вторичных цепей.
- ✓ ДЗТ – с ошибочными и неправильными действиями персонала.

Кроме того, в 2019 году кроме правильных действий устройств РЗ на отключение ЛЭП при их повреждении, в 15 случаях ЛЭП отключались без повреждения неправильными (ложными, излишними) действиями устройств РЗ.

Методы устранения неправильной работы УРЗА

С каждым годом процент неправильной работы по технической причине «дефект или неисправность устройства РЗА по причине физического износа «старение» и другим схожим причинам будет постепенно увеличиваться, это обусловлено тем, что существуют многочисленные устройства отработавшие нормативный срок службы, выработавшие ресурс. К сожалению, не всегда в первую очередь осуществляются реконструкции (модернизации) РЗА для замены устройств, выработавших свой ресурс. При проектировании, строительстве, реконструкции, модернизации и техническом перевооружении необходимо учитывать Приказ Минэнерго России от 13.02.2019 №101 «Требования к оснащению линии электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики».

В свою очередь эксплуатация устройств РЗА должна быть организована таким образом, чтобы уменьшить риски и возможные последствия функционирования и неправильной работы УРЗА, своевременно определяя необходи-

мость технического обслуживания. При неправильной работе необходимо:

- установить причину;
- разработать технические и организационные мероприятия, направленные на устранение причин;
- разработать и реализовать мероприятия, повышающие надежность и эффективность работы РЗА;
- своевременно выдать и выполнить задание для устранения причин;
- выполнить возможности неправильной работы других устройств по аналогичной причине.

Также необходимо уделять особое внимание к организации качественного планового обслуживания, послеаварийных проверок, мониторингу технического состояния и функционирования РЗА, своевременно заменять устаревшие или неисправные элементы устройств, совершенствование и автоматизация анализа работы и возникающих неисправностей, сбоев ПО МП РЗА. Также имеет место неправильная работа, связанная с ошибками действия персонала, для уменьшения которых необходимо организовывать развитие кадрового персонала, организовывать обучение в высших учебных заведениях, своевременно обновлять материально-техническую базу, совершенствовать нормативно-техническую базу и актуализировать перечни документов.

Заключение

На сегодняшний день проблема неправильной работы рассматривается широко, со временем неправильная работа устройств уменьшается за счет повсеместной модернизации устройств РЗА путем, замены устаревших деталей, узлов. Так же одной из глобальных причин усовершенствования электрооборудования стало то, что большинство фирм производителей оборудования релейной защиты и автоматики останавливают выпуск электромеханических реле и устройств и переходят на цифровую элементную базу. В результате этого в недалеком будущем неправильная работа по причине «старение» будет крайне редким явлением, но при этом с увеличением количества МП устройств у которых следует отметить такой недостаток МП устройств, как периодические сбои в программном обеспечении. Не смотря на заявления производителей микропроцессорных защит об их стабильной работе, очень часто наблюдается сбой в работе программного обеспечения (например, периодическая перезагрузка терминала). Если в момент сбоя программного обеспечения произойдет короткое замыкание, то это может привести к повреждению оборудования, так как в этот момент присоединение находится без защиты.

Список литературы

1. Приказ Минэнерго России от 08.02.2019 №80 «Об утверждении Правил технического учета и анализа функционирования релейной защиты и автоматики и о внесении изменений в приказ Минэнерго России от 23 июля 2012 г. №340 «Об утверждении перечня предоставляемой субъектами электроэнергетики информации, форм и порядка ее предоставления», 2019, №80
2. Приказ Минэнерго России от 13.02.2019 №101 «Требования к оснащению линии электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики», 2019, №101.
3. Вестник Иж ГТУ имени М.Т. Калашникова // Ижевск, Иж ГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019. Т. 22. № 4. С. 116-123. (в перечне ВАК от 26.12.2019, № 320, включен 28.12.2018, ISSN 1813-7903).
4. Applied Solar Energy // Allerton Press, Inc. – 2019, Volume 55, Issue3, pp 153–158.
5. Энергетические установки и технологии / Севастополь: Сев ГУ 2019. Т. 5. № 3. С. 53-61.

References

1. Order of the Ministry of Energy of Russia dated 08.02.2019 No. 80 “On approval of the Rules of technical accounting and analysis of the functioning of relay protection and automation and on amendments to the order of the Ministry of Energy of Russia dated July 23, 2012 No. 340“ On approval of the list provided by the entities electric power of information, forms and the procedure for its provision. " 2019, №80
2. Order of the Ministry of Energy of Russia dated February 13, 2019 No. 101 “Requirements for equipping an electric transmission line and equipment of electric power facilities with voltage class 110 kV and higher with devices and complexes of relay protection and automation, as well as the principles of functioning of devices and complexes of relay protection and automatics ".2019, №101.
3. Vestnik Izh State Technical University named after M.T. Kalashnikov // Izhevsk, Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, 2019.T. 22.No. 4.P. 116-123. (in the list of the Higher Attestation Commission dated December 26, 2019, No. 320, included on December 28,

2018, ISSN 1813-7903).
4. Applied Solar Energy // Allerton Press, Inc. – 2019, Volume 55, Issue3, pp 153–158.
5. Power plants and technologies / Sevastopol: Sev GU 2019. V. 5. No. 3. P. 53-61.

УДК 681.5

Повышение достоверности результатов измерений отклонения напряжения в системе электроснабжения

Е.В. Гусева, В.М. Цалоев
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. alenaalena73@mail.ru

Статья поступила 19.11.2020 г.; после доработки 23.11.2020 г.

Аннотация

Рассматривается метод, позволяющий повысить достоверность результатов измерений отклонения напряжения в системе электроснабжения за счет уточнения значений конструктивных параметров элементов системы. Представлено применение метода для построения множества значений параметра электропотребителей, обеспечивающих нормируемое отклонение напряжения во вторичной цепи трехфазного трансформатора.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, отклонение напряжения, система электроснабжения.

Improving the reliability of the measurement results of voltage deviation in the power supply system

E.V. Guseva, V.M. Tsaloev
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
alenaalena73@mail.ru

Received 19.11.2020 y.; received in final form 23.11.2020 y.

Abstract

The application of the method for constructing a set of values of the parameter of electrical consumers, providing a normalized voltage deviation in the secondary circuit of a three-phase transformer, is presented.

Keywords: power quality indicators, voltage deviation, power supply system.

Введение

Стандартом [1] нормируются отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии. Нормально и предельно допускаемые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приёмников электрической энергии равны соответственно ± 5% и ± 10% от номинального напряжения электрической сети [1].

Поддержание напряжения в электрических сетях среднего и низкого напряжения в целях обеспечения требуемых отклонений напряжения на электроприемниках включает в себя решение следующих задач [2], [3], [4]:

- оценку потерь напряжения в сетях среднего и низкого напряжения;
- расчет допускаемых диапазонов изменения отклонений напряжения в различных узлах сети;
- определение и реализацию требуемых законов регулирования управляемых компенсирующих и регулирующих устройств;
- выбор регулировочных отпаек трансформаторов с ПБВ (переключаемых без возбуждения);
- оценку соответствия диапазонов изменения

отклонений напряжения требуемым;

- коррекцию существующих методов и методик, а также разработку дополнительных мероприятий по регулированию напряжения.

В настоящее время в энергосистемах и предприятиях электрических сетей используются расчетные методы анализа режимов напряжения. Эти методы позволяют при наличии специализированных программ для расчета режимов оперативно оценивать потери напряжения, рассчитывать допускаемые диапазоны отклонений в узлах и производить настройку регулирующих устройств [5], [6]. Недостатком существующих расчетных является невысокая достоверность исходной информации, используемой в расчетах (параметры элементов сети, мощности нагрузки). Кроме того, эти методы не позволяют достоверно оценить соответствие реальных диапазонов отклонения напряжений требуемым. В этой связи, возникает необходимость усовершенствования имеющихся расчетных методов.

Актуальность исследования

При эксплуатации системы электроснабжения важной задачей является повышение достоверности результатов измерений контролируемых величин, что неразрывно связано с вопросом уточнения значений параметров элементов системы, при различных режимах ее работы. Решение этого вопроса требует разработки и создания эффективных методов измерений электрических величин в системе электроснабжения. Поэтому, представленное направление исследования является актуальным.

Цель работы

Цель работы заключается в совершенствование метода измерения отклонения напряжения для случая изменения значений одного из конструктивных параметров электропотребителей системы электроснабжения.

Для достижения цели решена задача повышения достоверности результатов измерений отклонения напряжения в системе электроснабжения за счет уточнения значений конструктивных параметров элементов системы. А именно: определено множество нормируемых значений конструктивных параметров электропотребителей, при которых величина отклонения измеряемого напряжения соответствует установленному стандартом значению. С этой целью для линейной модели системы электроснабжения установить аналитическим функциональную зависимость между измеряемым напряжением и значениями конструктивных параметров электропотребителей, к которым приложено измеряемое напряжение.

Наиболее актуальным является разработка метода измерения отклонение напряжения в нормируемом диапазоне с учетом изменяющихся значений конструктивных параметров нагрузки [7], [8].

Метод основан на определении множества значений конструктивных параметров нагрузки системы элеткроснабжения, при которых измеряемое напряжение будет отклоняться в заданном диапазоне.

Математическая модель системы электроснабжения в рассматриваемом случае может быть представлена виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = f(x, e, \lambda) \\ y = \varphi(x, e, \lambda) \end{cases} \qquad (1)$$

где: $x \in R^n$ - вектор состояния;

$\lambda \in \Lambda \subset R^r$ - вектор изменяемых параметров;

$y \in R^m$ - вектор выхода;

$e \in R^q$ - вектор напряжений источников.

На вектор выхода $y(t)$ наложены ограничения $y \in Y$, отражающие требования к качеству электрической энергии. Решается задача определения множества $\Lambda^* \subset \Lambda$ такого, что $\lambda \in \Lambda^* \Leftrightarrow y \in Y$.

Множество Λ^* позволяет указать допускаемые значения параметров, при которых обеспечивается нормированное отклонение напряжения.

Предлагается метод построения множества Λ^* для случая, когда множество Y отражает ограничение на отклонения амплитуды установившегося режима от номинальной.

Рассматривается линейная электроэнергетическая система с одним источником $(q = 1)$ напряжения $e(t) = A\sin(\omega t)$ и выходом $(m = 1)$ $y = 1(t)$, представляющим напряжение на нагрузке, и варьируемым параметром λ. Для рассматриваемого случая система (1) принимает

вид [8]:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = A(\lambda)x(t) + B(\lambda)e(t) \\ y(t) = C(\lambda)x(t) \end{cases} \quad (2)$$

где: $A(\lambda), B(\lambda), C(\lambda)$ - матрицы размерностей, соответственно, $[n \times n], [n \times 1], [1 \times n]$.

Применяя к системе (2.7) прямое преобразование Лапласа получим изображение координаты выхода [9]:

$$\begin{cases} sX(s) = A(\lambda)x(s) + B(\lambda)E(s) \\ Y(s) = C(\lambda)X(s) \end{cases} \Leftrightarrow \quad (3)$$

$$Y(s) = C(\lambda)(sI - A(\lambda))^{-1}(B(\lambda)E(s) + x_0) \quad (4)$$

где: $Y(s), E(s)$ - матрицы- изображения напряжения на активной нагрузки и напряжения источника;

I - единичная матрица;

x_0 - начальный вектор состояния.

Начальные условия определяются для дифференциальных уравнений, описывающих реактивные элементы и представляют собой для индуктивной нагрузки – значения начальных токов, для емкостной нагрузки – напряжение источника. На качество установившегося режима (на показатели качества электроэнергии в установившемся режиме) начальные условия влияния не оказывают;

$s = j\omega$ - комплексная переменная преобразования Лапласа. На практике, качество электроэнергии в установившемся режиме определяется при синусоидальном напряжении на источнике / (источниках). Теоретически, для упрощения расчетов, вместо синусоидального напряжения, можно рассмотреть обобщенное гармоническое напряжение $e^{j\omega t}$. При этом, установившиеся процессы определяются переходом от уравнений в комплексной области к уравнениям во временной области, с помощью обратного преобразования Лапласа при $s = j\omega$.

$j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица;

$\omega = 2\pi f = 314\ рад/с$

$(sI - A(\lambda))^{-1}$ - обратная матрица.

Выражение (3) может быть записано в виде:

$$Y(s) = W(s,\lambda)E(s) + W_0(s,\lambda)x_0, \quad (5)$$

где:

$W(s,\lambda) = C(\lambda)(sI - A(\lambda))^{-1}B(\lambda)), W_0(s,\lambda) = C(\lambda)(sI - A(\lambda))^{-1}$

дробно-рациональная функция аргументов s и λ

Для устойчивой электроэнергетической системы в установившемся режиме напряжение на нагрузке определяется следующ им выражением [9]:

$$y(t, j\omega) = W(j\omega, \lambda)Ae^{j\omega t} \quad (6)$$

где: $Ae^{j\omega t}$ - обобщенное гармоническое воздействие.

Амплитуда напряжения на выходе определяется выражением:

$$A_{вых} = |W(j\omega, \lambda)|A \quad (7)$$

Ограничение $A_{вых\min} \le A_{вых} \le A_{вых\max}$ определяют неравенства в пространстве параметров λ.

$$A_{вых\min} \le |W(j\omega, \lambda)|A \le A_{вых\max}, \quad (8)$$

которое, в свою очередь представимо в виде систем следующих неравенств:

$$\begin{cases} |W(j\omega, \lambda)| \ge \dfrac{A_{вых\min}}{A}, \\ |W(j\omega, \lambda)| \le \dfrac{A_{вых\max}}{A}. \end{cases} \quad (9)$$

Искомое множество значений Λ^* для случая одного варьируемого параметра определяется решениями неравенств (9).

Для рассматриваемых объектов, включающих в себя элементы R, L, C, матрицы $A(\lambda), B(\lambda), C(\lambda)$ от полиномов зависят линейно. Для объектов, включающих в себя элементы R, L, C и M матрицы $A(\lambda), B(\lambda), C(\lambda)$ от полиномов зависят дробно-рационально.

Полученная из системы уравнений (2) передаточная функция $W(s,\lambda)$ включает в себя действия сложения, умножения и обращения матриц (2) – (5), сохраняющие дробно – рациональную зависимость от параметра коэффициентов передаточной функции. Степень много-

члена в общем случае может возрасти. Таким образом, уравнения:

$$\begin{cases} \left|W(j\omega,\lambda)\right| = \dfrac{A_{вых\,\min}}{A}, \\ \left|W(j\omega,\lambda)\right| = \dfrac{A_{вых\,\max}}{A}. \end{cases} \quad (10)$$

представляют собой полиномиальные уравнения от одной переменной.

В случае многочлена 1-4 степени решения могут быть найдены аналитически. Для многочленов более высоких степеней необходим выбор и обоснование численных методов определения вещественных корней.

Реализация предложенного метода

Измерение отклонения напряжения вторичной цепи двухобмоточного трансформатора при изменении значений активного сопротивления.

Рассматривается применение метода предложенного для построения множества значений параметра электропотребтелей, обеспечивающих нормируемое отклонение напряжения во вторичной цепи трехфазного трансформатора, схема замещения одной из фазы которого представлена на рисунке 1. Требуется определить множество значений параметра R_n, при которых $\delta U_y = \pm 0.05 U_{ном}$.

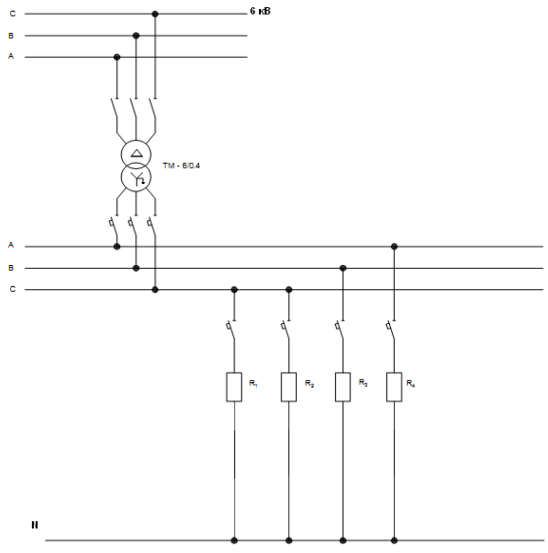


Рис 1. Схема замещения одной из фаз трансформатора с активной нагрузкой во вторичной цепи.

В соответствии с ранее предложенной методикой, математическая модель трансформатора, представленная в виде линейной системы дифференциальных уравнений, принимает вид [10]:

$$\begin{cases} u_1(t) = r_1 i_1(t) + L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M \dfrac{di_2}{dt}, \\ u_2(t) = -r_2 i_2(t) - L_2 \dfrac{di_2}{dt} - M \dfrac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (11)$$

где:

L_1 и L_2 – собственные индуктивности обмоток,

M – взаимная индуктивность обмоток.

Напряжение на нагрузке $u_2(t) = i_2(t) \cdot R_n$ (12)

$$\begin{cases} \left| \dfrac{-MR_n s}{R_n L_1 s + R_n R_1 + L_1 L_2 s^2 + L_1 R_2 s + R_1 L_2 s + R_1 R_2 - s^2 M^2} \right| \le \dfrac{A_{вых\,\max}}{A}, \\ \left| \dfrac{-MR_n s}{R_n L_1 s + R_n R_1 + L_1 L_2 s^2 + L_1 R_2 s + R_1 L_2 s + R_1 R_2 - s^2 M^2} \right| \ge \dfrac{A_{вых\,\min}}{A}. \end{cases} \quad (13)$$

Граничные значения параметра R_n (9), соответствующие знаку равенства в нестрогих неравенствах (13), определяются следующим образом:

$$\left| \frac{-MR_n s}{R_n L_1 s + R_n R_1 + L_1 L_2 s^2 + L_1 R_2 s + R_1 L_2 s + R_1 R_2 - s^2 M^2} \right| = \frac{A_{вых\,\max}}{A} \quad (14)$$

Решая систему уравнений (13), как это рекомендовано ранее, методом интервалов, получим множество значений параметра R_n, при котором обеспечивается нормируемое отклонение напряжения от номинального $\delta Uy = \pm 5\% U_{ном}$

Проверка корректности построения границы точек осуществляется путем моделирования системы по значениям параметров на границе, где удовлетворяются и не удовлетворяются заданный показатель качества электроэнергии.

Для решения данной системы (11) выбираем метод Рунге - Кутта 4 –го порядка, наиболее часто использующийся в пакетах прикладных программ для решения прикладных задач

[1]. Для применения этого метода приводим систему исходных дифференциальных уравнений (11), описывающих функционирование трансформатора, к нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} u_1(t) - r_1 i_1(t) = L_1 i_1^{'} + M i_2^{'}, \\ u_2(t) + r_2 i_2(t) = -L_2 i_2^{'} - M i_1^{'}. \end{cases} \quad (15)$$

Для решения полученной системы (15) рационально использовать метод Крамера:

$$\begin{cases} i_1^{'} = \dfrac{-L_2}{M^2 - L_1 L_2} U_1 + \dfrac{L_2 r_1}{M^2 - L_1 L_2} i_1 - \dfrac{M(R_n + r_2)}{M^2 - L_1 L_2} i_2, \\ i_2^{'} = \dfrac{L_1}{M^2 - L_1 L_2} U_2 + \dfrac{L_2 r_2}{M^2 - L_1 L_2} i_2 - \dfrac{M(R_n - r_1)}{M^2 - L_1 L_2} i_1. \end{cases} \quad (16)$$

Проверка состоятельности системы (16) при полученных значениях параметров в среде MATHCAD.

Из проведенных экспериментальных исследований следует, что погрешность определения полученной зависимости отклонения напряжения от значений параметров электропотребителей определяются СИТ, которые были использованы при получении данных, в частности, вольтметра Д 5103, класса точности 0.1% и доверительные границы результата выполненных измерений будут определяться практически только неисключенными систематичекими поргешностями (НСП) СИТ - $\varepsilon = \theta = \pm 0.1\%$, т.е погрешность определения граничных значений отклонения напряжения с помощью предложенного метода не превышает 0.1% [10], [11].

Учитывая, что обеспечиваемая на сегодняшний день погрешность при косвенных измерениях определяется максимальным и минимальным значением напряжения на уровне 0.5%, предложенная методика позволяет получить в 5 раз более точное значение.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных расчетов, согласно предложенному методу, получено множество значений параметра активного сопротивления вторичной цепи трансформатора, при которых гарантируется качество электроэнергии по параметру отклонения напряжения, а именно: для любого значения, принадлежащего определенному множеству, соблюдается выполнение требований:

- установившееся отклонение напряжения δU_y изменяется в диапазоне от $-0.05U_{ном}$ до $+0.05U_{ном}$;
- для граничных значений $A_{вых\max}$ и $A_{вых\min}$ выполняются соотношения: $\delta U_y = +0.05U_{ном}$, и $\delta U_y = -0.05U_{ном}$, соответственно;
- при иных значениях найденного параметра значениях требования ГОСТ 13109-97 для отклонения напряжения $\delta U_y = \pm 5\% U_{ном}$ выполняться не будут, что означает «потерю» качества электроэнергии, относительно отклонению напряжения.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения
2. МИ 2440-97 ГСИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов (взамен МИ 2313-94)
3. МИ 2337-95 ГСИ. Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные со встроенными устройствами формирования импульсов. Методика поверки
4. МИ 1991-89 ГСИ. Преобразователи электрических величин измерительные. Шунты постоянного тока измерительные. Методика поверки МИ 2158-91 ГСИ. Счетчики электрической энергии переменного тока электронные. Методика поверки
5. РМ-2696-01 Временная инструкция по расчету электрических нагрузок жилых зданий (взамен РМ-2696 1999г.)
6. РМ-2559 Инструкция по проектированию учета электропотребления в жилых и общественных зданиях
7. РМ-2559 Инструкция по проектированию учета электропотребления в жилых и общественных зданиях.
8. Бутырин, П.А. Упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов для целей диагностики [Текст] / П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская, М.Е. Алпатов // Электро. – 2002. – № 1. – С. 17-20.
9. Вержбицкий В.М. Численные методы: Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения. - Изд.: «Оникс 21 век», 2005.
10. А.В. Суворин: Электрические схемы элект роустановок: составление и монтаж. Практическое пособие электрикам// Феникс, 2014 г.
11. 10. А. Анищенко В. Б. Козловская Методы и

средства управления энергоснабжением и потреблением электроэнергии - Санкт-Петербург: Энергия, 2015г.

References

1. GOST 32144-2013 Electrical energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems
2. MI 2440-97 GSI. Methods for the experimental determination and control of the characteristics of the error of measuring channels of measuring systems and measuring complexes (instead of MI 2313-94)
3. MI 2337-95 GSI. Induction electric meters for active and reactive energy with built-in pulse shaping devices. Verification method
4. MI 1991-89 GSI. Measuring converters of electrical quantities. Measuring DC shunts. Verification method MI 2158-91 GSI. Electricity meters of alternating current electronic. Verification method
5. RM-2696-01 Temporary instruction on the calculation of electrical loads of residential buildings (instead of RM-2696 1999)
6. RM-2559 Instructions for the design of electricity consumption metering in residential and public buildings
7. RM-2559 Instructions for the design of electricity consumption metering in residential and public buildings
8. Butyrin, P.A. Simplified mathematical models of three-phase transformers for diagnostic purposes [Text] / P.A. Butyrin, T.A. Vaskovskaya, M.E. Alpatov // Electro. - 2002. - No. 1. - S. 17-20.
9. Verzhbitsky V.M. Numerical Methods: Mathematical Analysis and Ordinary Differential Equations. - Publisher: "Onyx 21st century", 2005.
10. A.V. Suvorin: Wiring diagrams of electrical installations: drawing up and installation. Practical guide to electricians // Phoenix, 2014.
11. 10. A. Anischenko VB Kozlovskaya Methods and means of control of energy supply and consumption of electricity - St. Petersburg: Energy, 2015.

УДК. 532:62

Новые технологии изготовления индукторных машин повышенной частоты

И.А. Кочетов[1], Н.М. Шайтор[2], Ю.И. Рясков[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.[1] kochetov.vano@mail.ru, [2] Shaytor1950@mail.ru, [3] rjaskoff@mail.ru

Статья поступила 19.10.2020 г.; после доработки 20.10.2020 г.

Аннотация

Традиционные индукторные машины, содержащие сосредоточенные магнитные цепи и распределённые рабочие обмотки, отличаются неполным использованием магнитного потока, электротехнического железа и меди. Изготовление и укладка распределенных электрических обмоток при их изготовлении является трудоемкой операцией. На основе анализа существующих конструкций произведена разработка ресурсосберегающих технологий исполнения новых индукторных машин. Существенным отличительным признаком новой технологии является переход от распределенных электрических обмоток − к сосредоточенным кольцевым обмоткам, и от сосредоточенной магнитной системы − к распределенной магнитной цепи. Такая индукторная машина имеет существенное улучшение показателей массы на единицу мощности, себестоимость её производства снижена за счет уменьшения металлоемкости и упрощения сборки.

Ключевые слова: Ресурсосберегающие технологии, сосредоточенные электрические обмотки, распределенная магнитная система, аксиально-радиальная конфигурация, ячеистая структура.

New technologies for manufacturing high frequency inductor machines

I.A. Kochetov[1], N.M. Shaytor[2], Y.I. Rjaskoff[3]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. . Севастополь, 299053, Россия.[1] kochetov.vano@mail.ru, [2] Shaytor1950@mail.ru, [3] rjaskoff@mail.ru

Received 19.10.2020 y.; received in final form 20.10.2020 y.

Abstract

Traditional inductor machines containing concentrated magnetic circuits and distributed working windings are characterized by incomplete use of magnetic flux, electrical iron and copper. The production and installation of distributed electrical windings in their manufacture is a labor-intensive operation. Based on the analysis of existing structures, resource-saving technologies for new inductor machines were developed. An essential feature of the new technology is the transition from distributed electric windings to concentrated ring windings, and from a concentrated magnetic system to a distributed magnetic circuit. Such an inductor machine has a significant improvement in mass indicators per unit of power, the cost of its production is reduced by reducing the metal content and simplifying Assembly.

Keywords: Resource-saving technologies, concentrated electric windings, distributed magnetic system, axial-radial configuration, cellular structure.

Введение

На данный момент в различных отраслях промышленности и на транспорте применяют электрические машины переменного тока повышенной частоты (400 Гц и выше) [1]. Как правило, для этого используют индукторные машины с барабанным зубчатым ротором. Индукторные машины [2] уступают синхронным и асинхронным машинам использованием магнитного потока. Кроме того, машины с барабанным зубча-

тым ротором содержат значительную часть пассивных магнитных и электрических контуров, которые не участвуют в преобразовании энергии, что увеличивает расход меди, электротехнической стали, объём, массу и стоимость машины. Эти проблемы могут быть решены при создании новых технологий исполнения индукторных машин [3].

Анализ проблемы и постановка задачи

Традиционные индукторные машины, содержащие сосредоточенные магнитные цепи и распределённые рабочие обмотки, отличаются неполным использованием магнитного потока, электротехнического железа и меди [4]. Изготовление и укладка распределенных электрических обмоток при изготовлении является трудоемкой операцией. В качестве альтернативы были предложены новые конструкции модульных аксиально-радиальных индукторных генераторов, исключающие применение пассивного железа и меди и сопровождающиеся снижением стоимости машины (Рис. 1).

Целью статьи является исследование и разработка ресурсосберегающих технологий при исполнении новых индукторных машин повышенной и высокой частоты.

Анализ конструкций новых индукторных машин

Новые индукторные машины представляют собой униполярные, торцевые, дисковые изделия особой конструкции Они могут выполняться однофазными, многофазными, состоящими из нескольких аксиальных элементарных машин (пакетов), имеющих несколько радиальных слоев.

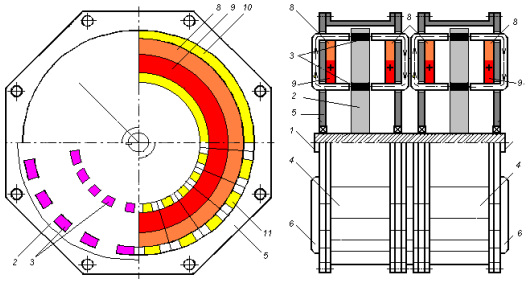


Рис. 1. Однофазный индукторный генератор аксиально-радиальной конфигурации

Для трехфазных машин аксиально-радиальной конфигурации были предложены два варианта конструктивного исполнения. В первом случае трехфазная машина выполняется из трех однофазных машин, насаженных на один вал, и габариты машины увеличиваются в аксиальном направлении [5]. Во втором случае машина выполняется из двух элементарных машин [6], но обмотка якоря каждой элементарной машины выполняется не кольцевой, а трехфазной, чечевидной формы (Рис. 2).

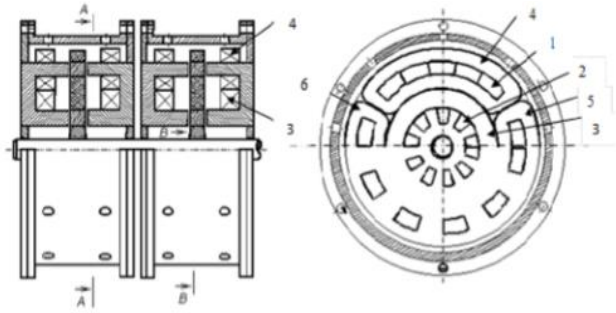


Рис. 2. Трехфазная машина аксиально-радиальной конфигурации
1 – верхние зубцы статора фазы А;
2 - нижние зубцы статора фазы А;
3 - обмотка возбуждения;
4 - обмотка якоря, фаза А;
5 - обмотка якоря, фаза В;
6 - обмотка якоря, фаза С;

Увеличение количества зубцов ротора в одном ярусе на три зубца служит для обеспечения сдвига индуктируемой ЭДС на одну треть периода. Это выполнено за счет сдвига, в тангенциальном направлении, зубцов статора фазы В и С относительно зубцов фазы А, соответственно, на одну треть и две трети ширины зубца.

Его количество регулируется путём изменения физических параметров процесса [1].

Это возможно при общем числе зубцов статора в одном ярусе, по отношению к числу зубцов ротора в одном ярусе, на три меньше, но диаметр статора и ротора, зубцовые шаги статора и ротора одинаковые. Поэтому в каждый момент времени три зубца ротора в одном ярусе, расположенные под углом 120 градусов по отношению друг к другу, не применяются в процессе коммутации.

Принцип действия разработанного генератора не отличается от принципа действия униполярного генератора с барабанным ротором, но ячеистая структура электромагнитного ядра, распределенная магнитная система, другое пространственное направление рабочего потока вносят существенные изменения в конструкцию электрических машин.

Диски статоров и роторов выполняются из лёгких, дешёвых немагнитных материалов.

Электромагнитное ядро составляют электромагнитные модули, содержащие кольцевую электрическую обмотку и магнитную цепь, выполненную из электротехнического железа.

Исследование и разработка новых ресурсосберегающих технологий

Массогабаритные показатели новых машин лимитированы в основном активными электротехническими материалами электромагнитного ядра, расположенными на указанных дисках.

Магнитопроводы таких электрических машин становятся соизмеримыми с сечениями токопроводов, имеют сравнительно равномерную площадь поперечного сечения и магнитную индукцию в последовательных магнитных цепях, поэтому генераторы нового типа не имеют избыточных массогабаритных показателей, причём на ротор приходится не более10 - 30% общей массы [7]. Магнитные цепи машин (Рис. 3) могут содержать несколько независимых магнитных контуров, отличающийся от других магнитных контуров одной новой ветвью (стрелками указаны возможные направления магнитных потоков, создаваемых обмотками возбуждения).

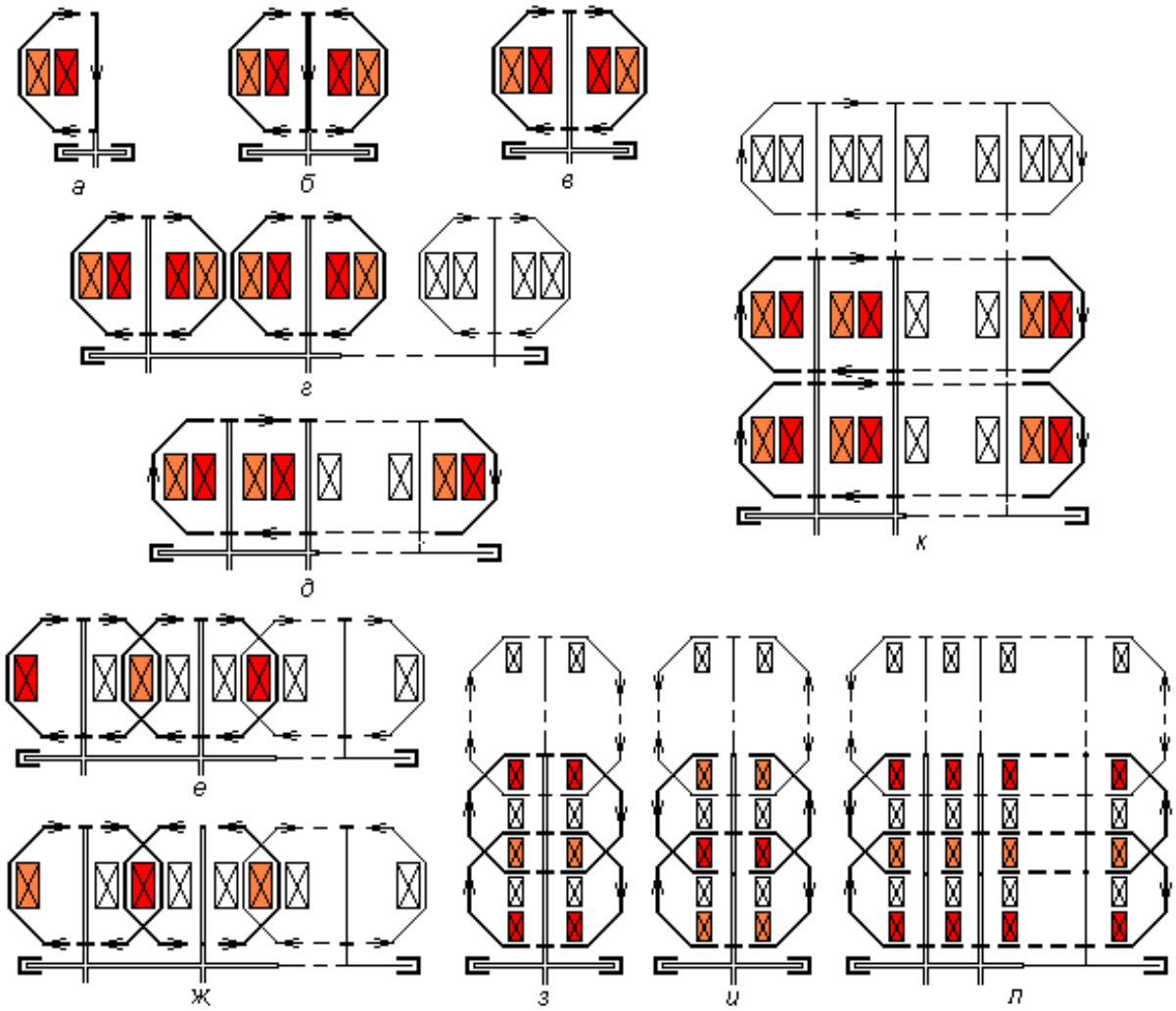


Рис. 3. Варианты магнитных и электрических цепей
а – один статор и один ротор; б – два статора и один ротор с радиальным полем; в – два статора и один ротор с аксиальным полем; г – аксиальная конфигурация с индивидуальным полем; д – аксиальная конфигурация с общим полем; е, ж – аксиальная конфигурация с пересекающимися цепями;
з, и – радиальная конфигурация с пересекающимися цепями; к – аксиально-радиальная конфигурация с пересекающимися цепями.

Конфигурация машины образуется элементарными магнитными и электрическими ячейками и слоями. Элементарная магнитная ячейка образуется каждым независимым магнитным контуром, который содержит элементы последовательной магнитной цепи и

охватывает кольцевые обмотки, принадлежащие данному контуру [8].

Различные варианты расположения магнитопроводов и кольцевых обмоток на статоре (Рис. 4).

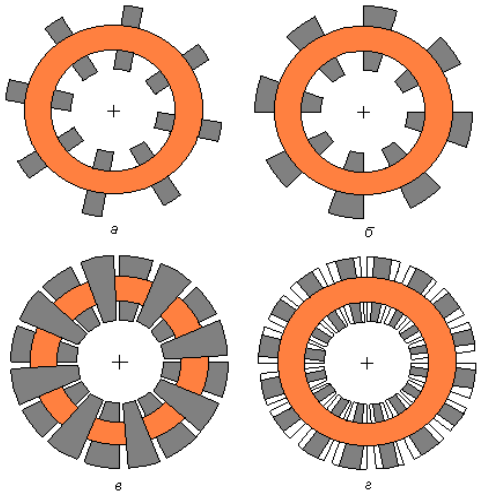


Рис. 4. Варианты расположения магнитопроводов и обмоток

Выводы и перспективы развития в данном направлении

Минимальные массы и габариты машин, при сбережении материальных ресурсов на их изготовление, а также сопровождающие их минимальные потери в железе и меди, предложено достичь за счет изменений существующей технологии конструирования и проектирования.

Существенным отличительным признаком новой технологии является переход от распределенных электрических обмоток − к сосредоточенным кольцевым обмоткам, и от сосредоточенной магнитной системы − к распределенной магнитной цепи.

Статор и ротор выполняют из высокопрочных пластмасс в форме дисков с коаксиальными отверстиями под сердечники.

Шихтованные сердечники статора изготовляют в форме коаксиально установленных модулей, охватывающих кольцевую электрическую обмотку, а ротора – в виде вставок.

Магнитную цепь можно выполнять путём раскройки (штамповки), в том числе преимущественно из отходов листов электротехнической стали, а также из пучков электротехнической проволоки, навивкой электротехнической ленты, прессованием ферримагнитных порошков.

Ротор и статор исполняют при произвольном (заданном расчетом) количестве коаксиально расположенных вставок, модулей и кольцевых электрических обмоток, при различном их удалении от оси вращения. Машинуможно набирать из произвольного количества статоров и роторов при их аксиальном и (или) радиальном расположении.

Ротор (статор) можно получать путем отливки из высокопрочных пластмасс, в том числе с предварительной установкой внутри отливочных форм ферримагнитных вставок (модулей) и электрических обмоток, вставки ротора(статора) могут быть выполнены в виде постоянных магнитов.

Такая индукторная машина имеет существенное улучшение показателей массы на единицу мощности, себестоимость её производства снижена за счет уменьшения металлоемкости и упрощения сборки. Одновременно с этим упрощается конструкция, увеличивается надежность и ремонтопригодность.

Список литературы

1. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высш. школа, 1982.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990.
3. Шайтор Н.М., Афонин А.А., Рясков Ю.И. Электромеханическая система аксиально-радиальной конфигурации // Патент Украины 49630А, МКИ 7 H02K19/18, H02K19/20, H02K19/10. Опубл. 16.09.2002, – Бюл. №9. - С. 1– 6.
4. Щетинин Т. А. Индукционные муфты и тормоза в приводах с ударной нагрузкой. – М. - Л.: Энергия, 1965.
5. Шайтор Н.М. Особенности теории и проектирование магнитокоммутируемых электромеханических преобразователей // Техническая электродинамика. – 2002. – №4. – С 45 - 48.
6. Шайтор Н.М., Рясков Ю.І., Шєвцов Є.І. Трифазний двигун аксіально-радіальної конфігурації// Пат. 69069А Україна, МКИ 7 H02K1/06, H02K3/00 Опубл. 16.08.2004, Бюл. №8. – 6 с.
7. Афонин А.А., Шайтор Н.М., Рясков Ю.И. Расчёт индукторных генераторов аксиально-радиальной конфигурации // Техническая электродинамика. – 2003. – №4. – С 41 - 45.
8. Шайтор Н.М. Проблемы и перспективы разработки электромеханических преобразователей новых конфигураций // Техническая электродинамика. - 2004. - №.1. - С. 55-59.

References

1. Balagurov V. A. Design of special electric machines

of alternating current. - M.: Higher school, 1982.
2. Bout D. A. Contactless electric mA-bus: 2nd ed., re-issue. and add. - M.: Higher school, 1990.
3. Shaytor N. M., Afonin A. A., Rjaskoff Y. I. Electro-mechanical system of axial-radial configuration // Patent of Ukraine 49630A, MKI 7 H02K19 / 18, H02K19/20, H02K19 / 10. Publ. 16.09.2002, - Bul. No. 9. - P. 1-6.
4. Shchetinin T. A. Induction clutches and brakes in drives with shock loading. - M.-L.: Energiya, 1965.
5. Shaytor N. M. Features of the theory and design of magnetocommutable Electromechanical converters / / Technical electrodynamics. - 2002. - №4. - With 45-48.
6. Shaytor N. M., Rjaskoff Y. I., Shevtsov. I. Trip-hazny dvigun aksialno-radialno konfiguratsii/ / Pat. 69069A Ukraine, MKI 7 N02K1 / 06, N02K3/00 Publ. 16.08.2004, Byul. No. 8 – - 6 p.
7. Afonin A. A., Shaytor N. M., Rjaskoff Y. I. Calculation of inductor generators of axial-radial configuration / / Technical electro-dynamics. - 2003. - №4. - S 41-45.
8. Shaytor N. M. Problems and prospects of development of Electromechanical converters of new configurations / / Technical electrodynamics. - 2004. - no. 1. - P. 55-59.

УДК621.311.1

Повышение эффективности защиты от дуговых замыканий в распределительных устройствах с помощью применения оптических датчиков

О.Н. Титаренко[1], А.М. Шестернева[2], Е.Г. Малюк[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова, 7,
г. Севастополь, 299015, Россия, [1]plotnykova198608@mail.ru ,[2]aleksandra0784@mail.ru,[3]evmalyuk@mail.ru

Статья поступила 22.10.2020 г.; после доработки 26.10.2020 г.

Аннотация

В статье рассмотрено применение устройств дуговой защиты с волоконно-оптическими датчиками для ускоренного отключения ячеек комплектных распределительных устройств электрических подстанций 6-35 кВ. Время срабатывания такой защиты значительно меньше времени срабатывания других видов защиты, что в сочетании с высокой надежностью является основным преимуществом данного вида защиты от дуговых замыканий.

Ключевые слова: электрическая подстанция, комплектное распределительное устройство, электрическая дуга, защита от дуговых замыканий, волоконно-оптический датчик.

Increase of efficiency of protecting from the arc shorting in distributive devices by means of application of optical sensors

O.N. Titarenko[1], A.M. Shesterniova[2], Malyuk[3] E.G.
Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7,
Sevastopol, 299015, Russia, [1]plotnykova198608@mail.ru ,[2]aleksandra0784@mail.ru,[3]evmalyuk@mail.ru

Received 22.10.2020 y.; received in final form 26.10.2020 y.

Abstract

The article discusses the use of arc protection devices with fiber-optic sensors for the accelerated shutdown of cells of complete switchgears of electrical substations of 6-35 kV. The response time of such protection is significantly shorter than the response time of other types of protection, which, combined with high reliability, is the main advantage of this type of protection.

Keywords: electric substation, complete distributive device, electric arc, protecting from the arc shorting, fiber-optic sensor.

Введение

Возникновение электрической дуги в комплектных распределительных устройствах представляет собой опасность, как для обслуживающего персонала, так и для оборудования. Решение задачи обнаружения коротких замыканий в комплектных распределительных устройствах (КРУ), которые сопровождаются открытой электрической дугой, является важным направлением разработки систем современной релейной защиты электрических подстанций 6-35 кВ. Для предотвращения тяжёлых последствий, вызванных возникновением электрической дуги, необходимо отсеки комплектных распределительных устройств оборудовать системами дуговой защиты. В частности, рассматривается применение волоконно-оптического датчика.

Существует несколько способов регистрации электрической дуги, работа которых основана на следующих принципах:

- регистрация светового излучения, вызванного появлением электрической дуги;
- изменение параметров электрической цепи,

а именно значений напряжения, сопротивления, тока при возникновении дуги;

- повышение температуры или давления внутри отсека распределительного устройства.

Для защиты от дуговых замыканий используют следующие устройства релейной защиты: максимальная токовая защита и токовая дифференциальная защита. Анализ существующих технологий обнаружения электрической дуги и практический опыт применения показали, что наиболее перспективным является проектирование систем защиты от дуговых замыканий, реагирующих на оптическое излучение, а именно оптические датчики [4].

Существует два вида оптических датчиков, регистрирующих световое излучение дуги: полупроводниковые фотодатчики и волоконно-оптические датчики. Устройства дуговой защиты, использующие для регистрации дуги оптические датчики на основе полимерного волоконно-оптического кабеля, имеют целый ряд преимуществ перед другими устройствами дуговой защиты.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования является использование способа оптического излучения вспышки электрической дуги как наиболее перспективного при обнаружении коротких замыканий в комплектных распределительных устройствах.

Электрическая дуга в комплектных распределительных устройствах

Дуговое короткое замыкание является одним из видов короткого замыкания, которое возникает вследствие повреждения изоляции между двумя находящимися под напряжением проводниками или же между проводником и землей. Причины таких повреждений разнообразны: попадание различных предметов, например, инструментов или металлических конструкций, а также грязь и сырость и т.п.

В электрических сетях дуговые короткие замыкания (КЗ) происходят, как правило в распределительных устройствах. Электрическая дуга, возникающая вследствие дугового короткого замыкания, может повредить дорогостоящее электрическое оборудование, а также представляет опасность для человеческой жизни.

Распределительные устройства являются важной составляющей электрической сети и представляют собой электроустановки, предназначенные для приема и распределения электроэнергии и позволяющие управлять электрическим оборудованием. Распределительные устройства содержит в своем составе коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, а также устройства защиты, автоматики, телемеханики, связи и измерений.

В сетях 6-35 кВ, как правило, применяются комплектные распределительные устройства, выполненные в виде секции из нескольких шкафов.

Секция КРУ состоит из нескольких шкафов, каждый из которых имеет три высоковольтных отсека:

- отсек кабельной сборки служит для подсоединения вводной линии и отходящих фидеров к секции КРУ, а также содержит измерительные трансформаторы тока;
- отсек выключателя содержит выключатели и другое высоковольтное оборудование (предохранители, секционные разъединители, трансформаторы напряжения);
- отсек сборных шин предназначен для соединения шкафов КРУ при помощи силовых шин.

На рисунке 1 представлена схема секции КРУ на примере двухтрансформаторной подстанции. Линия ввода/вывода соединяется с КРУ в так называемом кабельном отсеке. В отсеке выключателя располагается выключатель, который является основной частью КРУ и осуществляет подключение или отключение линий ввода/вывода. Соединение разных КРУ происходит в отсеке сборных шин.

Под влиянием мощного электромагнитного поля столб электрической дуги может перемещаться по силовым линиям, вызывая разрушения прилегающих отсеков КРУ. Скорость распространения дуги может достигать 200 м/с [2, 3].

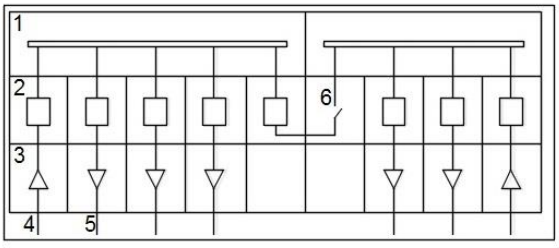


Рис.1. Схема КРУ: 1 - отсек сборных шин; 2 - отсек выключателя; 3 - отсек кабельной сборки; 4 - линия ввода; 5 - отходящие линии; 6 - секционный разъединитель.

Дуговое КЗ в отсеках КРУ возникает в результате электрического пробоя изоляции между двумя проводниками или между проводником и землей. Повреждения изоляции могут происходить из-за попадания грязи и влаги, проникновения в шкафы КРУ животных (в частности, грызунов), ошибок персонала или износа оборудования [1]. Возникновение дугового короткого замыкания может иметь катастрофические последствия для КРУ. Электрическая дуга сопровождается возникновением ударной волны и выделением огромного количества тепловой энергии, что в силу замкнутости КРУ может привести к повреждению или даже полному уничтожению значительной части оборудования. Электроснабжение поврежденных участков приостанавливается, а восстановление секции может занять продолжительное время и большие финансовые затраты. Также электрическая дуга может представлять серьезную угрозу здоровью и жизни персонала, оказавшегося рядом с местом аварии (ожоги, травмы от разбрасываемых осколков, ослепление из-за мощной вспышки света) [2].

Поэтому вопросу построения эффективных систем защиты от дуговых замыканий (ЗДЗ) необходимо уделять большое внимание. Современные отраслевые нормативно-технические документы [3-5] предписывают оснащать такими системами все КРУ с напряжением 6-35 кВ.

Системы защиты от дуговых замыканий

Одним из способов борьбы с последствиями дугового КЗ является модернизация комплектных распределительных устройств, например, использование дугостойких перегородок между отсеками. Такую защиту называют пассивной. Наряду с таким видом защиты существует активная ЗДЗ, состоящая из комплекса устройств, позволяющих фиксировать возникновение электрической дуги на ранних стадиях ее развития и своевременно отключить поврежденные участки сети [2].

К системам ЗДЗ предъявляется ряд требований [1]:

- быстродействие. Согласно нормативам суммарное время от момента возникновения дуги до срабатывания выключателя не должно превышать 200 мс [3]. Но даже за столь короткое время дуга может нанести значительный ущерб, поэтому время срабатывания ЗДЗ необходимо сократить насколько возможно;
- селективность, т.е. способность системы защиты отключить только поврежденный сегмент энергосистем. Для этого необходимо как можно более точно определить место возникновения электрической дуги;
- чувствительность, а именно срабатывание защиты при минимальных значениях аварийных параметров;
- надежность, т.е. отсутствие отказов работоспособности и ложных срабатываний.

Работа системы ЗДЗ основана на анализе процессов, сопровождающих дуговое замыкание, и контроле соответствующих параметров.

Среди методов контроля наибольшее распространение получили устройства релейной защиты и автоматики, такие как максимальная токовая защита (МТЗ), токовая дифференциальная защита и "логическая защита шин" (ЛЗШ). Дифференциальная защита и ЛЗШ не нашли широкого применения в системах ЗДЗ, главным образом потому, что имеют «мертвую зону» – отсеки измерительных трансформаторов тока и кабельной сборки, являющиеся одними из наиболее вероятных мест повреждения. МТЗ всегда имеет некоторую выдержку времени, устанавливаемую, чтобы дать возможность сработать раньше другим аналогичным защитам, находящимся ближе к месту повреждения.

Недостатком всех систем релейной защиты и автоматики является то, что признаки, по которым определяется наличие дугового КЗ, могут наблюдаться не только при внутренних, но и при внешних КЗ, а также при некоторых эксплуатационных режимах работы.

Однако МТЗ нашла широкое применение в системах ЗДЗ, благодаря простоте, надежности и невысокой стоимости. Но одной МТЗ для борьбы с дуговыми КЗ недостаточно, так как она не обладает достаточной селективностью и быстродействием.

Основным принципом создания эффективной системы ЗДЗ является ускорение действия МТЗ при помощи систем обнаружения, основанных на контроле параметров явлений, которые сопутствуют электрической дуге. Для этой цели используются современные системы обнаружения дуговой вспышки, включающие оптические датчики.

Возникновение электрической дуги может причинить значительный ущерб. Уменьшить этот ущерб или исключить его полностью может регистрирование оптического излучения дуги,

которое позволяет значительно повысить быстродействие системы защиты.

Так как свет распространяется с очень большой скоростью, именно он идеально подходит в качестве основного параметра систем обнаружения электрической дуги. Кроме уменьшения общего времени срабатывания системы защиты, оптическое излучение имеет еще одно преимущество. Оно не восприимчиво к сильному электромагнитному излучению, которое характерно для мест, в которых устанавливается система.

Анализ существующих технологий обнаружения электрической дуги, а также опыт их практического применения показал, что наиболее перспективным является проектирование систем ЗДЗ, реагирующих на амплитуду тока (МТЗ) и оптическое излучение (оптический датчик).

На рис. 2 представлена система обнаружения электрической дуги, реагирующая на электрический ток и оптическое излучение, т.е. система ЗДЗ на основе МТЗ и оптического датчика. Такая система обычно состоит из модулей сбора и обработки информации, регистрирующих оптическое излучение и уровень тока/напряжения, а также управляющего устройства и выключателя.

Управляющее устройство постоянно опрашивает модули сбора и обработки информации. Если значения, полученные управляющим устройством от этих модулей, превышают пороговые, что свидетельствуют о возникновении электрической дуги, управляющее устройство посылает команду на выключатель, который размыкает цепь электрического тока.

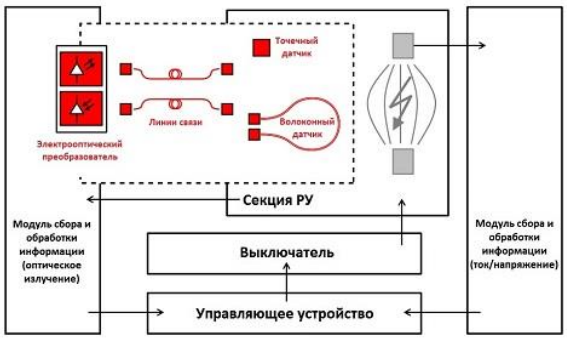


Рис.2. Блок-схема системы дуговой защиты

Оптические датчики электрической дуги

В современных системах ЗДЗ используются оптические датчики двух видов, которые различаются по способу установки. Это полупроводниковые фотодатчики и волоконно-оптические датчики (ВОД).

Фотодатчик состоит из полупроводникового компонента (фототиристора, фотодиода, фоторезистора), преобразующего оптическое излучение в электрический сигнал. Полупроводниковый фотодатчик устанавливается непосредственно в отсек КРУ. Недостатком такого датчика является расположение в рабочей зоне электронных компонентов и линий связи, которые могут быть подвержены воздействиям сильных электромагнитных помех.

Принцип действия волоконно-оптического датчика основан на передаче света по оптическому волокну. При использовании волоконно-оптического датчика в отсек КРУ устанавливается пассивный элемент, который осуществляет захват оптического излучения, а вся оптоэлектронная часть находится за пределами шкафа распределительного устройства (рис. 2). Передача сигнала от собирающего элемента к фотоприемнику происходит по оптическому волокну, которое не подвержено влиянию электромагнитных помех. Захват оптического излучения выполняется при помощи устройства на основе линзы или отрезка оптического волокна в прозрачной оболочке.

Фотодатчики и линзовые ВОД называют также точечными датчиками, поскольку они регистрируют оптическое излучение на сравнительно маленькой территории вокруг него.

ВОД на основе собирающего волокна реализуют захват излучения поверхностью волокна по всей его длине, поэтому называются линейными датчиками [7].

Линейный ВОД представляет собой петлю оптического волокна, которое собирает оптическое излучение своей поверхностью и передает его на фотоприемник. В противоположность точечному датчику, линейные собирают свет на всем участке, по которому проходит оптическое волокно. Один линейный датчик может быть установлен сразу в нескольких отсеках или шкафах КРУ.

Идеальные линейные датчики характеризуются очень малыми потерями и высокой эффективностью захвата излучения. Линейный датчик может также охватывать сразу несколько отсеков одного или нескольких КРУ. Чем больше длина отрезка оптического волокна, тем больше отсеков можно контролировать при помощи одного волокна и тем меньше датчиков необходимо использовать. Благодаря этому можно

уменьшить стоимость системы защиты.

Точечные датчики позволяют очень точно определить место возникновения электрической дуги. Линейные датчики, напротив, гораздо менее точны в этом отношении по причине протяженности оптического волокна.

Как точечный, так и линейный датчики имеют свои преимущества и недостатки, поэтому в современных системах дуговой защиты используются оба типа датчиков. Сравнение основных особенностей линейных и точечных датчиков представлено в таблице 1.

Таблица 1. *Сравнение линейного и точечного датчиков.*

Сравниваемый параметр	Линейный датчик	Точечный датчик
Риск затенения	нет	есть
Чувствительность	ниже, чем у точечного	высокая
Возможность работы с несколькими отсеками	есть	нет
Точность определения	низкая	высокая

На рис. 3 представлены два варианта установки оптических датчиков: а) один или несколько оптических датчиков размещаются в разных отсеках КРУ и б) один оптический датчик охватывает сразу один или несколько отсеков. В первом случае датчик называется точечным, а во втором – линейным.

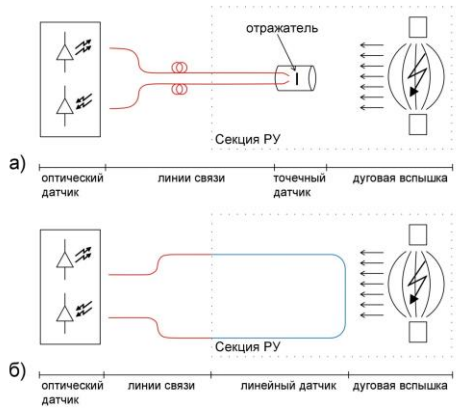


Рис.3. а) Точечный волоконно-оптический датчик; б) линейный волоконно-оптический датчик.

Заключение

Наиболее приоритетным способом защиты от дуговых замыканий и предотвращения тяжелых последствий действия электрического разряда в комплектных распределительных устройствах электрических подстанций 6-35 кВ является использование устройств дуговой защиты на основе волоконной оптики и микропроцессорной техники. Такие устройства защиты имеют ряд значительных преимуществ перед другими видами защит.

Одним из самых перспективных способов построения устройств дуговых защиты с точки зрения обеспечения требований, предъявляемых к устройствам дуговой защиты, является способ, основанный на определении освещенности внутри отсеков комплектных распределительных устройств. Для этой цели используются оптические датчики дуговой защиты, которые способны регистрировать возникновение электрической дуги.

Создание систем защиты КРУ от электрической дуги, включающих волоконно-оптические датчики, является одним из наиболее эффективных решений защиты от дуговых замыканий.

Список литературы

1. Нагай В. И. Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 2002.
2. Батурлин С. Электробезопасность промышленных предприятий. Система защиты от дуги // Автоматизация и IT в энергетике. 2013. № 1.
3. ГОСТ 14693-90 Устройства комплектные распределительные негерметизированные в металлической оболочке на напряжение до 10 кВ. Общие технические условия.
4. СТО 56947007-29.240.10.028-2009 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Стандарт ОАО "ФСК ЕЭС".
5. РД 34.20.501-95 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.
6. Нагай В. И. Быстродействующие дуговые защиты КРУ. Современное состояние и пути совершенствования // Новости электротехники. 2003. № 5.
7. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников Под ред. Э. Удда Москва: Техносфера, 2008. - 520 с.

References

1. Nagai V. I. Relay protection of branch substations of electric networks, Moscow: Energoatomizdat,

2002.
2. Baturlin S. Electrical safety of industrial enterprises. Arc protection system // automation and IT in power engineering. 2013. № 1.
3. GOST 14693-90 complete distribution devices unpressurized in a metal shell for a voltage of up to 10 kV. General specifications.
4. STO 56947007-29.240.10.028-2009 Norms of technological design of AC substations with a higher voltage of 35-750 kV (NTP PS). Standard of JSC FGC UES.
5. RD 34.20.501-95 Rules of technical operation of electric power stations and networks of the Russian Federation.
6. Nagai V. I. High-speed ARC protection of KRU. Current state and ways of improvement // Electrical engineering news. 2003. № 5.
7. Fiber-optic sensors. Introductory course for engineers and scientists Ed. by E. Udda Moscow: Technosphere, 2008. - 520 p.

УДК 621.311.42

Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях с применением интеллектуальных сетей Smart Grid

А.М. Шестернева[1], О.Н. Титаренко[2] , Е.Г.Малюк[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия
[1]aleksandra0784@mail.ru ,[2]plotnykova198608@mail.ru, [3]evmalyuk@mail.ru

Статья поступила 02.11.2020 г.; после доработки 05.11.2011 г.

Аннотация

Проведен анализ развития современной энергетики. Из анализа следует, что наиболее перспективным направлением развития является модернизация энергетики, в частности, за счёт снижения потерь в энергетических системах. Технически эта проблема решается с помощью интеллектуальных сетей. Приведены мероприятия по созданию интеллектуальных электрических сетей и проблемы их внедрения в РФ.

Ключевые слова: электротехника, электроэффективность, цифровые технологии.

Energy-saving solutions in electrical distribution grids using smart grids Smart Grid

A.M. Shesterniova[1], O.N. Titarenko[2], E. G. Malyuk[3]
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]aleksandra0784@mail.ru, [2]plotnykova198608@mail.ru, [3]evmalyuk@mail.ru

Received 02.11.2020 y.; received in final form 05.11.2011 y.

Abstract

The analysis of the development of modern energy is carried out. From the analysis it follows that the most promising direction of development is the modernization of the energy sector, in particular, by reducing losses in energy systems. Technically this problem is solved with the help of smart grids. The measures for the creation of intelligent electric grids and the problems of their implementation in the Russian Federation are given.

Keywords: electrical engineering, electrical efficiency, digital technologies.

Введение

Электроэнергетическая система – это совокупность электрических частей электростанции, электрических сетей и потребителей электроэнергии, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства, распределения и потребления электроэнергии. Количество звеньев, участвующих в процессе передачи электроэнергии к потребителю достаточно большое и совместить их работу и во временном режиме и непосредственно в выбранном режиме передачи электроэнергии к потребителю достаточно сложно. В результате совмещения огромного количества элементов в единую энергосистему, учитывая ее протяженность, возникают потери электроэнергии, которые мы привыкли решать проверенными и достаточно эффективными способами. Такими как:

- использование высоких напряжений, которые в настоящее время достигают 750-1150 кВ. Это позволяет без существенных потерь передавать электроэнергию на большие расстояния по проводам небольшого сечения, что также приводит к косвенной экономии

энергии за счет снижения материалоемкости ЛЭП;

- снижения потребляемой из сети реактивной мощности за счет применения установок компенсации реактивной мощности;
- снижение потерь в линиях электропередачи за счет использования постоянного тока или сверхпроводников. И подобные этим решения.

Часто для достижения необходимого результата снижения потерь приходится использовать целый комплекс мероприятий, включающих в себя использование какого либо энергосберегающего решения на каждом участке электрической сети.

Постановка задачи

Для достижения необходимого процента энергоэффективности при решении вопросов энергосбережения традиционными способами приходится применять энергосберегающие мероприятия на каждом участке сети. Опять таки, энергоэффективные мероприятия тоже необходимо согласовывать между всеми звеньями системы, что требует затрат денежных средств, интеллектуального труда, а также должной квалификации персонала.

В качестве замены комплекса мероприятий по энергосбережению предлагается принципиально новая система Smart Grid. Она базируется на формировании интеллектуальной энергетической сети с двухсторонней связью. С её помощью удаётся ещё на управленческом и технологическом уровне решать самые важные задачи, касающиеся энергетической эффективности, а также уменьшения энергопотерь.

Описание исследования

Важнейшей задачей энергетики является обеспечение стабильных режимов работы энергосетей, когда отклонение параметров от нормативных значений находится в пределах допуска. Эти задачи можно решать оптимальной настройкой параметров специализированных регулирующих устройств, оперативно минимизирующих данные отклонения.

По результатам мониторинга состояния энергосетей, сбора, обработки информативных параметров необходимо принять решение по реализации управляющих воздействий для поддержания работоспособных состояний ЭС – обеспечения заданных значений показателей качества электроэнергии и снижения уровня энергопотерь в реальном режиме времени. При решении этих задач можно выделить два направления: разработка регулирующих устройств, обеспечивающих регулирование– напряжения в пределах, определяемых требованием к качеству электрической энергии; разработка алгоритмов управления параметрами регулирующих устройств для– эффективного управления состояниями энергосети.

Действующие распределительные сети спроектированы в основном для пассивного распределения электроэнергии и не учитывают современные тенденции комплексного подхода к построению интеллектуальных электрических сетей. Для решения задач обеспечения функционирования энергосетей в заданных нормальных режимах в архитектуру энергосетей встраиваются специализированные РУ, позволяющие увеличить пропускную способность распределительных сетей различной конфигурации, снизить потери, повысить показатели качества электроэнергии, регулировать потоки мощности. Большое внимание уделяется разработке надежных устройств регулирования напряжения, имеющих высокое быстродействие и широкий диапазон переключений, внедрение которых позволит реализовать интеллектуальное управление потоками мощности и снизить их энергопотери. В то же время разрабатываются новые системы управления потоками мощности, представляющие программно-аппаратные комплексы для переключения обмоток трансформаторов с помощью тиристорных фазоповоротных устройств в разных режимах функционирования энергосистемы. Работы в этой области имеют большое актуальное значение.

В настоящее время создано новое эффективное комплексное устройство регулирования напряжения – твердотельный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения. Для управления состояниями сети с помощью ТРВДН необходима разработка, автоматизация и внедрение алгоритмов оптимизации и оперативной настройки его параметров в зависимости от состояния ЭС, с целью эффективного управления потоками мощности в распределительных электрических сетях различной конфигурации – протяженных, радиально-магистральных, гексагональных. При этом должно быть выполнено требование обеспечения регулирования параметров распределительной электрической сети в режиме реального времени. Это позволит значительно повысить надежность сетей, решить задачи обеспечения качества электроэнергии и

снижения энергопотерь.

Задачи управления состояниями электросетей для обеспечения показателей качества электроэнергии и снижения энергопотерь.

Обеспечение качества электроэнергии и снижение энергопотерь являются важнейшими задачами энергетики, как для потребителей, так и для поставщиков электроэнергии. Для их решения требуется постоянный мониторинг сети, расчет ее параметров и выработка управляющих воздействий для поддержания нормальных режимов работы. Одним из основных параметров качества электроэнергии для потребителя является отклонение напряжения от допустимого значения, и разработка новых специализированных регулирующих устройств направлена на решение этой задачи. Для этого необходимо построить модель энергосети с учетом встраивания в линии передач таких регулирующих устройств, определить оптимальные варианты их размещения и разработать алгоритмы оптимальной настройки их параметров на базе интеллектуальных технологий.

Анализ показателей качества электроэнергии и снижения энергопотерь показал отсутствие значимых результатов в области интеллектуализации процессов управления состояниями энергосетей

В связи с большими размерами ЭС, различием их конфигураций, количества встраиваемых специализированных РУ необходима разработка интеллектуальных алгоритмов управления параметрами РУ, например, вольтодобавочных трансформаторов для компенсации просадок по напряжению в реальном времени. Кроме того, необходима разработка технических решений для автоматического выставления найденных оптимальных значений параметров РУ, что в настоящее время практически везде выполняется операторами вручную.

Использование интеллектуальных сетей Smart Grid как замена комплексу традиционных энергосберегающих мероприятий

Можно рассматривать внедрение технологии Smart Grid не только, как путь к оптимизации работы сетей, но как средство вывода сетевого хозяйства из кризисной ситуации сложившейся в настоящее время. Более 70% всех повреждений, которые происходят в электроэнергетике – происходят в распределительных сетях, причем в основном в сетях 6-10 кВ. Более 60% оборудования выработало нормативный ресурс. Разумеется, все это негативно влияет на надежность энергоснабжения. Усугубляет ситуацию то, что в ближайшее время надежность перейдет из понятий технических в понятия экономические. Надежность закладывается как один из базовых элементов нового тарифообразования.

Требования к надежности энергоснабжения постоянно увеличиваются, а инвестиций постоянно не хватает. Если решать проблему традиционным способом – путем замены оборудования, то сетевые компании будут всегда не успевать за старением оборудования. Если же использовать технологии Smart Grid, то при посильных финансовых вложениях можно достичь существенных результатов в плане надежности энергоснабжения и снижения расходов. В данной статье мы предлагаем применять децентрализованную организацию и секционирование сети на базе вакуумных реклоузеров. Благодаря ним можно в семь раз снизить время перерывов в энергоснабжении по техническим причинам и кратно уменьшить число отключений потребителей.

Без Smart Grid тяжело себе представить эффективное строительство системы распределения регенерации возобновляемых источников энергии, а также стимуляции ресурсоснабжения. Эта система связывает в единый ресурсный комплекс как традиционные системы электроснабжения, так и системы электроснабжения на основе возобновляемых источников электроэнергии.

Особенности интеллектуальной сети и системы Smart Grid

Анализируя принципы действия и режимы работы, можно выделить следующие особенности интеллектуальных сетей:

- операционная эффективность – сокращение объемов хищений электроэнергии и повышение собираемости платежей с помощью автоматизированных систем считывания показаний приборов учета;
- правильное реагирование – уменьшение пиковых нагрузок с помощью интеллектуальных приборов учета, позволяющих внедрить тарификацию в зависимости от времени потребления.
- надежность сети – составление прогноза потребления для оптимизации конфигурации

сети в режиме реального времени, что позволит оборудованию функционировать в полную силу его фактических возможностей

- современные коммуникационные технологии – возможность встроить интеллектуальные функции во всю инфраструктуру электросети: от подстанции до абонентского оборудования

Структура интеллектуальных сетей

Интеллектуальная сеть состоит из следующих основных частей:

- интеллектуальная электросеть сочетает в себе функции мониторинга электросети и мониторинг генерирующих мощностей с целью выравнивания нагрузки, защиты и измерений, а также обеспечивает безопасную и эффективную доставку электроэнергии;
- возобновляемые источники энергии;
- интеллектуальный обмен информацией сочетает в себе двусторонний обмен данными показаний датчиков и счетчиков, расположенных по всей сети;
- интеллектуальное потребление и учет обеспечивают повышение надежности, безопасности и эффективности сети за счет автоматизации управления спросом и реагирования на чрезвычайные ситуации.

Переход электроэнергетики на новый интеллектуальный уровень предусматривает создание новой технологической платформы - интеллектуальной энергосистемы с активно-индуктивной сетью.

Смартгридизация, конечно не заменит полностью модернизацию сетей, однако может стать частичной (бюджетной) ее альтернативой. Информатизация сетей, даже без внедрения дорогостоящих устройств управления потоками реактивной мощности, позволяет повысить надежность сетевого хозяйства, оптимизировать стоимость эксплуатации.

«Интеллектуализация» электрических сетей, наряду с реконструкцией и заменой устаревшего оборудования, в современных условиях безусловно является существенным фактором повышения надежности функционирования сетей и, как результат, надежности электроснабжения потребителей, за счет эффективного технологического управления всеми компонентами системы электроснабжения.

Как видно из рис.1 сеть будет иметь несколько основных узлов и несколько передающих линий.

Схема передачи включает в себя несколько составляющих: генерацию, передающую сеть, распределительную сеть и самого потребителя, что схоже с традиционной системой энергоснабжения, однако непосредственно сами узлы соединений будут иметь принципиально новый подход и принцип работы.

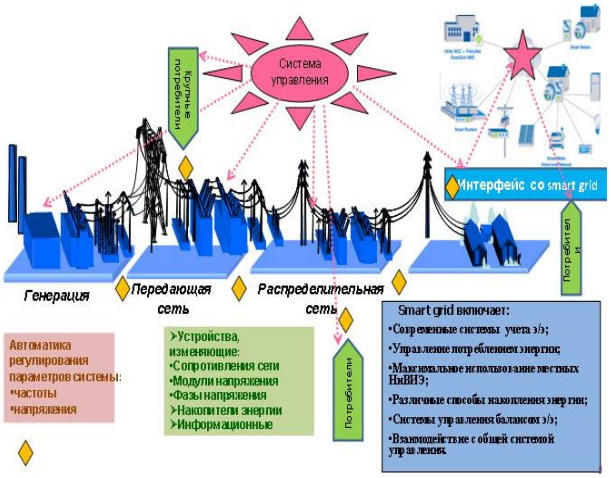


Рис 1.Структура интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью

Экономия получается, в частности, благодаря тому, что генерация производит энергии именно столько, сколько требуется в данный момент потребителям соответствующим составом генерирующих агрегатов и именно в тех узлах сети, при которых обеспечиваются минимальные потери электроэнергии на передачу. При этом состояние сетевого и генерирующего хозяйства должно соответствовать требованиям при которых эффективно применение современных интеллектуальных систем управления.

Первые примеры такого управления были реализованы комплексами противоаварийной автоматики (ПАА) единой энергосистемы Советского Союза, которые по сей день используются при управлении единой национальной энергосистемой (ЕНЭС) России.

Комплексы противоаварийного управления ЕНЭС высоко оцениваются энергетиками в мире, будут совершенствоваться на основе современной техники и технологий управления и будут интегрированы в создаваемую систему управления активно-адаптивной сетью.

Анализ процессов, протекающих сегодня в российских сетевых компаниях позволяет сделать вывод, что у нас «смартгридизация» состо-

ится в два этапа. В первую очередь будут внедрены информационные технологии (повсеместный автоматический учет, телемеханика, системы защиты и пр.). Далее наступит время для оптимизации «железа» – повсеместного распространения цифровых подстанций, оборудования FACTS (гибкие системы передачи переменного тока).

При этом следует помнить, что все упомянутые устройства и технологии – уже применяются в российских сетях. Просто в дальнейшем их применение станет повсеместным и комплексным.

Локальные интеллектуальные сети

Локальные интеллектуальные сети (Micro Smart Grid) представляют собой электросистему связанных генераторов и нагрузок.

Интеллектуальная электрическая сеть может представлять собой небольшую сеть, обслуживающую определенную территорию и не подсоединенную к другим сетям.

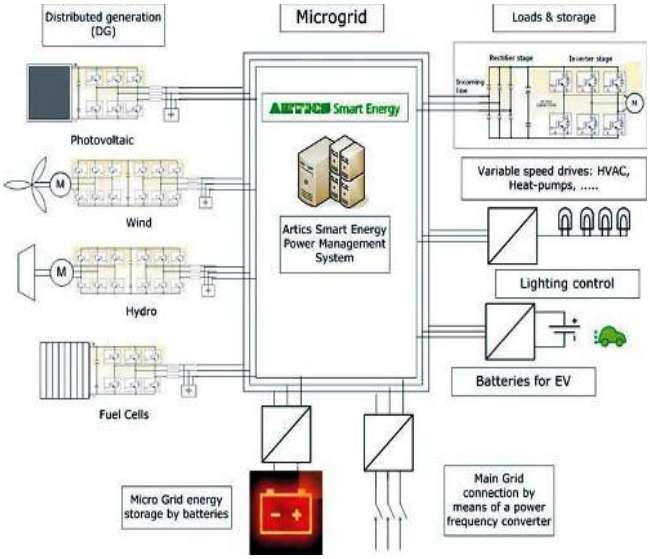


Рис.2.Структурная схема локальной интеллектуальной сети.

Как видно из рисунка 2, интеллектуальная локальная сеть включает в себя следующие блоки:

- распределенное производство электроэнергии;
- управление нагрузкой;
- интерфейс с внешней сетью;
- хранение энергии;
- система управления энергией.

Локальная сеть контролируется интеллектуальной инфраструктурой, которая управляет энергопотоками.

Таким образом интеллектуальная сеть может быть использована как локальна - отдельная автономная сеть общей энергосистемы, так и иметь большой территориальный охват и иметь не локальное, а общегородское значение.

Цифровая подстанция как часть интеллектуальной сети электроснабжения

Применение интелектуальной сети влечет за собой и применение цифровой подстанции, что дает дополнительные преимущества:

- снижение текущих расходов. Подстанции нового поколения позволяют снизить текущие расходы путем объединения нескольких систем управления и мониторинга в одну IP-сеть, что позволит обеспечить высший приоритет для трафика данных управления и рабочих данных;
- снижение капитальных расходов. Поскольку потребность в электроэнергии продолжает расти, предприятиям электроэнергетики требуется найти способы генерации энергии для удовлетворения этой потребности в моменты максимальной нагрузки. Одним из способов автоматизации подстанции может быть использование технологии для крупномасштабного снижения пиковой нагрузки и регулирования спроса, что позволит уменьшить количество дополнительных электростанций для удовлетворения спроса в моменты максимальной нагрузки на электросеть;
- обеспечение распределенной интеллектуальности. Поскольку функции интеллектуального управления сетью доступны не только в рамках центра управления, но и для подстанций, существует возможность разработки новых приложений, которые позволяют реализовать распределенные функции защиты, управления и автоматизации оборудования;
- улучшенная защита энергосистемы. Задача по обеспечению информационной безопасности энергосистемы включает в себя не только защиту периметра подстанции, но и создание полностью защищенной архитектуры, которая позволит получить максимально возможное представление обо всей сети, устройствах и событиях.

Возобновляемые источники энергии как часть интеллектуальной сети электроснабжения

В ряде российских регионов есть все условия для роста распределенной генерации. Речь

идет о потенциале энергии ветра и солнечной энергии.

Возобновляемые источники энергии могут сыграть значительную роль в решении проблем энергетической безопасности, ухудшения окружающей среды и изменения климата.

Для стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии, необходимо утвердить методические указания расчетов тарифов на электрическую энергию, произведенную на объектах возобновляемых источников энергии и приобретаемых на розничных рынках в целях компенсации потерь в электрических сетях.

Интеллектуальный обмен информацией

Электросеть без адекватных коммуникаций – это всего лишь «поставщик» мощности. Для того чтобы она стала «интеллектуальной», требуется двусторонний обмен данными.

Обмен данными позволяет энергетическим компаниям решить три основные задачи: интеллектуальный мониторинг, обеспечение безопасности и выравнивание нагрузки.

Благодаря двустороннему обмену данными показания датчиков и счетчиков, расположенных по всей сети, собираются и передаются непосредственно в диспетчерскую оператору сети.

В коммуникационной структуре интеллектуальных сетей можно выделить три сегмента:

- региональная сеть (Wide area network – WAN), охватывающая протяженные территории и связывающая центр управления с местными сетями. Она может быть реализована с помощью оптоволоконных или беспроводных средствсвязи;
- местная сеть (Neighborhood area network – NAN), управляющая всей информацией, которая пересылается между региональной и домашней сетью по линиям высокого напряжения. Здесь применяются либо беспроводная связь, либо связь по линиям электросети (PLC);
- домашняя сеть (Home area network – HAN), обеспечивающая связь с конечными пунктами – жилыми домами или предприятиями

Все эти сегменты связаны между собой через узлы-концентраторы, установленные между региональной и местной сетью, или электронные счетчики между местной и домашней сетью.

Интеллектуальное потребление и учет

Чрезвычайно важно совершенствовать управление энергопотреблением, а для этого нужны системы комплексных измерений. Обратная связь, предоставляющая данные о том, как потребляется энергия, обеспечивает преимущества и позволяет снизить потери. Кроме того, более наглядная для потребителей информация об использовании электроэнергии позволит преодолеть их безразличие к проблемам энергетики.

Результаты точных измерений необходимы для того, чтобы изучить, принять или модифицировать ту или иную модель энергопотребления. Критически важно реализовать управление потреблением энергии и получать информацию для обслуживания систем и диагностики отказов.

В системах интеллектуального учета используются однофазные и многофазные счетчики модульного типа. Интеллектуальные счетчики могут отслеживать зависимость потребления мощности от времени суток и позволяют коммунальным компаниям предлагать абонентам скидки, чтобы изменить схему энергопотребления. Для широкого внедрения автоматизации нам необходимо предоставить потребителям возможность выбора и расширенный набор услуг.

Потребитель благодаря интеллектуальному учету всегда в срок получает счет, который прозрачно и корректно отражает данные о потреблении. Это способствует своевременной оплате счетов и, как следствие, достижению максимальной доли добросовестных плательщиков в каждом потребительском сегменте.

Система хранения энергии как часть интеллектуальной сети электроснабжения

Система хранения электроэнергии может брать энергию из сети, когда наблюдается избыток её выработки, и наоборот, выдавать электроэнергию соразмерно потребностям, в случае если наблюдается дефицит. Временная граница зарядки /разрядки может занимать секунды, минуты или часы. Поэтому система может работать по-разному:

- **Снятие пиков нагрузки / временная манипуляция**: система может хранить энергию, когда нагрузка сети мала, и выдавать электроэнергию во время пиков нагрузки.

Стандартное применение: солнечная энергетика, ветровые станции для увеличения производительности;

- **Компенсация произвольного производства энергии от солнца/ветра** ежесекундно/ежеминутно. Качество электроэнергии: система может осуществлять контроль над реактивной мощностью, независимо от активной мощности. Благодаря этому увеличивается линейный коэффициент мощности либо уменьшаются нежелательные гармоники в сети;
- **Регулирование напряжения**: устройство регулирования реактивной мощности может применяться оператором сети для обеспечения стабильности линейного напряжения;
- **Регулирование частоты, первичный и вторичный резервы**: специально выделенная функция управления соединяет активную мощность с линейной частотой автоматически. Оператор сети может использовать данную функцию для обеспечения работы оборудования в режиме «резерва» для регулирования частоты;
- **Холодный пуск**: система может также обеспечивать аварийный запуск из полностью обесточенного состояния. Аккумулятор через инвертор питает сеть после перебоя электроснабжения и позволяет, тем самым, сети работать в нормальном режиме;
- **Первичный «резерв» для традиционных электростанций**: оборудование работает параллельно с главным теплогенератором, обеспечивая их полную загрузку, поскольку необходимый «резерв» может быть предоставлен аккумулятором в течение одной минуты.

Также система может взаимодействовать с различными типами аккумуляторов: литий-ионные, натриевые и прочие. Использование отдельного dc/dc контроллера для каждой группы аккумуляторов позволяет лучше управлять системой в оперативном режиме и достичь более высокой эффективности.

Каждая группа аккумуляторов может быть заряжена и разряжена с помощью отдельной логики управления с целью оптимизировать работу аккумулятора. Разница в работе среди различных видов аккумуляторов из-за неизбежных отклонений может быть компенсирована. Каждый dc/dc преобразователь связан с внутренней шиной постоянного тока преобразователя с активным фильтром.

Стандартная внутренняя DC схема работает в диапазоне напряжения 0,6 -1 кВ, в зависимости от размеров и мощности системы хранения. Решение Ansaldo Sistemi Industriali предусматривает резервирование в группе аккумуляторов.

Этапы внедрения интеллектуальных сетей в России

Первый этап создания Smart Grid в России – это обеспечение наблюдаемости процессов, происходящих во всех узлах сети и у потребителей – непрерывный мониторинг и точные измерения энергопараметров.

На основании этих данных можно приступать к следующему этапу – построению модели гибкого управления сетями.

Прямой эффект от создания системы полного мониторинга электросетевых объектов включает выявление технических и коммерческих потерь, определение неэффективного и аварийно-опасного использования электроустановок, сокращение количества аварий и сроков их устранения, а также случаев хищения или повреждения оборудования.

С учетом имеющихся препятствий, процесс создания SmartGrid в нашей стране может затянуться на десятки лет, однако в отдельных промышленно развитых регионах подобные системы могут появиться уже в ближайшие 3 – 5 лет.

Продвижение отдельных направлений Smart Grid в разных странах идет разнонаправлено. Одни усиленно развивают альтернативную энергетику, другие – системы хранения, третьи минимизируют вредные выбросы, прорабатывают инфраструктуру для электромобилей и так далее. России сегодня необходимо определить свои основные приоритеты в общем движении и сконцентрироваться на их выполнении, создать свою «дорожную карту смартгридизации». Думаю, что это будет в первую очередь, повышение эффективности работы существующих сетей и снижение аварийности.

Для повышения эффективности методов оперативно-диспетчерского управления качеством электроэнергии и минимизации энергопотерь требуется разработка новых интеллектуальных алгоритмов управления.

Разработка и внедрение новых устройств управления, регулирующих состояния ЭС, требует разработки эффективных алгоритмов расчета параметров ЭС по критерию минимизации времени их работы, интеллектуальных алгоритмов поиска значений параметров регулирующих устройств, обеспечивающих устойчивость работоспособных режимов работы ЭС. Необходима

разработка имитационных моделей для апробации алгоритмов, исследования качества и устойчивости полученных решений в области управления такими сложными объектами, как ЭС.

Кроме того, необходимо выполнить оценку чувствительности самой имитационной модели ЭС разных топологий и размеров к изменению значений параметров РУ, что позволит рекомендовать разработанные решения к внедрению в реальные ЭС.

Разработка моделей и алгоритмов управления состояниями электросетей

В результате исследования проблемы интеллектуализации электрических сетей выявлена необходимость разработки моделей и алгоритмов поиска оптимальных значений параметров комплекса РУ для сохранения устойчивых допустимых состояний ЭС различных размеров и конфигураций. Нетривиальность разработки моделей и алгоритмов связана с тем, что изменение значений параметров одного РУ приводит к изменению значений динамических характеристик всей сети.

В этой связи необходимо проведение системного исследования такого сложного технического объекта, включающего анализ механизмов его функционирования, взаимосвязей элементов, параметров и характеристик с целью снижения неопределенностей при его описании, а также синтез объекта с заданными свойствами, в данном случае обеспечения нормированных значений показателей качества ЭС интеллектуальной настройкой значений параметров РУ.

Реализация системного подхода к решению задач обеспечения показателей качества электроэнергии, учитывающего разные цели для потребителей и поставщиков, требует выявления существенных связей между элементами и параметрами исследуемого объекта, построения адекватной модели, разработки и исследования различных алгоритмов решения задач управления, выбора критериев оценки решений.

Кроме того, разработка интеллектуальной системы управления параметрами комплекса РУ для решения поставленных задач должна выполняться с учетом того, что она является составной частью иерархической системы управления электросетью, т.е. разработанная модель и алгоритмы управления должны быть построены с учетом определенных отношений с другими подсистемами управления в общей иерархии.

Заключение

Традиционные энергосберегающие решения для распределительных сетей требуют все больших затрат в связи со старением энергосистемы, а также все более сложного комплексного подхода. В данной статье предложено рассмотреть возможность более продуктивного подхода в вопросе энергоэффективности, используя интеллектуальную сеть. Рассмотрены возможности использования и локальной и полномасштабной сети с перспективой замены всей системы электроснабжения на интеллектуальную . Интеллектуальная сеть - качественно новое состояние российской энергетики, построенное на основе новых принципов и технологий в передаче и преобразовании энергии, позволяющее осуществить следующие задачи:

- интегрировать все виды генерации любые типы потребителей (от домашних хозяйств до крупной промышленности) для ситуационного управления спросом на их услуги и для активного участия в работе энергосистемы;
- изменять в режиме реального времени параметры и топологию сети по текущим режимным условиям, исключая возникновение и развитие аварийных ситуаций;
- обеспечить расширение рыночных возможностей инфраструктуры путем взаимного оказания широкого спектра услуг субъектами рынка и инфраструктуры;
- минимизировать потери, расширить системы самодиагностики и самовосстановления при соблюдении условий надежности и качества электроэнергии;
- интегрировать электросетевую и информационную инфраструктуру для создания всережимной системы управления с полномасштабным информационным обеспечением.

Таким образом, внедрение интеллектуальной сети в современную электроэнергетику позволяет не только решить вопрос энергосбережения, но и вывести всю систему энергоснабжения на новый уровень.

Интеллектуализация сети не возможна без ее наблюдаемости. Это означает расширение информационных систем, которые обеспечивают возможность сбора необходимой информации, причем это информация не только технологическая – о перетоках, потреблении электроэнергии, о технических показателях работы оборудования и систем управления, но и данные о внешних воздействиях окружающей среды, например, о

температуре воздуха, освещенности.

Соответствующим образом настроенная система управления обеспечит реализацию технологического процесса энергоснабжения, применив современные тенденции развития и решив проблему энергосбережения на высочайшем уровне.

Список литературы

1. Кужеков С.Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию/ С.Л. Кужеков, С.В. Гончаров, //. – Изд. 3 – Ростов н/Д.:Феникс,2009. - 493с.
2. Клименко Ю.А, Преображенский А.П. Об оценке потерь электроэнергии в распределительных сетях 10/0,4 кВ./ А.В. Косых //Материалы научно-технической конференции «Актуальные вопросы энергетики», г.Омск, 15мая 2019 г. - Омск: изд-во ОмГТУ,2019.- Вып 1.-С.6-9.
3. Новикова В.А., Афтафьев В.И., Городских А.А., Дворянцев М.А. Энергосбережение в сельском хозяйстве/ А.А. Городских //Материалы I Всероссийской научно-практической конференции«Приоритетные направления развития энергетики в АПК», г.Курган, 28 сентября 2017 г. - Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2017. – С.133-139.
4. Осорин М.А. Построение интеллектуальной электрической сети для передающих и распределительных энергокомпаний./ М.А.Осорин // - Изд. 1 - М., 2012. – Режим доступа: https://www.ibm.com/ru/bcs/power-working-smarter.pdf

References

1. Kuzhekov S.L. Practical guide to electrical networks and electrical equipment / S.L. Kuzhekov, S.V. Goncharov, //. - Ed. 3 - Rostov n / a.: Phoenix, 2009. - 493p.
2. Klimenko Yu.A., Preobrazhensky A.P. On the assessment of electricity losses in distribution networks 10 / 0.4 kV. / A.V. Kosykh // Materials of the scientific and technical conference "Topical issues of energy", Omsk, May 15, 2019 - Omsk: publishing house OmSTU, 2019.- Issue 1.-P.6-9.
3. Novikova V.A., Aftafiev V.I., Gorodskikh A.A., Dvoryantsev M.A. Energy saving in agriculture / A.A. Urban // Materials of the I All-Russian scientific-practical conference "Priority directions of energy development in the agro-industrial complex", Kurgan, September 28, 2017 - Kurgan: Publishing house of the Kurgan State Agricultural Academy, 2017. - pp. 133-139.
4. Osorin M.A. Construction of an intelligent electrical network for transmission and distribution energy companies. / M.A. Osorin // - Ed. 1 - M., 2012. - Access mode: https://www.ibm.com/ru/bcs/power-working-smarter.pdf

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 550.837.3

Теоретические основы мембранного разделения газовых смесей

А.М.Акимов, С.А.Котельникова, С.А.Федорова, Е.А.Магдыч
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. AMAkimov@sevsu.ru, SAKotelnikova@sevsu.ru, s.a.fedorova@sevsu.ru,EAMacduch@sevsu.ru

Статья поступила 15.10.2020 г.; после доработки 20.10.2020 г.

Аннотация
Рассматриваются процессы, обусловленные градиентом концентрации или давления по толщине пористых или непористых мембран на основе полимеров или материалов с жесткой структурой

Ключевые слова: мембраны, диффузионно-мембранные процессы, мембранное газоразделение, сорбция, диффузия, десорбция.

Theoretical foundations of membrane separation of gas mixtures

A. M. Akimov, S. A. Kotelnikova, S. A. Fedorova, E. A. Magdych
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
AMAkimov@sevsu.ru, SAKotelnikova@sevsu.ru, s.a.fedorova@sevsu.ru,EAMacduch@sevsu.ru

Received 15.10.2020 y.; received in final form 20.10.2020 y.

Abstract
Processes caused by a concentration or pressure gradient over the thickness of porous or non-porous membranes based on polymers or materials with a rigid structure are considered.

Keywords: membranes, diffusion-membrane processes, membrane gas separation, sorption, diffusion, desorption.

Введение

Мембранное газоразделение заключается в разделении на компоненты газовых смесей или их обогащение одним из компонентов. При использовании мембран с размером пор 0,005 - 0,03 мкм разделение газов происходит вследствие так называемой кнудсеновской диффузии. Для ее осуществления необходимо, чтобы длина свободного пробега молекул была больше диаметра пор мембраны, т.е. чтобы частота столкновений молекул газа со стенками пор превышала частоту взаимных столкновений молекул. Поскольку средние скорости молекул в соответствии с кинетической теорией газов обратно пропорциональны квадратному корню их масс, компоненты разделяемой смеси проникают через поры мембраны с различными скоростями. В результате пермеат обогащается компонентом с меньшей молекулярной массой, ретант (концентрат) - с большей. Коэффициент разделения смеси равен

$$К_Р = \frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{0.5} \quad (1)$$

где – n1 и n2 число молей компонентов с молекулярными массами М1 и М2.

В реальных условиях весьма трудно с помощью пористых мембран обеспечить чисто кнудсеновский механизм разделения компонентов.

Это объясняется адсорбцией или конденсацией их на стенках пор мембраны и возникновением дополнительного, так называемого конден-

сационного, или поверхностного, газового потока, наличие которого приводит к снижению Кр.

В случае применения непористых мембран разделение газов идет за счет разной скорости диффузии компонентов через мембраны. Для таких мембран проницаемость газов и паров на 2-3 порядка ниже, чем для пористых, но селективность значительно выше.

Процесс проникновения газа через непористую полимерную мембрану состоит из следующих стадий:

- сорбция газа на поверхности мембраны со стороны разделяемой смеси;
- диффузия газа через мембраны;
- десорбция газа с другой стороны поверхности мембраны.

Лимитируюшей стадией данного процесса является вторая стадия - диффузия газа через мембраны, определяемая первым законом Фика

$$G = -D\left(\frac{dC}{dx}\right)F \quad (2)$$

где G - количество газа, прошедшего через мембрану;
D - коэффициент диффузии;
X - расстояние по толщине мембраны;
F - поверхность мембраны.
Интегрируя выражение (2) и делая соответствующие подстановки, получим

$$G = D\left[\frac{(C_1 - C_2)}{\delta}\right]F \quad (3)$$

где С1 и С2 - концентрация диффузионного газа по разным сторонам мембраны;
δ - толщина мембраны.

Непосредственное определение значений концентраций С1 и С2 на поверхности мембраны затруднительно. Поэтому диффузию газов рассматривают как растворение газов в материале мембраны и применяют для определения С1 и С2 закон Генри.

$$C_1 = SP_1 \quad (4)$$

$$C_2 = SP_2 \quad (5)$$

где Р1 т Р2 - давления на одной и другой сторонах поверхности мембраны;
S - коэффициент растворимости (величина, обратная константе Генри).

Подставив (4) и (5) в выражение (3), получим

$$G = DS\left[\frac{(P_1 - P_2)}{\delta}\right]F \quad (6)$$

Это выражение справедливо для простых газов (H2, He, N2, O2 и др.), а также для низкомолекулярных соединений (CH4, C2H6, CO2, NO и др.). Так как газопроницаемость (или коэффициент проницаемости) A=DS, то

$$G = \mathrm{A}\left[\frac{(P_1 - P_2)}{\delta}\right]F \quad (7)$$

Следовательно, скорость проницания газа или пара через мембрану пропорциональна коэффициенту проницаемости, площади мембраны, разности давлений и обратно пропорциональна толщине мембраны. В случае разделения смесей газов под величинами Р1 и Р2 следует понимать парциальное давление компонентов смеси, и выражение (7) для любого i-го компонента примет вид

$$G = \mathrm{A}\left[\frac{(P_{i1} - P_{i2})}{\delta}\right]F \quad (8)$$

Следует отметить, что соотношение скоростей диффузии чистых газов через непористые полимерные пленки хорошо совпадает с соотношением скоростей диффузии этих же газов в их смесях. Таким образом, значение скоростей проницания чистых газов через различные мембраны могут использоваться для предварительного выбора материала мембраны. При этом следует иметь в виду, что вещества, природа которых сходна с химической природой полимера, проникает через него быстрее.

С повышением температуры величина удельной производительности G для непористых мембран возрастает, однако при этом, как правило, снижается селективность φ, которую в первом приближении можно представить как соотношение коэффициентов газопроницаемости чистых компонентов разделяемой смеси, например, для воздуха

$$\varphi = \frac{A_{O_2}}{A_{N_2}} \quad (9)$$

Для проведения процессов мембранного газоразделения обычно применяют полимерные пленки и поливолоконные мембраны, причем последние - в аппаратах высокой производительности.

Для проведения процессов разделения газовых смесей используют аппараты, которые по конструкции принципиально не отличаются от

мембранных аппаратов для жидкофазных процессов разделения.

Мембранное газоразделение применяют:

- с помощью пористых мембран в производстве обогащения урана, для очистки воздуха от радиоактивного криптона, извлечения гелия из природного зада и т.п.;
- с помощью непористых мембран для водорода из продувочных газов производства аммиака и др. (преимущественно металлические мембраны на основе сплавов палладия), обогащения воздуха кислородом, регулирования газовой среды в камерах плодоовощехранилищ, извлечение водорода, аммиака и гели из природных и технологических газов, разделение углеводородов. В перспективе возможно их применение для рекуперации оксидов серы из газовых выбросов.

Испарение через мембрану. Этот процесс разделения исходных смесей, основанный на различной скорости переноса компонентов смеси через полупроницаемую мембрану вследствие различных значений и коэффициентов диффузии. Из исходного раствора через мембрану в токе инертного газа или путем вакуумирования (рисунок 1) отводятся пары, которые затем конденсируются в конденсаторе. При разделении происходит растворение вещества в материале мембраны (сорбция), диффузия его через мембрану и десорбция в паровую фазу с другой стороны мембраны. Процесс переноса вещества через мембрану описывается законом Фика (уравнение (2)).

Состав паров зависит от температуры процесса (влияние давления на его характеристики незначительно), материала мембраны, состава разделяемой смеси и др. Для увеличения скорости процесса раствор нагревают до 30 - 600С, а в паровой зоне создают разрежение.

При выборе оптимальных условий разделения данной смеси испарением через мембрану и материала мембраны следует иметь в виду, что скорость проницания через мембрану выше для следующих веществ:

- с меньшей молекулярной массой в ряду гомологов;
- с молекулами меньших размеров при одинаковой молекулярной массе;
- менее сложной структуры при одинаковой молекулярной массе;

с хорошей растворимостью в материале и высоким коэффициентом диффузии через него.

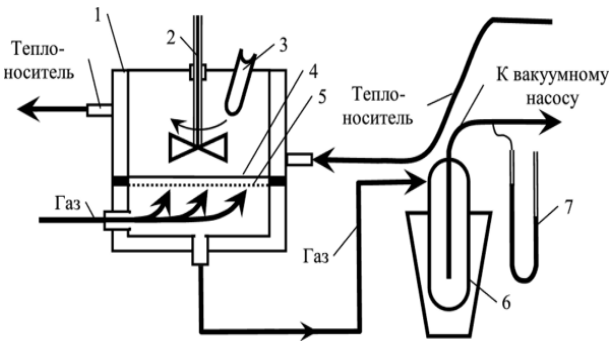


Рис.1. Схема проведения процесса разделения жидких смесей испарением через мембрану: 1 - термостатирующая рубашка; 2 - мешалка; 3 - карман для датчика термоизмерительного прибора; 4 - полупроницаемая мембрана; 5 - пористая подложка; 6 - конденсатор; 7 - вакуумметр.

Для процесса разделения испарением через мембрану применяют пористые и непористые мембраны, обычно на основе различных полимеров (полипропилена, полиэтилена и др.). На основе неорганических материалов (например, керамики) изготовляют пористые мембраны. Эти мембраны обладают большим гидродинамическим сопротивлением, поэтому их целесообразно изготовлять композитными - в виде закрепленных на пористых подложках ультратонких селективных пленок. Наибольшие селективность и проницаемость наблюдаются у лиофильных систем, т. е. когда полярности мембраны и компонента разделяемой смеси совпадают.

Наиболее перспективно применение данного метода для разделения азеотропных смесей. На рисунке 2 представлены варианты (кривые 1-3) разделения азеотропной смеси изопропанол - вода при различных температурах в конденсаторе.

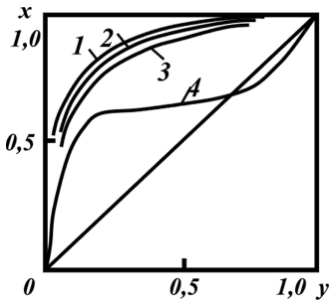


Рис. 2. Экспериментальные результаты по разделению смеси изопропанол - вода при различных температурах в конденсаторе: 1 - при 195,8 °С; 2 - при О °С; 3 - при 20 °С; 4 - равновесная кривая жидкость-пар (без мембраны); ч, у - молярные доли изопропанола соответственно в исходной смеси и в пермеате

На рисунке 2 приведена также равновесная кривая 4 для этой смеси (без мембраны). Такое эффективное разделение азеотропа объясняется тем, что механизм разделения методом испарения через мембрану принципиально отличается от широко применяемой для разделения жидких смесей ректификации, основанной на разности давления (упругости) паров компонентов смеси. Вместе с тем, сочетание мембранных процессов с ректификацией позволяет получать двух-трехкратный экономический эффект. Например, для разделения смеси этанол - вода с использованием баромембранных методов (микрофильтрации и обратного осмоса) и ректификации можно концентрировать разбавленные растворы до составов, близких к азеотропным. Разделение азеотропных смесей экономически выгоднее проводить испарением через мембрану.

Испарение через мембрану перспективно также для разделения углеводородов различных классов, водных растворов органических кислот, кетонов, очистки сточных вод, смещения равновесия в химических реакциях путем удаления одного из продуктов (например, воды при этерификации) и др.

Диализ. Этот процесс основан на различии скоростей диффузии веществ через полупроницаемую мембрану, разделяющую концентрированный и разбавленный растворы. Поэтому его обычно применяют для разделения веществ, значительно различающихся по молекулярным массам, а значит, и по коэффициентам диффузии. Вследствие возникновения градиента концентраций между растворами (концентрированным и разбавленным) растворенные вещества с различными скоростями диффундируют через мембрану в сторону разбавленного раствора. Растворитель (обычно вода) при этом перемещается в обратном направлении, тем самым снижая скорость переноса растворенных веществ. Скорость диализа определяется по первому закону Фика (уравнение (2)).

Диализ проводят в мембранных аппаратах, в основном плоскокамерного типа, а также в аппаратах с полыми волокнами. В этом случае количество вещества М, проходящего через мембрану, может быть определено по уравнению массопередачи

$$M = К_Д F \Delta C_{ср} \tau \qquad (10)$$

где $\Delta C_{ср}$- средняя движущая сила процесса;
Кд - коэффициент массопередачи (коэффициент диализа), который выражается так:

$$К_Д = \frac{1}{\left(1/\beta_1\right)+\left(\delta/D\right)+\left(1/\beta_2\right)} \qquad (11)$$

где β_1 и β_2 — коэффициенты массоотдачи со стороны соответственно концентрированного и разбавленного растворов; σ- толщина мембраны; D - коэффициент диффузий.

Обычно $К_Д$ определяют экспериментально. При известных значениях М (из материального баланса) и $К_Д$ из уравнения (11) находят необходимую поверхность мембраны.

В качестве полупроницаемых мембран для диализа используют целлофан, пленки из нитратов и ацетатов целлюлозы, микропористый поливинилхлорид и др. Диализ обычно применяют для извлечения из растворов низкомолекулярных соединений в медицинской и химической промышленности, производстве ряда биохимических препаратов и др.

В ряде случаев, особенно если допустимо применение повышенного давления над разделяемым раствором, диализ вытесняется более интенсивным мембранным методом - ультрафильтрацией.

Выводы

1. Рассмотрены теоретические основы мембранного разделения газовых смесей, основанные на законах Фика и Генри.
2. Разделение газовых смесей через мембраны включает процессы:
- мембранное разделение;
- испарение через мембрану;
- диализ.

3. Мембранное газоразделение нашло широкое применение в промышленности:
- производство обогащения урана;
- очистка воздуха от радиоактивного криптона;
- выделение водорода из продувочных газов аммиака;
- разделение водорода из продувочных газов аммиака;
- разделение азеотропных смесей;
- производство биохимических препаратов и др.

Список литературы

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник / В.Г.Айштейн, М.К.Захаров, Г.А. Носов и др.: под ред. В.Г.Айштейна –

М.: Высш. Шк. 2003 – 1784с.
2. Камкин В.С. Машины и мппараты химических производств.: Учеб. Пособие / В.С. Камкин, В.А. Платников. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. – 343с.
3. Баромембанные процессы и аппараты: учеб. Пособие / Под ред. Г.И. Николаева – Улан-Удэ: изд-во ВСГТУ, 2007.
4. Акимов А.М., Котельникова С.А. Современные взгляды на механизм переноса вещества через пористые мембраны. // Энергетические установки и технологии 2019. –Т. 5 – №2 - С.111-115.
5. Акимов А.М., Котельникова С.А. Специфика интегрированных мембранных технологий в сочетании с ионным обменом для целей водопоготовки // Энергетические установки и технологии 2018. –Т. 4 – №3 - С.86-91.

References

1. Obshhij kurs processov i apparatov ximicheskoj texnologii: uchebnik / V.G.Ajshtejn, M.K.Zaxarov, G.A. Nosov i dr.: pod red. V.G.Ajshtejna – M.: Vy`ssh. Shk. 2003 – 1784s.
2. Kamkin V.S. Mashiny` i mpparaty` ximicheskix proizvodstv.: Ucheb. Posobie / V.S. Kamkin, V.A. Platnikov. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2004. – 343s.
3. Baromembanny`e processy` i apparaty`: ucheb. Posobie / Pod red. G.I. Nikolaeva – Ulan-Ude`: izd-vo VSGTU, 2007.
4. Akimov A.M., Kotel`nikova S.A. Sovremenny`e vzglyady` na mexanizm perenosa veshhestva cherez poristy`e membrany`. // E`nergeticheskie ustanovki i texnologii 2019. –T. 5 – №2 - S.111-115.
5. Akimov A.M., Kotel`nikova S.A. Specifika integrirovanny`x membranny`x texnologij v sochetanii s ionny`m obmenom dlya celej vodopogotovki // E`nergeticheskie ustanovki i texnologii 2018. –T. 4 – №3 - S.86-91.

УДК 621.548

Полюсная модель распада калия-40, содержащегося в строительном материале и экологические последствия процесса

С.Д. Стрекалов[1], М.А. Фролова[2]

ФГБОУ ВО«Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград Россия, 400005, г. Волгоград, просп. В.И. Ленина, д. 28, Strekalov_sergey@mail.ru

[2] ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, frolova-85@mail.ru*

Статья поступила 28.10.2020 г; после доработки 06.11.2020 г.

Аннотация

В статье представлен анализ иллюстрации процесса распада, имеющийся в литературе. Описаны наиболее часто встречающиеся процессы: β-распад и К-захват орбитального электрона и приводятся полюсные модели процессов, иллюстрировано поясняя процесс на примере диаграмм Феймана. Дается наглядное пояснение наличия отдельных индивидуальных осей и роль парной связи между протоном и электроном при этом. Описывается процесс увеличения угла наклона полюсной оси при увеличении ее энергии, что зависит от энергетического состояния парного электрона. Приводятся матрицы состояний атома.

Ключевые слова: Калий-40, полюсная модель атома, полюсная матрица, β-распад,К-захват.

Application of polar models in the description of radionuclide decomposition on the example of potassium-40

[1]S.D. Strekalov, [2]M.A. Frolova

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University Volgograd, Russia, 400005, Volgograd, ave. IN AND. Lenin, d. 28

strekalov_sergey@mail.ru

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, frolova-85@mail.ru

Received 28.10.2020 y; received in final form 06.11.2020 y.

Abstract

The pole model of the decay process of potassium-40 is given in the article. When using this model, we proceed from the fact that there is a pair connection between the proton and the electron in the form of an individual pole axis, which, with increasing energy, can vary its angle of inclination relative to the generalized axis.An increase in the angle of inclination of the pole axis is accompanied by an increase in its energy, this process is interrelated with the energy state of the pair electron.As the energy of the pair bond increases, the energy of the electron decreases and it occupies an energy level closer to the nucleus.With a critical increase in the energy of the pole axis, it deviates to the maximum angle, the electron, completely giving upenergy, occupies a position that is closest to the nucleus, which creates real prerequisites for combining with the pair proton and the formation of a neutron. The most frequently encountered processes are described: β-decay and capture of the orbital electron

Keywords: Potassium-40, pole model of the atom, pole matrix, β-decay, K-capture.

Введение

Калий является достаточно распространенным химическим элементом в окружающей среде. Более того, нельзя переоценить его значимость для живых организмов, в том числе – человека.

Калий весьма распространен в земной коре:

его в ней 2,1% [1]. Соответственно и радиоактивного калия больше всего наблюдается в земной коре. После того, как человек научился добывать полезные ископаемые, «дополнительный» калий, попав в окружающую среду, стал активно включаться в круговорот веществ в природе. Так калий в качестве химической компоненты стал активной составляющей многих веществ.

Как и любой химический элемент, калий имеет ряд природных нуклидов: $^{39}_{19}$К, $^{40}_{19}$К, $^{41}_{19}$К, с распространенностью в природе 93,1%, 0,0119% и 6,8% соответственно [2, 3]. Радиоактивным является $^{40}_{19}$К, при этом период полураспада его составляет $1{,}3\cdot10^9$ лет [4-6].

Материалы и методика

В связи с тем, что в природных условиях изотопный состав элементов не меняется, то повсеместно, где встречается элемент калия, всегда находится и его радиоактивный изотопом и, следовательно, постоянно происходит испускание ионизирующего излучения.

Например, калий находящийся в материалах, используемых в строительстве: известняке, граните, песчанике дает активность 30-40 Бк/кг, 925-1200 и 300- 400 Бк/кг, соответственно; в продуктах питания: картофеле, бобах, семечках подсолнечника, бананах, орехах; в теле человека: приблизительно равномерно рассредоточен по всему телу. При этом природная (и неустранимая) радиоактивность человеческого организма составляет 4—5 кБк в зависимости от массы тела. Это примерно 80—85 % всей радиоактивности организма [7].

Распад калия-40 происходит по трем направлениям:

β−-распад с вероятностью 89,28% протекает по схеме [6]:

$$^{40}_{19}\text{К} \xrightarrow[T_{0,5}=1{,}3\cdot10^9\text{лет}]{} {}^{40}_{20}\text{Ca} + {}^{0}_{-1}\beta + \nu$$

захват орбитального электрона происходит с вероятность 10,72 % [6]:

$$^{40}_{19}\text{К} + \text{e}^- \xrightarrow[T_{0,5}=1{,}3\cdot10^9\text{лет}]{} {}^{40}_{18}Ar + \nu$$

Крайне редко, всего в 0,001 % случаев, калий распадается в по схеме позитронного распада, с испусканием позитрона (β+) и нейтрино:

$$^{40}_{19}\text{К} \xrightarrow[T_{0,5}=1{,}3\cdot10^9\text{лет}]{} {}^{40}_{18}Ar + {}^{0}_{+1}\beta + \nu$$

Визуализировать процесс достаточно легко посредствам построения Диаграмм Феймана [8 – 10].

На рисунке 1 приведена диаграмма Фейнмана распада нейтрона и протона.Как нейтрон, так и протон – барионы, состоящие из кварков. Соответствующие обменам W или Z бозонам “слабые” вершины обладают еще одной особенностью, которой не имеют ни “сильные”, ни электромагнитные вершины – в этих вершинахможет происходить превращение одного кварка в другой. Поэтому взаимопревращения адронов – результат слабых взаимодействий.

К-захват электрона происходит при пульсации атома Калий-40. Энергия пульсирует от ядра к электрону, при перемещении ее в ядро отделяется индивидуальная полюсная ось и на ней размещается электрон. Чем на больший угол откланяется индивидуальная ось, тем больше энергия забирается от электрона. При критических значениях угол отклонения будет максимальным, а энергия электрона минимальной, что создает предпосылки к захвату его протоном, из которого выходит полюсная ось, и превращение этой системы в нейтрон. В этом случае атом Калий -40 превращается в аргон.

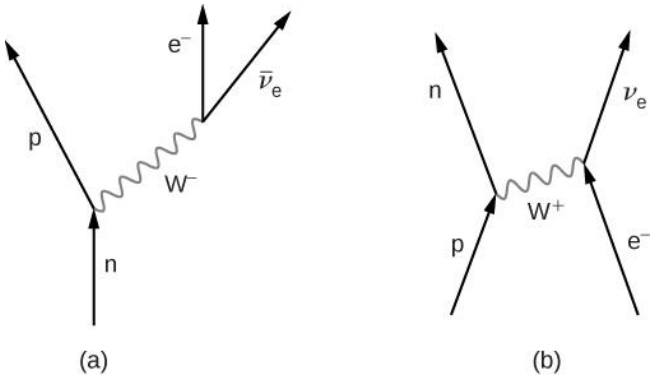


Рис. 1 Диаграмма Феймана электронного (a) и позитронного (b) распада

Позитронный распад калия:

$$^{40}_{19}\text{K} \xrightarrow[T_{0,5}=1{,}3\cdot10^{9}\text{лет}]{} {}^{40}_{18}Ar + {}^{0}_{+1}\beta + \nu$$

Для описания процесса распада, с разбивкой каждого этапа по уровням, удобно применять матричную формулировку, предложенную Вернером Гейзенбергом, где каждая механическая наблюдаемая величина математически представляется матрицей (известной также, как ‘‘оператор’’). Для системы с N базисными состояниями (где в большинстве случаев N = ∞) это соответствует N x N (рис.2) квадратной эрмитовой матрице. Некоторое отдельно взятое квантовое состояние математически будет представляться матричным столбцом N x 1 (рис.3) [11].

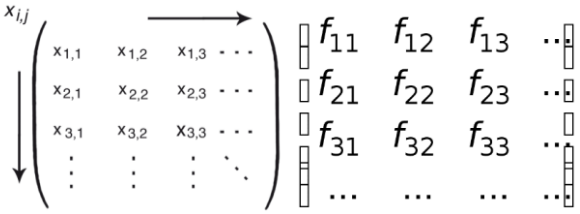


Рис. 2 Квадратная эрмитовая матрица состояний

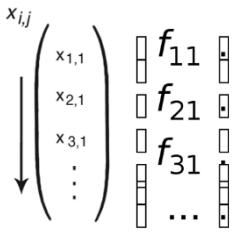
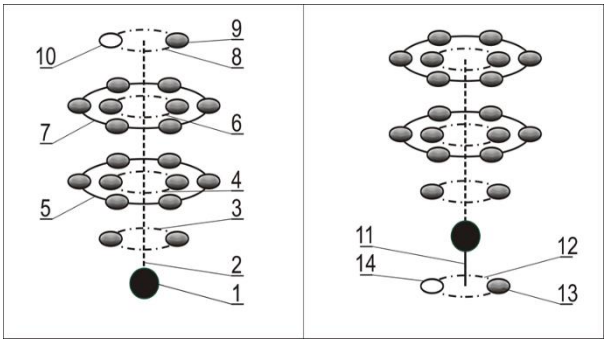


Рис. 3 Матричныйстолбец

При использовании подобных методов описания процесса необходимо учитывать, существование парной связи между протоном и электроном, которая представлена индивидуальной полюсной осью. При увеличении энергии полюсная ось может изменять угол своего наклона относительно обобщенной оси, что влечет за собой увеличение ее энергии (рис.4). Описанный процесс напрямую зависит от энергетического состояния парного электрона: при возрастании энергии парной связи – уменьшается энергия электрона и он занимает энергетический уровень, расположенный ближе к ядру. При критическом увеличении энергии полюсной оси, то есть при ее отклонении на максимальный угол, электрон, полностью отдав энергию, занимает положение, находящееся в максимальной близости от ядра. Это создает реальные предпосылки к процессу объединения электрона с парным протоном и, как следствие, образованию нейтрона. Так, с помощью матриц можно описать не только сам процесс распада радионуклида в целом, выделяя уровни энергетических переходов, но и охарактеризовать каждое из присущих данному радионуклиду состояний при распаде.



а) *б)*

Рис 4 Калий 40 (а) и Калий-40 с одной отделенной индивидуальной осью (б):
1 – ядро; 2 – полюсная ось; 3 – 1sорбиталь; 4 – 2sорбиталь; 5 – 2p орбиталь; 6 - 3sорбиталь;7 – 3p орбиталь; 8 - 4sорбиталь; 9 – электрон; 10 – вакансия; 11 – индивидуальная ось; 12 –отделенная 1sорбиталь; 13 – отделенный электрон; 14 – отделенная вакансия

Результаты

Испытывая распад, калий-40 претерпевает переход между пятью состояниями последовательно.

Первое состояние представлено одной обобщенной осью электрона, находящейся на орбитали 4s:

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^1 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^1 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\,5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Втрое состояние – одна обобщенная и одна индивидуальная ось расположенная в положении второй полюсной оси, электрон находится на орбитали 3s

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^0 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^1 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\,5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Третье состояние – одна обобщенная и одна индивидуальная ось, расположенная в положении третьей полюсной оси, электрон находится

на орбитали 2s.

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 & 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^0 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^0 3_2p^0 3_2d^0 & & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & & 4s^0 \\ 1_4s^1 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Четвертое состояние – одна обобщенная и одна индивидуальная ось, расположенная в положении четвертой полюсной оси, электрон находится на орбитали 1s

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^0 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^1 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Пятое состояние – одна обобщенная ось, электрон в результате захвата образовал с протоном нейтрон.

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^0 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Калий-40 в результате этого процесса превратился в аргон с порядковым номером 18с выделением электронного нейтрино.

Рассмотрим полюсную модельβ - распада калий-40. Полюсная ось электрона начинает терять энергию, угол ее отделения уменьшается, электрон набирает энергию и выходит из непосредственной связи с протоном ядра и занимает место наорбитале энергетического уровня. Атом в этом случае увеличивает свой заряд на единицу (превращаясь в другой элемент с большим порядковым номером) и у него появляется еще один электрон.

Электронный распад калия

$$^{40}_{19}\text{K} \xrightarrow[\text{T}_{0,5}=1{,}3\cdot10^9\text{лет}]{} {}^{40}_{20}\text{Ca} + {}^{0}_{-1}\beta + \nu$$

Индивидуальная полюсная ось, проходя поэтапно положения 5, 4,3, 2, соединяется с обобщенной осью. Электрон, отделившись от протона, одновременно с разворотом полюсной оси занимает поэтапно положения 1s, 2s, 3s, 4s.

Рассмотрим полюсные матрицы, характеризующие состояние атома в процессе преобразования калия 40 в кальций.

Базовое состояние

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^1 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^1 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Первое состояние – одна обобщенная ось, возникновение индивидуальной оси в положении 4 полюсной оси и электрона в состоянии 1s. Полюсная матрица, соответствующая этому состоянию, будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^1 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^1 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^1 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Второе состояние – одна обобщенная ось, возникновение индивидуальной оси в положении 3 полюсной оси и электрона в состоянии 2s. Полюсная матрица, соответствующая этому состоянию, будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^1 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^1 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Третье состояние – одна обобщенная ось, возникновение индивидуальной оси в положении 2 полюсной оси и электрона в состоянии 3s. Полюсная матрица, соответствующая этому состоянию, будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^1 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^1 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Четвертое состояние – одна обобщенная ось, объединение индивидуальной оси с обобщенной в положении 1 полюсной оси и нахождение электрона в состоянии 4s. Полюсная матрица, соответствующая этому состоянию, будет

иметь вид:

$$\begin{bmatrix} 1_1s^2 2_1s^2 2_1p^6 3_1s^2 3_1p^6 3_1\, 3d^0 & 4s^2 \\ 1_2s^0 2_2s^0 2_2p^0 3_2s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_3s^0 2_3s^0 2_2p^0 3_3s^0 3_2p^0 3_2d^0 & 4s^0 \\ 1_4s^0 2_4s^0 2_4p^0 3_4s^0 3_4p^0 3_4d^0 & 4s^0 \\ 1_5s^0 2_{\ 5}s^0 2_5p^0 3_5s^0 3_5p^0 3_5d^0 & 4s^0 \end{bmatrix}$$

Калий-40 в результате указанных процессов превращается в стабильные кальций и аргон, с выделением при этом нейтрино [12-14].

Присутствие калия-41, как природного материала, в строительном сырье требует проведения особого вида контроля – радиационного. Так, от величины удельной эффективной активности радионуклидов зависит безопасность используемых строительных материалов и, как следствие, безопасность строящегося жилья. С учетом удельной эффективной активности радионуклидов и требований [15-17] определяются классы строительных материалов и области их применения: все виды строительства; дорожное строительство в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, строительство производственных сооружений; дорожное строительство вне населенных пунктов и вопрос об использовании материала решается по согласованию с Госкомсанэпиднадзором.

Заключение

Использование полюсных моделей распада калия – 40 с применением полюсных матриц позволяет наглядно проиллюстрировать особенности самого процесса распада, с поэтапным энергетическим переходом атома, и процесс испускания ионизирующей частицы, в том числе захвата электрона и β – распада с выделением электронного нейтрино и электронного антинейтрино. Зная этапы процесса испускания частиц при распаде и опираясь на нормативные документы, возможно обеспечить радиационную безопасность населения, подбирая в качестве строительных материалов сырье, наиболее пригодное для возведение жилищных конструкций.

Список литературы

1. Леенсон И.А. Радиоактивность внутри нас // Химия и жизнь – XXI век. – 2009. - №7, с. 36-38 [Leenson I.A. Radioaktivnost' vnutri nas // Himija i zhizn' – XXI vek. – 2009;7:36-38 (In Russ.)].
2. *Гордеев, И.В.* Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов / И.В Гордеев, Д.А. Кардашев, А.В.Малышев. – Москва.:Издательство государственного комитета совета министров СССР по использованию атомной энергии, - 1960. – 278 с. [Gordeev, I.V. Spravochnik po jaderno-fizicheskim konstantam dlja rascheta reaktorov / I.V Gordeev, D.A. Kardashev, A.V.Malyshev. – Moskva.:Izdatel'stvo gosudarstvennogo komiteta soveta ministrov SSSR po ispol'zovaniju atomnoj jenergii, - 1960. 278 p. (In Russ.)].
3. Справочник по ядерной физике / Перевод с английского под редакцией Л.А.Арцимовича. – М.: Гос.издат физико-математической литературы, 1963. – 632 с. [Spravochnik po jadernoj fizike / Perevod s anglijskogo pod redakciej L.A.Arcimovicha. – M.: Gos.izdat fiziko-matematicheskoj literatury, 1963. 632 p (In Russ.)].
4. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09, утвержденных постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47. [Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB-99/2009. Sanitarnye pravila i normativy. SanPiN 2.6.1.2523-09, utverzhdennyh postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 07.07.2009 № 47. (In Russ.)].
5. Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М. : Советская энциклопедия, 1969—1978. [Bol'shaja sovetskaja jenciklopedija : [v 30 t.] / gl. red. A. M. Prohorov. — 3-e izd. — M. : Sovetskaja jenciklopedija, 1969—1978 (In Russ.)].
6. Audi G., Kondev F. G., Wang M., Huang W. J., Naimi S. The Nubase 2016 evaluation of nuclear properties (англ.) //Chinese Physics C. - 2017. - Vol. 41,iss. 3. - P. 030001-1—030001-138. - DOI:10.1088/1674-1137/41/3/030001.
7. Are Our Bodies Radioactive? / Health Physics Society, 2014: «The potassium content of the body is 0.2 percent, so for a 70-kg person, the amount of 40K will be about 4.26 kBq.» Radiation Information Network's Radioactivity in Nature / Idaho University «Natural Radioactivity in your body» (ICRP 30 data).
8. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ осуществляется при поддержке НИИЯФ МГУ. Доступно по: http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html/. Ссылка активна на 16.04.2020.
9. Р. Фейнман. КЭД — странная теория света и вещества. — (Библиотечка «Квант», вып. 66).— М.: Наука, 1988. – с.144. [R. Fejnman. KJeD — strannaja teorija sveta i veshhestva. — (Bibliotechka «Kvant», vyp. 66). — M.: Nauka, 1988;144. (In Russ.)].
10. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Тома 8, 9: Квантовая механика. Перевод с английского (издание 3).— Эдиториал УРСС.—ISBN 5-354-00706-2. [Fejnman R., Lejton R., Sjends M. Fejnmanovskie lekcii po fizike. Toma 8, 9: Kvantovaja mehanika.

Perevod s anglijskogo (izdanie 3). — Jeditorial URSS. — ISBN 5-354-00706-2].
11. Nine formulations of quantum mechanics Am. J. Phys. 70 (3), March 2002 http://ojps.aip.org/ajp/ Daniel F. Styer (Dan.Styer@oberlin.edu), Miranda S. Balkin, Kathryn M. Becker, Matthew R. Burns, Christopher E. Dudley, Scott T. Forth, Jeremy S. Gaumer, Mark A. Kramer, David C. Oertel, Leonard H. Park, Marie T. Rinkoski, Clait T. Smith, and Timothy D. Wotherspoon Department of Physics, Oberlin College, Oberlin, Ohio 44074 Received 18 July 2001; accepted 29 November 2001. DOI: 10.1119/1.1445404.
12. Стрекалов, С.Д. Полюсное строение атома // 2 Всероссийк. н.-техн. конф. «Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития в условиях Волгоградской области» - Волгоград, 2009.- С. 442-452. [Strekalov, S.D. Poljusnoe stroenie atoma // 2 Vserossijk. n.-tehn. konf. «Nanotehnologii i nanomaterialy: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija v uslovijah Volgogradskoj oblasti» - Volgograd; 2009, P. 442-452 (In Russ.)].
13. Стрекалов, С.Д. Физическая химия: Полюсные модели элементов и систем [Монография] - Гос. образов.высш. проф. образования «Волгогр. гос. ун-т».- 2-е изд., перер. и дополн.- Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2011.- 136с. [Strekalov, S.D. Fizicheskaja himija: Poljusnye modeli jelementov i sistem [Monografija] - Gos. obrazov.vyssh. prof. obrazovanija «Volgogr. gos. un-t».- 2-e izd., perer. i dopoln.- Volgograd: Izd-vo VolGU, 2011. 136 p (In Russ.)].
14. Стрекалов, С.Д. Нанопринципы создания волновой техники // Российские технологии для индустрии: Сб. докл. межд. Семинара: «Нанотехнологии и оптоэлектроника в биологии, медицине и экологии» – С.-Пб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2006. – С.90. [Strekalov, S.D. Nanoprincipy sozdanija volnovoj tehniki // Rossijskie tehnologii dlja industrii: Sb. dokl. mezhd. Seminara: «Nanotehnologii i optojelektronika v biologii, medicine i jekologii» – S.-Pb., FTI im. A.F. Ioffe, 2006. P.90 (In Russ.)].
15. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. – М.:Роспотребнадзор, 2009. – 100 с. [Sanitarnye pravila i normy: SanPiN 2.6.1.2523-09 Normy radiatsionnoi bezopasnosti NRB-99/2009. – M.:Rospotrebnadzor, 2009. – P 100 (In Russ.)]
16. Санитарные правила: СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010). – М.:Минздрав России, 1999. – 99 с. [Sanitarnye pravila: SP 2.6.1.2612-10 Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoi bezopasnosti (OSPORB - 99/2010). – M.:Minzdrav Rossii, 1999. – P 99 (In Russ.)]
17. ГОСТ 30108-94 – Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. - М.: Стандартинформ, 2007 [GOST 30108-94 – Materialy i izdeliya stroitel'nye. Opredelenie udel'noi effektivnoi aktivnosti estestvennykh radionuklidov. - M.: Standartinform, 2007 (In Russ.)]

References

1. Leenson I.A. Radioaktivnost' vnutri nas // Himija i zhizn' – XXI vek. – 2009;7:36-38 (In Russ.)
2. Gordeev, I.V. Spravochnik po jaderno-fizicheskim konstantam dlja rascheta reaktorov / I.V Gordeev, D.A. Kardashev, A.V.Malyshev. – Moskva.:Izdatel'stvo gosudarstvennogo komiteta soveta ministrov SSSR po ispol'zovaniju atomnoj jenergii, - 1960. 278 p. (In Russ.)
3. Spravochnik po jadernoj fizike / Perevod s anglijskogo pod redakciej L.A.Arcimovicha. – M.: Gos.izdat fiziko-matematicheskoj literatury, 1963. 632 p (In Russ.)
4. Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB-99/2009. Sanitarnye pravila i normativy. SanPiN 2.6.1.2523-09, utverzhdennyh postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 07.07.2009 № 47. (In Russ.)
5. Bol'shaja sovetskaja jenciklopedija : [v 30 t.] / gl. red. A. M. Prohorov. — 3-e izd. — M. : Sovetskaja jenciklopedija, 1969—1978 (In Russ.)
6. Audi G., Kondev F. G., Wang M., Huang W. J., Naimi S. The Nubase 2016 evaluation of nuclear properties (англ.) //Chinese Physics C. - 2017. - Vol. 41,iss. 3. - P. 030001-1—030001-138. - DOI:10.1088/1674-1137/41/3/030001.
7. Are Our Bodies Radioactive? / Health Physics Society, 2014: «The potassium content of the body is 0.2 percent, so for a 70-kg person, the amount of 40K will be about 4.26 kBq.» Radiation Information Network's Radioactivity in Nature / Idaho University «Natural Radioactivity in your body» (ICRP 30 data).
8. Proekt kafedry` obshhej yadernoj fiziki fizicheskogo fakul`teta MGU osushhestvlyaetsya pri podderzhke NIIYaF MGU. Dostupno po: http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html/. Ssy`lka aktivna na 16.04.2020.
9. R. Fejnman. KJeD — strannaja teorija sveta i veshhestva. — (Bibliotechka «Kvant», vyp. 66). — M.: Nauka, 1988;144. (In Russ.)
10. Fejnman R., Lejton R., Sjends M. Fejnmanovskie lekcii po fizike. Toma 8, 9: Kvantovaja mehanika. Perevod s anglijskogo (izdanie 3). — Jeditorial URSS. — ISBN 5-354-00706-2].
11. Nine formulations of quantum mechanics Am. J. Phys. 70 (3), March 2002 http://ojps.aip.org/ajp/ Daniel F. Styer (Dan.Styer@oberlin.edu), Miranda S. Balkin, Kathryn M. Becker, Matthew R. Burns, Christopher E. Dudley, Scott T. Forth, Jeremy S.

Gaumer, Mark A. Kramer, David C. Oertel, Leonard H. Park, Marie T. Rinkoski, Clait T. Smith, and Timothy D. Wotherspoon Department of Physics, Oberlin College, Oberlin, Ohio 44074 Received 18 July 2001; accepted 29 November 2001. DOI: 10.1119/1.1445404.

12. Strekalov, S.D. Poljusnoe stroenie atoma // 2 Vserossijk. n.-tehn. konf. «Nanotehnologii i nanomaterialy: sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija v uslovijah Volgogradskoj oblasti» - Volgograd; 2009, P. 442-452 (In Russ.)
13. Strekalov, S.D. Fizicheskaja himija: Poljusnye modeli jelementov i sistem [Monografija] - Gos. obrazov.vyssh. prof. obrazovanija «Volgogr. gos. un-t».- 2-e izd., perer. i dopoln.- Volgograd: Izd-vo VolGU, 2011. 136 p (In Russ.)
14. Strekalov, S.D. Nanoprincipy sozdanija volnovoj tehniki // Rossijskie tehnologii dlja industrii: Sb. dokl. mezhd. Seminara: «Nanotehnologii i optojelektronika v biologii, medicine i jekologii» – S.-Pb., FTI im. A.F. Ioffe, 2006. P.90 (In Russ.)
15. Sanitarnye pravila i normy: SanPiN 2.6.1.2523-09 Normy radiatsionnoi bezopasnosti NRB-99/2009. – M.:Rospotrebnadzor, 2009. – P 100 (In Russ.)
16. Sanitarnye pravila: SP 2.6.1.2612-10 Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoi bezopasnosti (OSPORB - 99/2010). – M.:Minzdrav Rossii, 1999. – P 99 (In Russ.)
17. GOST 30108-94 – Materialy i izdeliya stroitel'nye. Opredelenie udel'noi effektivnoi aktivnosti estestvennykh radionuklidov. - M.: Standartinform, 2007 (In Russ.)

УДК 66.067.9

Очистка сточных вод от ионов никеля (II) термически модифицированными природными сорбентами

С.А.Федорова, Е.А.Магдыч, А.М.Акимов, А.А.Кравчук
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.s.a.fedorova@sevsu.ru,EAMacduch@sevsu.ru, AMAkimov@sevsu.ru

Статья поступила 13.11.2020 г.; после доработки 17.11.2020 г.

Аннотация

На модельных растворахNiSO$_4$с концентрацией ионов никеля = 1 г/л, исследовали сорбционные свойства модифицированных природных сорбентов - шунгита, цеолита и белого кварца. Определение никеля (II) проводилифотоэлектроколориметрическим методом с диметилглиоксимом в присутствии окислителя.Показано, что термическая модификация при температуре, 400^{0}С увеличивает сорбционную способность на 23 %.

*Ключевые слова:*шунтит, цеолит, белый кварц, ионы никеля, сорбция.

Purification of waste water from nickel ions (II) by thermally modified natural sorbents

S.A. Fedorova, Magdych E.A., Akimov A.M., Kravchuk A.A.
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]s.a.fedorova@sevsu.ru,EAMacduch@sevsu.ru, AMAkimov@sevsu.ru

Received 13.11.2020 y.; received in final form 17.11.2020 y.

Abstract

On model solutions of NiSO4 with a concentration of nickel ions = 1 g / l, the sorption properties of modified natural sorbents - shungite, zeolite and white quartz were studied. Nickel (II) was determined by the photoelectrocolorimetric method with dimethylglyoxime in the presence of an oxidizing agent. It is shown that thermal modification at a temperature of 400^{0}C increases the sorption capacity by 23%.

Keywords: shuntite, zeolite, white quartz, nickel ions, sorption.

Введение

В Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года отмечается, что из-за сброса сточных вод, качество водных объектов продолжает оставаться неблагоприятным. «В первую очередь вследствие сбросов промышленных и бытовых сточных вод, поверхностных стоков вод с сельскохозяйственных угодий. Так, 19 процентов сточных вод сбрасывается в водные объекты без очистки, 70 процентов - недостаточно очищенными и только 11 процентов - очищенными до установленных нормативов допустимых сбросов. Сброс неочищенных и недостаточно очищенных сточных вод является причиной загрязнения поверхностных и подземных вод, накопления в донных отложениях загрязняющих веществ, деградации водных экосистем. Это приводит к тому, что от 30 до 40 процентов населения страны регулярно пользуются водой, не соответствующей гигиеническим нормативам. Вследствие загрязнения питьевой воды химическими веществами и микроорганизмами увеличивается риск смертности (в среднем на 11 тыс. случаев ежегодно) и заболеваемости населения (в среднем на 3 млн. случаев ежегодно).» [1].

Очистка сточных вод позволяет не только

снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, но и сберечь водные ресурсы, используя повторно очищенную воду в производственном цикле.

Соли цинка, меди, никеля, свинца, кадмия, кобальта содержатся в сточных водах горнообогатительных фабрик, металлургических, машиностроительных, металлообрабатывающих, химических, химико-фармацевтических, лакокрасочных, текстильных и других промышленных предприятий. Бытовые сточные воды, поступающие в сеть городской канализации, также содержат медь, цинк, хром, свинец, железо, никель, кадмий, марганец, ртуть, серебро и кобальт[2].

Для очистки сточных вод применяются физические, физико-химические и биологические подходы. В соответствии с этим различаются и методы очистки: механические (процеживание, фильтрация, отстаивание и т.д.), биологические (биофильтрация, аэротенки и т.п.) и физико-химические (коагуляция, ионный обмен, экстракция, сорбция и т.д.) [3,4].

Кроме того, по тем или иным причинам (наличие уже существующего оборудования, экономические факторы и т.д.), определенные металлы традиционно удаляют наработанными методами. Так, по мнению группы компаний «Аргель» [5] для извлечения из загрязненных стоков ионов цинка (II), меди (II), никеля (II), наиболее рациональным методом является реагентный.

В [2] отмечается, что для удаления никеля лучшие результаты дают химические и физико-химические методы; обратным осмосом — эффект 92—96%, адсорбцией на активном угле — 95—99%.

Достаточно широкий спектр задач очистки от разных типов тяжелых металлов решается с помощью сорбционных методов [6-8].

В работе [9] представлены результаты экстракции Co(II) и Ni(II) из модельных и реальных растворов с использованием бис(2,4,4-триметилпентил) фосфиновой кислоты (т. е. Цианекс 272), для рекуперация ценных компонентов из отходов, полученных при выщелачивании стальных обрезков авиационных двигателей.

Для селективного и эффективного удаления Ni(II) из многокомпонентных сточных вод авторы [10] использовали функционализированные карбоксиметилхитозаном микросферы полиакриловой кислоты (PAA-CMCs), синтезированные методом прививочной сополимеризации.

В исследовании[11] для очистки гальванических сточных вод, содержащих никель-органические комплексы, предложено использовать кальцинированный гальванический шлам (CES). Так, при добавлении 50 ммоль/л H_2O_2 и 1,5 г/л CES 87% общего никеля можно было удалить в течение 50 мин, когда общая концентрация никеля в Ni(II)-цитратсодержащих гальванических сточных водах составляла 283 мг/л.

Авторы [12] считают, что для удаления ионов Co (II) и Ni (II) из водного раствора высокоэффективными сорбентами являются глициновые функционализированные частицы кремнезема (SiO2-Gly).

Объектом исследования являются модельные растворы сульфата никеля с концентрацией ионов никеля 1 г/л.

Цель исследования

Определение сорбционной способности к ионам никеля термически модифицированных природных сорбентов - шунгита, цеолита и белого кварца.

Задачи исследования

1. Анализ свойств природных сорбентов: шунгита, цеолита и белого кварца.
2. Экспериментальное исследование сорбционной очистки раствора сульфата никеля с использованием термически модифицированных сорбентов - шунгита, цеолита и белого кварца.

Анализ свойств природных сорбентов: шунгита, цеолита и белого кварца

Шунгит занимает промежуточное положение между амфотерным углеродом и кристаллическим графитом. Содержит 30 масс. % углерода, 45 масс. % кварца и около 20 масс. % силикатных слюд. Содержит фуллереноподобные регулярные структуры в количестве 0,0001 – 0,001 масс. %. Восстановительные, каталитические и сорбционные свойства позволяют использовать шунгитовые породы в процессах очисти воды от таких загрязнителей, как аммиак, тяжелые металлы, пестициды, нефтепродукты, ПАВ, фенолы и т.п.. Структура шунгита – аллотропная форма метастабильного углерода, который находится на предграфитовой стадии углефикации. Шунгитовый углерод равномерно распределен в силикатном каркасе из мелкодисперстных кристаллов кварца, размерами 1-10 мкм. Химический состав шунгитов Зажогинского месторождения представляет собой: C - 30 масс.%, SiO2 – 57 масс. %, TiO2 – 0,2 масс. %, Al2O3 – 4 масс. %, FeO – 0,6 масс. %, Fe2O3 – 1,49 масс. %, MgO – 1,2 масс. %, MnO – 0,15 масс. %, K2O – 1,5 масс. %, S–1,2 масс. % и др.. После термического

обжига при 1200 – 1400 ˚С химический состав шунгита изменяется: С - 26,25 масс. %, SiO2 – 3,45 масс. %, Al2O3 – 3,05 масс. %, FeO – 0,32 масс. %, Fe2O3 – 1,01 масс. %, MgO – 0,56 масс. %, MnO – 0,12 масс. %, K2O – 1,23 масс. %, S– 0,37 масс. % и др..Как видим, максимальное изменение претерпевает диоксид кремния - его содержание уменьшается на 94% [13, 14].

Цеолиты – гидратированные алюмосиликаты щелочных элементов. Характеризуются сильными сорбирующими свойствами. Цеолит выполняет функцию механического фильтра, а как ионообменник он обладает достаточно большой емкостью и широким спектром действия в отношении тяжелых металлов и радиоактивных элементов, сорбирует бактерии и вирусы. Особенности адсорбции на цеолитах связаны с тем, что ажурность кристаллической структуры создает большой адсорбционный объем (до 0,54 смЗ/г для фожазитов), а его геометрия определяет молекулярно-ситовые свойства. Наличие акцепторных центров (катионы, центры кислоты Льюиса), прочно удерживающих доноры электронов, или ОН-групп, прочно удерживающих основания, обусловливает сильное взаимодействие адсорбируемых молекул с адсорбентом. Разработанная Санкт-Петербургским Научно-Исследовательским Институтом Академии Коммунального Хозяйства технология глубокой очистки воды основана на использовании природного цеолита в качестве сорбента в сочетании с осуществлением непрерывной рециркуляции осадка на сооружениях первой ступени очистки воды. При этом содержание остаточного алюминия снижается на 20-44%, хлорорганических соединений 46-64% (по хлороформу) фенола - 63-83%. Наблюдается также снижение содержания ионов тяжелых металлов в исходной воде: свинца на 94%, меди - на 64-80%, цинка - на 16,7-27,8%, железа на 85,7%, хрома - на 74-76%, кадмия - на 40%. (Водоочистка. Применение цеолита в водоочистке и водоподготовке [15, 16].

Кварц. Кварцевый песок представляет собой дробленый минерал с большим содержанием кварца (до 98%). По величине песчинок материал подразделяют на следующие фракционные группы: пылевидный тип, имеющий размер частичек меньше 0,1 мм; средняя фракционная группа, с размером песчинок от 0,1 до 0,4 мм; крупный размер фракции, с величиной песчинок от 0,5 до 1 мм; самый крупный размер – кварцевая крошка, имеющая размер фракции более 1 мм. Пористая структура материала, состоящего из песчинок, придает ему адсорбирующие свойства, что позволяет задерживать соли тяжелых металлов, радионуклиды, а также обеззараживать от других вредных компонентов [17, 18].

Таким образом, все используемы сорбенты в своей основе имеют диоксид кремния с фракциями от 0,1 мм до наночастиц. При нормальных условиях диоксид кремния чаще всего находится в полиморфной модификации α-кварца, которая при температуре выше +573 °С обратимо переходит в β-кварц. При дальнейшем повышении температуры кварц переходит в тридимит и кристобалит. Эти полиморфные модификации устойчивы при высоких температурах и низких давлениях. При высоких температуре и давлении диоксид кремния сначала превращается в коэсит, а затем— в стишовит [19].

Представляет интерес исследовать возможное влияние образующихся модификаций диоксида кремния (который входит в состав шунгита, цеолита и кварца) на его сорбционные свойства по отношению к катионам никеля (II).

Экспериментальное исследование сорбционной очистки раствора сульфата никеля с использованием термически модифицированных сорбентов - шунгита, цеолита и белого кварца

1.*Приготовление раствора сульфата никеля из NiSO4 ·6H2O с концентрацией катионов никеля 1 г/л.*

На аналитических весах взвесили 4,46 г NiSO4 ·6H2O. Навеску засыпали в мерную колбу на 1000 мл, довели до метки дистиллированной водой и перемешивали до полного растворения.

2. *Определение никеля (II) фотоэлектроколориметрическим методом с диметилглиоксимом в присутствии окислителя.*

Определения никеля (II) проводили по методике выполнения измерений массовой концентрации никеля в поверхностных водах суши фотометрическим методом с диметилглиоксимом [20]. Метод основан на измерении оптической плотности окрашенного раствора никеля (II) с диметилглиоксимом в щелочной среде.

В пять мерных колб объёмом 100 мл приливали по 50 мл дистиллированной воды, вносили модельный раствор никеля (II) по 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 мл. Затем в каждую мерную колбу добавляли по 0,5 мл раствора J_2(0,05М) и по 0,5 мл раствора диметилглиоксима (1%) в гидроокиси натрия (20 %). Растворы в мерных колбах доводили до метки дистиллированной водой и тщательно перемешивали. Эти растворы необходимы для построения градуировочного графика.

Для приготовления раствора сравнения в

мерную колбу ёмкостью 100 мл вносили 50 мл дистиллированной воды, 0,5 мл раствора J_2(0,05М), 0,5 мл раствора диметилглиоксима (1%) в гидроокиси натрия (20 %), доводили до метки дистиллированной водой и перемешивали.

Измерения оптической плотности каждого раствора проводили три раза на КФК-2МП (колориметр фотоэлектрический концентрационный), в кюветах с толщиной окрашенного слоя 5 см при длине волны λ = 490 нм.

По результатам измерений был построен градуировочный график, описываемый уравнением:

$$y = 0{,}2122 + 42{,}61x, \quad (1)$$

где у - оптическая плотность,

х - концентрация катионов никеля (II) (г/л).

3. *Порядок выполнения эксперимента.* Определяли изменение концентрации никеля (II) в растворах при динамической сорбции с исследуемыми сорбентами. В качестве сорбентов использовались шунгит, цеолит и белый кварц. Каждый из них прокаливали в муфельной печи при температуре 200°С, 400°С и 600°С в течение трёх часов. Затем навеску 5 г каждого сорбента (необработанного, обработанного при 200°С, при 400°С и при 600°С) переносили в мерный стакан, добавляли 100 мл модельного раствора никеля (II). Содержимое стакана перемешивали магнитной мешалкой. Каждые 5 минут отбирали пипеткой аликвоту 5 мл и переносили в воронку с фильтровальной бумагой. Очищенную аликвоту модельного раствора никеля (II) переносим в колбу на 100 мл и измеряли оптическую плотность на КФК-2 МП по вышеприведенной методике.

Первую серию опытов проводили с использованием контрольных образцов шунгита, цеолита и белого кварца, которые не подвергались термической обработке. Результаты приведены на рисунке 1.

За все время динамического контакта с модельным раствором концентрация никеля уменьшилась на 8% от первоначальной. Все исследуемые сорбенты вели себя примерно одинаково.

Далее мы проводили испытание в динамических условиях сорбции катионов никеля (II) сорбентами, которые повергались термической модификации при температуре 200^{0}С. Результаты приведены на рисунке 2.

При термической обработке шунгита, цеолита и белого кварца наблюдается увеличение сорбционной способности шунгита и цеолита. Характеристики кварца практически не изменились.

Сорбционная способно модифицированных при температуре400^{0}С кварца, шунгита и цеолита существенно не отличается (рисунок 3).

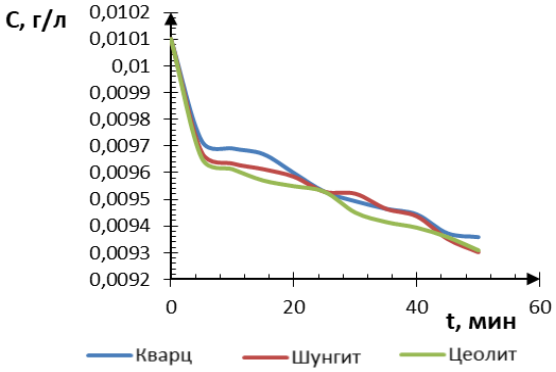


Рис. 1. Зависимость концентрации Ni (II) от времени перемешивания с сорбентами без модификации

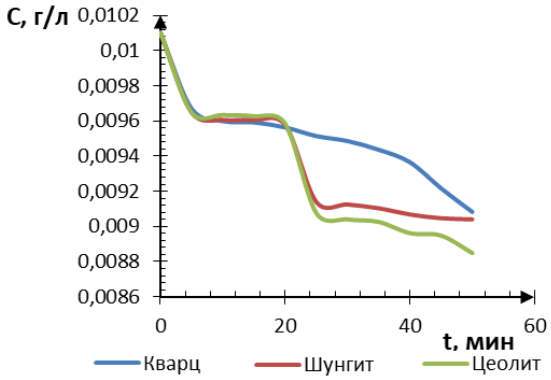


Рис. 2. Зависимость концентрации Ni (II) от времени перемешивания с сорбентами, термически модифицированным при температуре 200^{0}С.

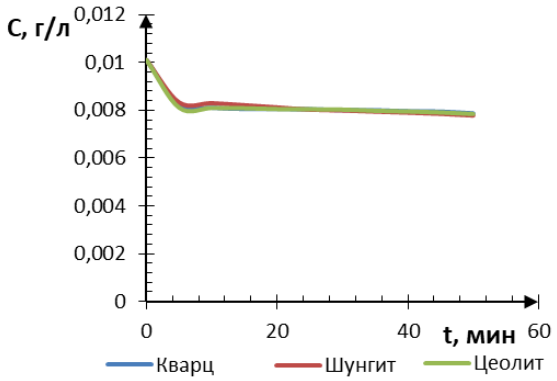


Рис. 3. Зависимость концентрации Ni (II) от времени перемешивания с сорбентами, термически модифицированным при температуре 400^{0}С.

Предположительно это связано со структур-

ными изменениями, которые происходят в пористых структурах минералов.

Дальнейшее увеличение температуры термообработки до 600^{0}С исследуемых сорбентов представлено на рисунке 4.

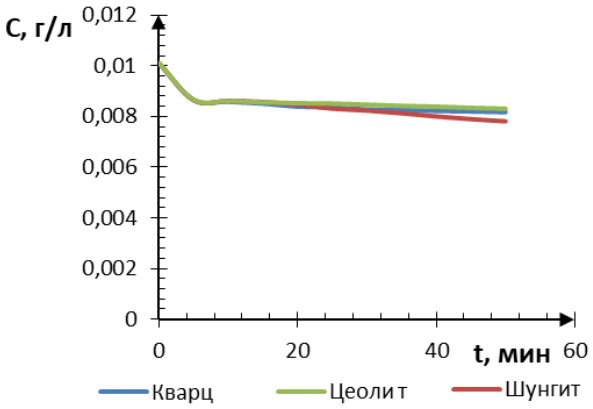


Рис. 4. Зависимость концентрации Ni (II) от времени перемешивания с сорбентами, термически модифицированным при температуре 600^{0}С.

Изменение концентрации никеля (II) в исследуемом растворе с использованием кварца, шунгита и цеолита, модифицированных при 600^{0}С, по сравнению с использованием сорбентов, которые были термически модифицированы при температуре400^{0}С, практически не изменилось.

Выводы

Итак, в ходе проведенного исследования было определено:

1. Используемые в работе сорбенты содержат в своем составе диоксид кремния в различных массовых процентах и фракционном составе: от 0,1 мм до наночастиц. При нормальных условиях диоксид кремния чаще всего находится в полиморфной модификации α-кварца. При температуре выше +573°С обратимо переходит в β-кварц. Изменение сорбционный свойств может быть связано с различной формой основного компонента шунгита, цеолита и белого кварца.

2. Экспериментальное исследование сорбционной очистки раствора сульфата никеля с использованием термически модифицированных сорбентов - шунгита, цеолита и белого кварца показало, что максимальное уменьшение концентрации никеля (II) составляет 23% при использовании сорбентов, термически модифицированных при 400^{0}С.

3. Характер кривых изменения сорбционной способности термически модифицированных сорбентов при температурах 200^{0}С и 600^{0}С на интервале 1 – 60 мин одинаков. Изменения наблюдаются для термически модифицированного кварца при температуре 400^{0}С.

Список литературы

1. ПоложениеСтратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. https://clck.ru/R7suH (Дата обращения 15.09.2020г)
2. Экология. Справочник. Очистка сточных вод никеля. https://ru-ecology.info/term/49621/(Дата обращения 16.09.2020г)
3. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов.http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/181/1/Dolina_Covrem_texn_texnolog_ochict_vod.pdf (Дата обращения 15.09.2020г).
4. Филатова Е.Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах. //ж-л ИЗВЕСТИЯ ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология, 2015г.https://clck.ru/R7ssw (Дата обращения 15.09.2020г).
5. Группа компаний «Аргель»: Очистка стоков от ионов ртути, хрома, свинца, цинка, меди, мышьяка. https://clck.ru/R7stn (Дата обращения 18.09.2020г).
6. Ульянова В.В. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов сорбентами на основе модифицированных отходов керамического производства и сельхозпереработки /Диссертация, 142с. https://clck.ru/R9rAs (Дата обращения 28.09.2020г).
7. Климов, Е. С. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод //Е.С.Климов, М.В.Бузаева. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 201с. http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2012/Klimov.pdf(Дата обращения 27.09.2020г).
8. PetukhovaYu.N., Ilyina S.I., Fursenko A.V., NosyrevM.A. . Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью сорбентов (51-54) // Евразийский Союз Ученых. PDF архив.:-10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254 https://clck.ru/R7szL (Дата обращения 27.09.2020г).
9. StefaniakJakub, KarwackaSara, JaniszewskaMalgorzata с соавторами.2,4,4-trimethylpentyl) phosphinicacid (Cyanex 272) // CHEMOSPHERE T.254,Номер статьи: 126869 Опубликовано: SEP 2020. (Дата обращения 25.09.2020г)
10. Tian Tao,Bai Zhishan,Wang. Bingjieссоавторами. Facile fabrication of polyacrylic acid functionalized carboxymethyl chitosan microspheres for selective andefficientremovalofNi(II) frommulticomponent wastewater // COLLOIDS AND SURFACES A-PHYSICOCHEMICAL AND ENGINEERING

ASPECTS. T.597-Номер статьи:124676. Опубликовано: JUL 20 2020) (Дата обращения 25.09.2020г)
11. Peng Guilong,Deng Shubo,Liu Fengleiссоавторами. Calcined electroplating sludge as a novel bifunctional material for removing Ni(II)-citrate in electroplating wastewater // JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION T.262 , Номерстатьи: 121416Опубликовано: JUL 20 2020 (Датаобращения 29.09.2020г)
12. PiatekJedrzej,de Bruin-Dickason Caspar N,JaworskiAleksanderссоавторами. Glycine-functionalized silica as sorbent for cobalt(II) and nickel(II) recovery // APPLIED SURFACE SCIENCE. T.530 Номер статьи: 147299.Опубликовано: NOV 15 2020,) (Дата обращения 29.09.2020г)
13. Мосин О. В. Состав и структурные свойства природного фуллеренсодержащего минерала шунгита. Математическая модель взаимодействия шунгита с молекулами воды // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»,Вып. 2,март – апрель 2014. https://naukovedenie.ru/PDF/12TVN214.pdf (Дата обращения 29.09.2020г)
14. Мосин О. В. Шунгит и его свойствahttps://clck.ru/R9shK (Дата обращения 25.09.2020г)
15. ООО «ЦЕОЛИТ СНАБ»http://ceolitsnab.ru/tseolit-vodoochistka (Дата обращения 25.09.2020г)
16. Применение цеолитов //Технологии измельчения и переработки. http://pomol.club.com.ua/blog/?p=3505 (Дата обращения 29.09.2020г)
17. Кварц в водоочистке //Все о водеhttps://clck.ru/R9ska (Дата обращения 29.09.2020г)
18. Как используется кварцевый песок для фильтрации воды? //Все о воде https://clck.ru/R9smF(Дата обращения 29.09.2020г)
19. Диоксид кремния //chem.ru - Химический портал №1 в России https://chem.ru/dioksid-kremnija.html(Дата обращения 29.09.2020г)20.
20. РД 52.24.494-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации никеля в поверхностных водах суши фотометрическим методом с диметилглиоксимом. – 01.07.1995. (Датаобращения 15.09.2020г)

References

1. PolozhenieStrategiyae`kologicheskojbezopasnostiRossijskojFederaciina period do 2025 goda. https://clck.ru/R7suH (Data obrashheniya 15.09.2020g)
2. E`kologiya. Spravochnik. Ochistkastochny`xvodnikelya. https://ru-ecology.info/term/49621/(Data obra-shheniya 16.09.2020g)
3. Dolina L.F. Sovremennayatexnikaitexnologiidlyaochistkistochny`xvodotsolejtyazhely`x metallov.http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/181/1/Dolina_Covrem_texn_texnolog_ochict_vod.pdf (Data obrashheniya 15.09.2020g).
4. Filatova E.G. Obzortexnologijochistkistochny`xvodotionovtyazhely`xmetallov, osnovanny`xnafiziko-ximicheskixprocessax. //zh-l IZVESTIYaVUZov. Prikladnayaximiyaibiotexnologiya, 2015g.https://clck.ru/R7ssw (Data obrashheniya 15.09.2020g).
5. Gruppakompanij «Argel`»: Ochistkastokovotionovrtuti, xroma, svincza, cinka, medi, my`sh`yaka. https://clck.ru/R7stn (Data obrashheniya 18.09.2020g).
6. Ul`yanova V.V. Ochistkastochny`xvodotionovtyazhely`xmetallovsorbentaminaosnovemodificirovanny`xotxodovkeramicheskogoproizvodstvaisel`xozpererabotki /Dissertaciya, 142s. https://clck.ru/R9rAs (Data obrashheniya 28.09.2020g).
7. Klimov, E. S. Prirodny`esorbenty` ikomplekso-ny` v ochistkestochny`xvod //E.S.Klimov, M.V.Buzaeva. – Ul`yanovsk: UlGTU, 2011. – 201s. http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2012/Klimov.pdf(Data obrashheniya 27.09.2020g).
8. PetukhovaYu.N.,Ilyina S.I., Fursenko A.V., NosyrevM.A. . Ochistkastochny`xvodotionovtyazhe-ly`xmetallov s pomoshh`yusorbentov (51-54) // Evrazijskij Soyuz Ucheny`x. PDF arxiv.:-10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254https://clck.ru/R7szL (Data obrashheniya 27.09.2020g).
9. Stefaniak Jakub, Karwacka Sara, JaniszewskaMalgorzata s soavtorami.2,4,4-trimethylpentyl) phosphinicacid (Cyanex 272) // CHEMOSPHERE T. 254, Nomerstat`i: 126869 Opublikovano: SEP 2020. (Data obrashheniya 25.09.2020g)
10. Tian Tao, Bai Zhishan, Wang. Bingjie s soavtorami. Facile fabrication of polyacrylic acid functional-izedcarboxymethyl chitosan microspheres for selective andefficientremovalofNi(II) frommulticompo-nent wastewater // COLLOIDS AND SURFACES A-PHYSICOCHEMICAL AND ENGINEERING AS-PECTS. T. 597 -Nomer stat`i:124676. Opubliko-vano: JUL 20 2020) (Data obrashheniya 25.09.2020g)
11. Peng Guilong, Deng Shubo, Liu Fenglei s soavtorami. Calcined electroplating sludge as a novel bifunc-tional material for removing Ni(II)-citrate in electroplat-ing wastewater // JOURNAL OF CLEANER PRODUC-TION T.262 , Nomerstat`i: 121416 Opublikovano: JUL 20 2020 (Dataobrashheniya 29.09.2020g)
12. PiatekJedrzej, de Bruin-Dickason Caspar N, JaworskiAleksander s soavtorami. Glycine-functionalized silica as sorbent for cobalt(II) and nickel(II) recovery // APPLIED SURFACE SCI-ENCE. T.530 , Nomerstat`i: 147299. Opublikovano: NOV 15

2020,) (Data obrashheniya 29.09.2020g)
13. Mosin O. V. Sostavistrukturny`esvojstvaprirodnogofullerensoderzhashhegominerala shun-gita. Matematicheskaya model` vzaimodejstviya shungita s molekulamivody` // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»,Vy`p. 2,mart – aprel` 2014. https://naukovedenie.ru/PDF/12TVN214.pdf (Data obrashheniya 29.09.2020g)
14. Mosin O. V. Shungiti ego svojstva.https://clck.ru/R9shK (Data obrashheniya 25.09.2020g)
15. OOO «CEOLIT SNAB»http://ceolitsnab.ru/tseolit-vodoochistka (Data obra-shheniya 25.09.2020g)
16. Primenenieceolitov //Texnologiiizmel`cheniyai-pererabotki. http://pomol.club.com.ua/blog/?p=3505 (Data obrashheniya 29.09.2020g)
17. Kvarcz v vodoochistke //Vse o vode-https://clck.ru/R9ska (Data obrashheniya 29.09.2020g)
18. Kakispol`zuetsyakvarcevy`jpesokdlya fil`-traciivody`? //Vse o vode https://clck.ru/R9smF(Data obrashheniya 29.09.2020g)
19. Dioksidkremniya //chem.ru - Ximicheskijpor-tal №1 v Rossiihttps://chem.ru/dioksid-kremnija.html(Data obrashheniya 29.09.2020g)
20. RD 52.24.494-95. Metodicheskieukazaniya. Metodikavy`polneniyaizmerenijmassovojkoncentra-cii nikelya v poverxnostny`xvodax sushi fotomet-richeskimmetodom s dimetilglioksimom. – 01.07.1995. (Data obrashheniya 15.09.2020g)

УДК 630.867:661.183.2

Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении никеля в одиночных и двоичных системах

Н.И. Черкашина, Е.А. Магдыч
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.[1]selyanskij-as@ya.ru,

Статья поступила 19.11.2020 г.; после доработки 20.11.2020 г.

Аннотация

Определены сорбционные характеристики: коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов никеля из раствора. Проведен сравнительный анализ степени извлечения никеля в присутствии конкурирующих ионов. Изучена конкурентная сорбция в мульти металлических системах в присутствии металлов Fe (III), Zn (II),), Ni (II), Pb (II) и Co (II).

Ключевые слова: фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, насыпная масса сорбента.

Adsorption characteristics of rice sorbent nickel husks extraction in single and binary systems

N.I. Cherkashina, E. A. Magdych
Sevastopol StateUniversity, 33 Universitetskayast,,Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 19.11.2020 y.; received in final form 20.11.2020 y.

Abstract

Sorption characteristics are defined: cleaning coefficient, distribution coefficient, extent of extraction of ions of nickel from solution. The comparative analysis of extent of extraction of nickel in the presence of the competing ions is carried out. Competitive sorption in multi metal systems in the presence of metals Fe (III), Zn (II)), Ni (II), Pb (II) and Co (II) is studied.

Keywords:filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, bulk weight of the sorbent.

Введение

Одним из часто применяемых методов выделения тяжелых металлов из растворов являются сорбционные методы, которые являются более дешевыми и простыми по аппаратурному оформлению. На сегодняшний день применяются сорбционные методы с использованием природных и синтетических ионообменных материалов. Эффективность извлечения тяжелых металлов зависит от селективности сорбентов с присутствием в водных средах неорганических и органических компонентов.

Кроме селективности необходимо, чтобы сорбенты обеспечивали высокую скорость извлечения веществ, также учитывается для сорбента устойчивость в различных водных средах (химическая, механическая, радиохимическая и др.), а также такие факторы, как простота при получении сорбента, доступность и дешевизна используемых для синтеза материалов. Кроме того, нужно иметь ввиду возможность дальнейшего вторичного использования и переработки или

долгосрочного хранения сорбционного материала.

Использование рисовой шелухи в качестве основы для создания органических сорбентов является достаточно эффективным и относительно недорогим способом, т.к. ежегодно в мире производится 80 миллионов тон данного сырья, в котором находится 15,7 % от массы чистого лигнина [1]. Природные материалы на основе лигнина давно зарекомендовали себя как хорошие сорбционные материалы [2-4].

Многие исследования адсорбции тяжелых металлов сосредоточены на использовании активированного угля из-за его очень хороших адсорбционных свойств. Даже если он получен из тех же отходов сельскохозяйственных производств [5], такое сырье будет довольно дорогим и обедненным лигнином за счет обжига при больших температурах.

Недорогим и довольно доступным адсорбентом является рисовая шелуха. Получены положительные результаты сорбции ионов металлов кадмия, свинца и стронция для необработанной и мерсеризованной рисовой шелухи [6].

Целью данной работы является исследование адсорбционных характеристик органических сорбентов на основе рисовой шелухой при извлечении ионов Ni (II) в одиночных и двоичных системах с ионами металлов Fe (III), Zn (II), Pb (II), Cu (II) и Co (II).

Объектом исследования является изучение конкурентной сорбции ионов Ni в мультиметаллических адсорбционных системах.

Порядок и параметры эксперимента

Проводилась механохимическая и химико-термическая обработка для подбора наилучшей модификации сорбента в диапазоне температур от 200 ^{0}C до 700 ^{0}C с шагов в 100 ^{0}C и выдержкой сорбента в течение 15 минут при заданной температуре.

Лучшие результаты показала модификация, полученная обжигом при 200 ^{0}C и 300 ^{0}C в течении 15 мин. При температуре более 300 °C происходит разрушение молекулы лигнина, которая является основной сорбирующей составляющей рисовой лузги [7-8].

Для получения эффективного сорбента исходный материал в безводной среде с сухими реагентами в долях:10:1:5:5:1 реагенты (оксалат аммония; углекислый аммоний; щавелевая кислота; цитрат аммония; гидроксид натрия) обрабатывают в химической мельнице в течение 15 минут.

Далее производят выгрузку целевого продукта из химической мельницы и промывают на фильтре. Эксперимент проводился в несколько этапов:

I этап. 0,5%-ным раствором гидроксида аммония, промывают сорбент в соотношении 1:10 при нормальной температуре;

II этап. Промывку ведут 1% раствором щавелевой кислоты. Промывку осуществляют до появления прозрачного фильтрата желтоватого цвета.

III этап. После чего полученный целевой продукт подвергают сушке. В результате обработки получается фракция от 0,3 – 0,08 мм гранулированного светло коричневого цвета.

IV этап. Сорбент был выдерживают 24 часа в растворах солей исследуемых ионов металлов, после интенсивного перемешивания в течении 5 минут. Суммарная концентрация раствора оставалась постоянной при изменении качественного состава. При определении количества никеля в фильтрате предварительно проводили осаждение конкурирующего иона. Эксперимент повторно проводился при pH = 4, 6, 8 и 10, в данном диапазоне значения оптической плотности не изменялись.

Методика определение концентрации никеля после сорбции

Реактивы и оборудование:

- йод, 0,05 М раствор;
- диметилглиоксим, 1 % - ный раствор в 20 %– ном растворе NaOH;
- перекись водорода 30 %-ный водный раствор;
- спирт этиловый ректификованный технический 96 %-ный;
- мерные колбы вместимостью 50, 100, 1000 мл;
- мерный цилиндр вместимостью 25 мл;
- фотоэлектроколориметр (спектрофотометр) КФК-3-ЗОМ.

Определение никеля в растворе проводили методом градуировочного графика. В мерные колбы на 100 мл вносили по 20 мл дистиллированной воды 4, 6, 8, 10, 12 мл стандартного раствора никеля с концентрацией 0,01 мг/мл.

Методика расчета коэффициентов, приведенных в таблицах 1, 2 и величин для построения градуировочного графика для иона никеля в анализируемом растворе подробно описаны в [9].

Таблица 1. *Экспериментальные и расчетные данные для метода наименьших квадратов*

№ раствора	c_i	c_i^2	$A_{i\ эксп}$	$c_i \cdot A_{i\ эксп}$
1	0,04	0,0016	0,505	0,0202
2	0,06	0,0036	0,457	0,02742
3	0,08	0,0064	0,532	0,04256
4	0,1	0,01	0,674	0,0674
5	0,12	0,0144	0,809	0,09708
$\sum_{i=1}^{n}$	0,4	0,036	2,977	0,25466

Таблица 2. *Расчетные коэффициенты метода наименьших квадратов*

Расчетные коэффициенты	Значения
a	0,265
b	4,125
b'	7,075
SQ	0,0151
SQ'	0,054
S_{YC}^2	0,005

Уравнение градуировочного графика после статистической обработки имеет вид:

$$A=0{,}265+4{,}1245\times C_{Ni} \qquad (1)$$

где C_{Ni} – массовая концентрация никеля, мг/мл.

Расчётные параметры представлены в таблице 3. Градуировочный график на рисунке 1.

Концентрацию никеля в анализируемом растворе определяли по соотношению 2.

$$C_{Ni}=\frac{m_X * v}{100} \qquad (2)$$

где V – объем анализируемого раствора, мл;
100 - объем, до которого была разбавлена проба, в мл.

Таблица 3. *Расчетные параметры градуировочного графика*

№ п/п	Массовая концентрация никеля в растворе, мг/мл	$A_{расч}$
1	0	0,27
2	0,04	0,4765
3	0,06	0,5178
4	0,08	0,5591
5	0,1	0,6004
6	0,12	0,6417

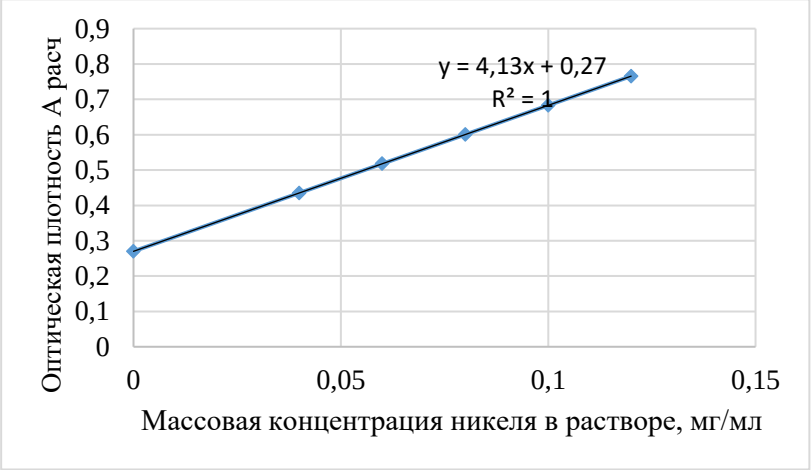


Рис. 1 Градуировочный график для расчета концентрации никеля

В присутствии мешающих ионов таких как медь, железо, свинец и т.д. при определении концентрации никеля пользуются методикой, описанной в [10].

Результаты измерения оптической плотности и массовой концентрации никеля в присутствии конкурирующих ионов представлены в таблице 4.

Таблица 4 *Результаты измерений и расчетов для анализа количества никеля в растворе*

№ измерения	Состав пробы	A	C_{Ni}, мг/мл
1	Ni^{2+}	0,578	0,050
2	Ni^{2+}+Cu^{2+}	0,59	0,052
3	Ni^{2+}+Pb^{2+}	0,61	0,055
4	Ni^{2+}+Co^{2+}	0,75	0,078
5	Ni^{2+}+Fe^{3+}	0,63	0,058
6	Ni^{2+}+ Zn^{2+}	0,6	0,054

По полученным результатам были рассчитаны коэффициент очистки, (концентрация конкурирующих ионов в смеси и исходная концентрация никеля составляла 0,25 мг/мл), эффективность очистки (степень извлечения металла из раствора) и коэффициент распределения, расчетные формулы приведены в [9]. Значения коэффициента очистки представлены в таблице 5.

Таблица 5. *Значения коэффициента очистки, распределения и эффективности исходя из ионного состава пробы для ионов никеля*

№ измерения	Состав пробы	$K_{оч.}$	E, %	$K_р$
1	Ni^{2+}	4,998	79,99	399,84
2	Ni^{2+}+Cu^{2+}	4,814	79,23	381,36
3	Ni^{2+}+Pb^{2+}	4,534	77,95	353,42
4	Ni^{2+}+Co^{2+}	3,224	68,99	222,43
5	Ni^{2+}+Fe^{3+}	4,286	76,67	328,55
6	Ni^{2+}+ Zn^{2+}	4,670	78,59	366,98

Наибольшую селективность в присутствии ионов Ni^{2+}, Cu^{2+}, Pb^{2+}, Fe^{3+}, Zn^{2+} сорбент на основе рисовой шелухи проявляет к ионам никеля и железа. По способности поглощаться исследованные катионы могут быть расположены в следующий ряд активности в диапазоне pH = 4….10, как показано на рис. 2:

Для ионов железа никель является конкурирующим ионом [9], когда для никеля эта закономерность не наблюдается, можно сказать что для водных сред исследуемого состава приоритетным ионом для извлечения является никель.

Данные приведенные на рисунке 2 получены при отсутствии в пробе конкурирующих ионов.

Выбранная модификация сорбента на основе рисовой шелухи одинокого хорошо извлекает ионы никеля, железа и свинца из растворов при исследовании однокомпонентных модельных образцов. При одновременном нахождении в смеси перечисленных ионов эффективность извлечения ионов железа резко снижается [9].

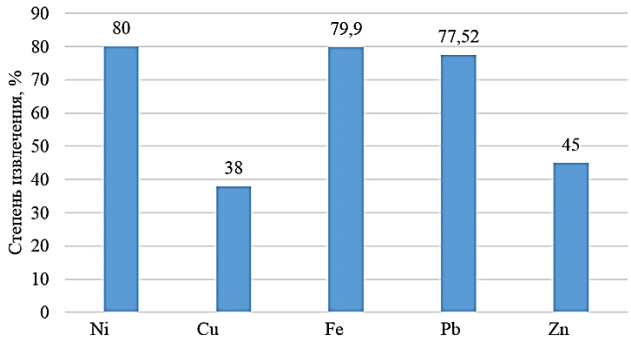


Рис. 2 – Величина степени извлечения для металлов Fe^{3+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+} в диапазоне pH = 4….10 для рисовой шелухи

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сорбционный материал на основе рисовой шелухи обладает конкурентно способными

свойствами по эффективности поглощения ионов металлов. При дальнейших исследованиях можно определить конкретную модификацию для более интенсивного извлечения определенной группы ионов.

Выводы

Исследована эффективности сорбции органическим сорбентом на основе рисовой шелухой (RHA) при извлечении Ni (II) в присутствии тяжелых металлов Cu (II), Zn (II), Pb (II), Fe (III).

Изучена конкурентная сорбция в мульти металлических системах, определены коэффициенты очистки и распределения для никеля.

Результаты исследований могут использоваться для дальнейшего изучения сорбционных характеристик органических сорбентов в сложных смесях.

Список литературы

1. Нго Хонг Нгиа Комплексная переработка отходов рисового производства с одновременным получением диоксида кремния, лигнина и целлюлозы/ Нго Хонг Нгиа, Л. А. Зенитова, Ле Куанг Зиен.// Проблемы региональной экологии. – 2019. –№ 2. – С. 5-10.
2. Чернышева Е.А. Применение серосодержащего сорбента на основе лигнина для извлечения ртути из водных растворов / Чернышева Е.А., Грабельных В.А., Леванова Е.П., Корчевин Н.А.// Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2017. –Т.22. №3 – С. 169-177.
3. Чернышева Е.А. Новый подход к реализации адсорбционных свойств лигнина: получение серосодержащих сорбентов для ионов тяжелых металлов / Чернышева Е.А., Грабельных В.А., Леванова Е.П., Руссавская Н. В., Розенцвейг И. Б., Корчевин Н.А.// Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2017. –Т.25. №3 – С. 327-332.
4. Чернышева Е.А. Лигнин - основа новых сорбентов для очистки сточных вод железнодорожных промышленных предприятий / Чернышева Е.А., Хаташкеев А.В., Корчевин Н.А.// Транспортная инфраструктура сибирского региона, Иркутский государственный университет путей сообщения, 2017. –Т.1. – С. 317-320.
5. Коробочкин В.В. и д.р. Получение активированного угля пиролизом рисовой шелухи вьетнама / Коробочкин В.В., Нгуен Мань Хиеу, Усольцева Н. В., Нгуен Вань Ту// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, –2017. – Т. 328. –№5. – С. 6-15.
6. Купчик Л.А Использование мерсеризованной рисовой шелухи в качестве сорбентов ионов Cd(II), Pb(II) и Sr(II) из растворов / Л.А. Купчик, В.А. Денисович, О.М. Салавор, О.В. Ничик/ Вестник витебского государственного технологического университета. – 2017. – №2(33). – С. 95-100.
7. Боголицын К.Г., Лунин В.В. (ред.) Физическая химия лигнина/ К.Г. Боголицын, В.В.Лунин // Москва, Академкнига, – 2010. – 489 с.
8. Оболенская А.В. Химия лигнина/ А.В. Оболенская // Санкт-Петербург: ЛТА, – 1993. – 80 с.
9. Черкашина Н.И. Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении железа в одиночных и двоичных системах/ Н.И. Черкашина// Энергетические установки и технологии, 2020. – Т. 6, № 1. – С. 131-137.
10. ПНД Ф 14.1:2.46-96 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации никеля в природных и сточных водах фотометрическим методом с диметилглиоксимом. М., 2013. 19 с.

References

1. Ngo Hong Ngia Complex processing of rice production waste with simultaneous production of silicon dioxide, lignin and cellulose/ Ngo Hong Ngia, L. A. Zenitova, Le Ku-ang Zien. // Problems of regional ecology. – 2019. – № 2. – P. 5-10.
2. Chernysheva E. A. Application of a sulfur-containing sorbent based on lignin for mercury extraction from aqueous solutions / Chernysheva E. A., Grabelnykh V. A., Levanova E. P., Korchevin N. A. // Izvestiya vuzov. Applied chemistry and bio-technology, 2017. –Vol. 22, No. 3. – Pp. 169-177.
3. Chernysheva E. A. a New approach to the implementation of ad-sorption properties of lignin: obtaining salt-containing sorbents for heavy metal ions / Chernysheva E. A., Grabelny V. A., Levanova E. P., Russavskaya N. V., Rosenzweig I. B., Korchevin N. A. // Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology, 2017. – Vol. 25, No. 3. – Pp. 327-332.
4. Chernysheva E. A. Lignin-the basis of new sorbents for wastewater treatment of railway industrial enterprises / Chernysheva E. A., Khatashkeev A.V., Korchevin N. A. // Transport infrastructure of the Siberian region, Irkut state University of ways of communication, 2017. – Vol. 1. – P. 317-320.
5. Korobochkin V. V. and ander. Obtaining activated carbon by pyrolysis of rice husks of Vietnam / Korobochkin V. V., Nguyen man Hieu, Usoltseva N. V., Nguyen van Tu// Bulletin of the Tomsk poly technical University. Georsursov engineering, – 2017. – Vol. 328. – No. 5. – P. 6-15.
6. Kupchik L. A. Use of mercerized rice husks as sorbents of Cd(II), Pb(II) and Sr(II) ions from solutions / L. A. Kupchik, V. A. Denisovich, O. M. Salavor, O. V. Nichik// Bulletin of the Vitebsk state technological University. – 2017. – №2(33). – Pp. 95-100.
7. Bogolitsyn K. G. Physical chemistry of lignin/ K. G. Bogolitsyn, V. V. Lunin // Moscow, Akademkniga,

– 2010. – 489 p.
8. Obolenskaya A.V. Chemistry of lignin/ A.V. Obolenskaya / / Saint Petersburg: LTA, –1993. – 80 p.
9. Cherkashina N. I. Adsorption characteristics of a rice husk-based sorbent when extracting iron in single and binary systems/ N. I. Cherkashina// Energy installations and technologies, –2020. – Vol. 6, No. 1. – Pp. 131-137.
10. Federal environmental regulations (FER) 14.1:2.46-96 14.1:2.46-96 Quantitative chemical analysis of water. Method of measuring the mass concentration of Nickel in natural and waste waters by photometric method with dimethylglyroxime. M., 2013. 19 p.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 556.06

Обоснование выбора концептуальной модели водосбора для прогнозирования водообеспеченности Симферопольского водохранилища

А.С.Бабинецкая[1], Н.М.Дербасова[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская 33, г. Севастополь, 299053, Россия
[1]akatsyki.kodgo@gmail.com, [2]derbasovanm@mail.ru

Статья поступила 19.11.2020 г.; после доработки 24.11.2020 г.

Аннотация
Рассмотрены проблемы водообеспеченности г. Симферополя. Проанализированы существующие подходы к гидродинамическому моделированию природных речных процессов, использующиеся при построении современных моделей. Обоснован выбор факторов для построения концептуальной модели водосбора для Крымского полуострова.

Ключевые слова: водные ресурсы, проблемы водообеспеченности, гидрологические модели, моделирование речного стока, прогноз водности.

Substantiation of the choice of a conceptual model of the catchment area for forecasting the water availability of the Simferopol reservoir

A.S. Babinetskaya[1], N.M. Derbasova[2]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
[1]akatsyki.kodgo@gmail.com, [2]derbasovanm@mail.ru

Received 19.11.2020 y.; received in final form 24.11.2020 y.

Abstract
The problems of water supply in Simferopol are considered. The existing approaches to the hydrodynamic modelling of natural river processes used in the construction of modern models are analysed. The choice of factors for the construction of a conceptual model of the catchment area for the Crimean peninsula has been substantiated.

Keywords: water resources, water availability problems, hydrological models, river runoff modeling, water availability forecast

Введение

В связи со значительным продолжительным засушливым периодом на территории Крымского полуострова, начавшегося с июля 2019 года, произошла значительная сработка запасов воды в водохранилищах, расположенных в руслах рек (рис.1).

Учитывая потребность в сведениях об ожидаемом наполнении водохранилищ и питающих их рек на 2021 г., целесообразно использовать гидромоделирование речного стока для дальнейшего прогнозирования, опираясь на статистические данные прошлых лет[1].

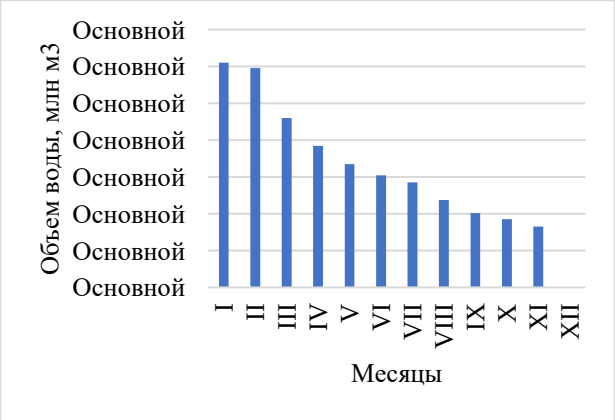


Рис.1. Характерный ход уровней воды водохранилища за 2020г. Период сработки.

Симферопольское водохранилище является основным резервуаром пресной воды города Симферополя и его ближайших окрестностей, по совместительству один из самых больших и красивых искусственных водоемов Крыма. Тип водохранилища – русловое. Среднемноголетний объем годового стока – 38,68 млн. м^3. Расположено на юго-востоке г. Симферополя на реке Салгир. Она относится к рекам северных склонов Крымских гор, образуется из слияния рек Ангара и Кизил-Коба. Является самой длинной рекой Крыма, длина реки- 238км, площадь бассейна - 3750 км2, объем стока — 55 млн. м3. В годовом колебании уровня вод р. Салгир выделяют два периода: первый — с декабря по апрель, когда наблюдаются в целом более высокие уровни, второй — с мая по ноябрь — с низкой меженью. Весеннее половодье четко не выделяется, т. к. во время снеготаяния часто идут дожди. Летние ливневые паводки чаще всего бывают в июне, июле. Паводки холодного периода нередко превышают летние и могут быть катастрофическими[2].

Анализ проблемы и постановка задачи

В наполнении Симферопольского водохранилища можно выделить определенную периодичность осадкообразования (рис. 2).

В качестве примера маловодного года можно привести данные 1994 года. Длительная засуха с существенным недобором осадков, начавшаяся с июля 1993 года, привела к установлению очень низких уровней воды и водности на Крымских реках в 1994 году. Очень сухой была осень 1993 года, осадков выпало крайне мало. Зимой и весной 1994 тенденция засушливости сохранялась. Существенные осадки начались только с ноября 1994 и составляли 130% нормы, поддерживая данную тенденцию до конца года. В среднем за весь период 1994 года выпало около 500 мм осадков, что было на 57% меньше нормы. Так же осенью 2012 года был рекордно низкий уровень в водохранилище около 5 млн м³, но последовавшие в декабре осадки принесли водность на реках.

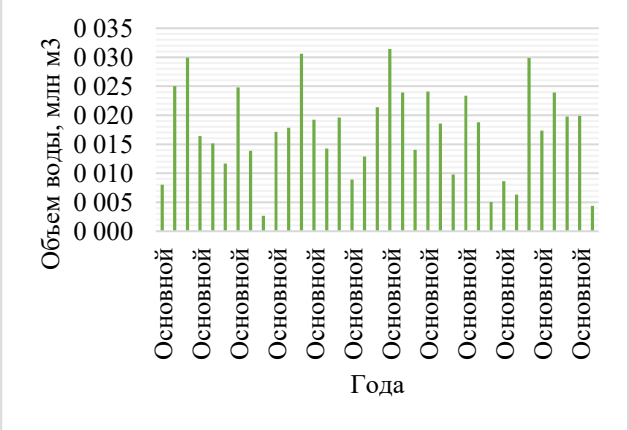


Рис.2. Объём воды в Симферопольском водохранилище на ноябрь 1986-2020 гг (млн.м3)

Средней водности год 2018, не смотря на общую засушливость объём наполнения водохранилища составлял 15,6 млн м³ или 50 %. В 2019 году в водохранилище было 16 миллионов кубометров.

В качестве очень высокой водности года можно привести 1997 года. После засушливых 1994 и 1995 гг., в августе 1996 в Крымских горах ежемесячно выпадали значительные осадки, что было нетипичным явлением для территории крымского полуострова. Благоприятно сложившаяся обстановка в зиму 1996-1997 гг. способствовала образованию существенного снежного покрова. За 2 квартал 1997 года выпало 1500 мм осадков, что на 39% больше нормы. В 4 квартале 1997 года зафиксирована наиболее высокая водность на реках Крыма за весь период наблюдений. Так в октябре в верховьях рек, выше Симферопольского водохранилища, водность реки Салгир была выше нормы в 11 раз. Такая тенденция сохранялась до середины 1998. Далее пошла на спад. В июле 2004 так же зафиксирован рекордно высокий паводок, приток воды в водохранилище был крайне высоким. Крайне многоводным оказался и 2015 год, благодаря обильному осадкообразованию[3].

В феврале 2020 года в водохранилище было запасено 11,7 миллионов кубометров воды, из которых 5 миллионов являются неизвлекаемым

остатком. В Симферопольском водохранилище на 3 апреля 2020 года осталось 8 млн м³ воды. На 13 апреля 2020 года водохранилище было заполнено на 22 % от нормального объёма. На конец августа 2020 года в водохранилище оставалось около 4,5 млн м³ воды.

В период с середины августа по сентябрь 2020 на территории Крыма преобладали тропические воздушные массы, поэтому было преимущественно сухо и тепло. Средняя температура воздуха составила 20.9°С и была на 3.7° С выше многолетней нормы. Выпавшие осадки носили кратковременный исключительно локальный характер. В Крымских горах выпало незначительное количество осадков. Отсутствие осадков в условиях преобладания высоких температур воздуха способствовало дальнейшему истощению водности большинства рек. В бассейнах рек сохранялся режим глубокой летней межени. В бассейне реки Малый Салгир в черте города Симферополь, в результате прошедшего ливневого дождя, наблюдалось кратковременное повышение уровней воды. В последнюю неделю месяца прошли дожди, местами сильные, но не повлиявшие на уровенный режим рек[4].

В настоящее время, учитывая текущие объемы воды в водохранилищах естественного стока для водоснабжения города Симферополя, необходимо корректировать режимы забора воды из водохранилищ для нужд водоснабжения с учетом сложившейся ситуации.

При этом необходимо уменьшить забор воды из самого водохранилища и искать альтернативные источники водозабора. С целью эффективного и грамотного управления водными ресурсами, в сложившейся критической ситуации, а также при составлении долгосрочных прогнозов, целесообразно использовать моделирование речного стока.

При разработке методов прогнозирования в гидрологии очень остро стоит проблема неоднородности наблюдений за стоком и слабой гидрологической изученности региона. Также не менее важной является проблема правильного выбора модели[5].

Анализ современных гидрологических моделей

Согласно **ГОМС** (Гидрологическая оперативная многоцелевая система) модели могут быть типа «черного ящика» J04.3. 03; J04.1. 04; J04.1. 05; концептуальные J04. 3. 01; J04.1.01; J04.2. 02; J04.2. 01; гидродинамические J04.3. 07[6-8].

J04.1.01 Резервуарная модель

Это простая нелинейная модель, которая преобразует осадки в сток для прогнозирования суточного расхода или расхода паводка. Состоит из нескольких резервуаров - обычно четырех для прогнозирования суточного расхода и двух или трех для прогнозирования паводков, расположенных последовательно вертикально. У каждого резервуара есть выпускные отверстия сбоку и внизу. Выходы через боковые отверстия формируют расчетный сброс, а выходы через нижние отверстия моделируют инфильтрацию. Расчетный сток состоит из компонентов из каждого резервуара, который соответствует поверхностному, промежуточному, субосновному и базовому стокам. Получаемый результат на выходе - расчетный расход. Модель не может быть использована в условиях ограниченной информации, не применима при других условий.

J04.1. 04 SRM

Модель снеготаяния-стока - физическая модель, разработанная для моделирования и прогнозирования суточного стока в горных бассейнах, где таяние снегов является основным фактором стока. Использует дневную температуру для расчета градусо-дней, которые используются в качестве индекса сложного энергетического баланса, ведущего к таянию снега. Данные о площади снежного покрова, полученные с помощью дистанционного зондирования, используются для применения алгоритма таяния снега к определенной части бассейна со снежным покровом. Так же необходимы ежедневные осадки для расчета количества дождевого стока, добавляемого к дневному компоненту снеготаяния. Преимуществом модели является то, что она может вычислять влияние изменения климата на данные по бассейну за год с изменением климата, вызванным изменениями в настоящее время, температуры/осадков и параметров модели. Недостатком – требует большого ряда разноплановых статистических данных.

J04.1. 05 ISO

Модель функции «приток-накопление-отток» предполагает, что скорость оттока из водосбора (или водохранилища, или участка реки) однозначно связана с количеством хранимой воды, и гарантирует, что уравнение водного баланса всегда выполняется. Эти два условия приводят к дифференциальному уравнению первого порядка, выражающему скорость оттока через приток (например, дождевые осадки) и характеристики хранилища. Для калибровки данной мо-

дели используются: гидрографы осадков, гидрографы стока, измерения и(или) прогнозы осадков, телеметрические данные о речных потоках. Получаемый результат на выходе - прогнозы стока, прогнозы объема стока и точность прогнозов с учетом предполагаемых ошибок во входных данных. Модель можно в реальном времени дополнять и калибровать исходя из полученных новых данных. Имеет большую погрешность получаемых данных.

J04.2. 01 концептуальная модель водопоступления для прогнозирования наводнений

Модель использует концепцию избытка запасов для расчета объема стока и учитывает неравномерное распределение влажности почвы по бассейну. Для вычисления фактического испарения используется трехслойная модель. Единичные гидрографы используются для распределения рассчитанного стока из суб-бассейнов, которые затем объединяются для получения стока из бассейна. Не требует большого ряда статистической информации, в качестве входных данных используются данные об осадках и испарении. Получаемый результат на выходе - прогнозный гидрограф оттока бассейна, что позволяет составлять обзорные карты зон затопления и подтопления для водных объектов.

J04.2. 02 HBV

Концептуальная модель водосбора, которая преобразует: осадки, потенциальное испарение и таяние снега в сток реки/приток в водохранилище путем моделирования естественных гидрологических процессов. Модель включает режим накопления снега и таяния снега, режим осадкообразования с учетом влаги задерживаемой почвой и испарения. Более важные параметры оцениваются с помощью процедуры калибровки, для которой обычно требуется от 3 до 5 лет одновременного учета стока и метеорологических данных. Наиболее гибкая из всех описанных моделей – дающая возможность заменять один ряд данных другим. Так если записи о речном потоке отсутствуют, параметры в некоторых случаях можно оценить на основе известных характеристик бассейна. В качестве входных данных используется общее количество осадков, уровень снежного покрова, суммарную солнечную радиацию.

J04. 3. 01 NWSRFS-SAC-SMA

Модель учета влажности почвы (Сакраменто) детально рассматривает процесс распределения влажности почвы по верхней и нижней зонам. Внутри каждой зоны влага разделяется на связанную (вода, удерживаемая частицами почвы) и свободную (вода, которая может перемещаться внутри почвенной мантии). Движение воды между двумя зонами регулируется содержанием свободной воды в верхней зоне и дефицитом влаги в почве в нижней зоне. Модель также включает представление непроницаемой части водосбора. Сложностью является то, что для данной модели требуются временные ряды данных об осадках (дождь плюс таяние); временные ряды эвапотранспирации и площади снежного покрова. Получаемый результат на выходе - выводятся временные ряды руслового притока (стока), составляющих стока и накоплений почвенной влаги. Для калибровки требует наличие модели другого типа.

J04.3. 03 NWSRFS-SNOW-17

Модель накопления и абляции снега отделяет таяние снега в периоды дождя при снежном покрове от таяния в периоды без дождя, чтобы учесть различия в величинах процессов передачи энергии:

- В периоды дождя на снегу таяние рассчитывается с помощью уравнения баланса энергии после нескольких упрощающих предположений.
- В периоды без дождя таяние рассчитывается на основе разницы между температурой воздуха и базовой температурой, а также коэффициента пропорциональности или коэффициента таяния.

Другие параметры модели используются для определения формы и количества снегопада, обмена поверхностной энергией в периоды без таяния, накопления тепла снежным покровом, площади снежного покрова, удержания и передачи жидкости-воды и теплообмена в граница раздела снег-почва. Получаемый результат на выходе - данные временных рядов дождя и таяния, а также смоделированные значения водного эквивалента и площади снежного покрова. Неприменима в регионах, где снеготаяние не является основным фактором притока в водные объекты.

J04.3. 07 SCLS

Синтезированная ограниченная линейная система – это синтез концептуальной модели и модели «черного ящика», основанный на объединении достоинств обеих. Достаточно гибкая модель, требующая долгих трудоемких вычислений. Можно использовать для прогнозирования речного стока и притока в водохранилища. Модель SCLS состоит из двух частей:

- В части формирования стока он оценивает общий сток от дождя и испарения с учетом неравномерного распределения влажности

почвы по бассейну.

- В части модели, касающейся концентрации стока, общий сток разделен на различные источники воды Может применяться для расчета гидрографа на выходе из любого бассейна, для любого периода лет и временного интервала путем изменения соответствующих параметров.

На основании вышеприведенной информации можно сделать вывод, что в гидрологическом моделировании выбор модели следует производить исходя из конкретных гидрологических условий. При этом для любой модели целесообразно учитывать:

- Необходимую задачу моделирования
- Вид моделируемой системы
- Моделируемы элементы
- Характеристики водосборной площади
- Наличие сведений для калибровки модели

Анализ представленных выше моделей позволяет выделить два основных принципиально разных подхода к выбору гидромодели, которые важно учитывать:

- Первый (односторонний) – гидрологический режим водотоков и водоемов формируется независимо – под влиянием метеорологических, климатических и гидрологических факторов.
- Второй – учитывает влияния не только поверхностного, но и подземного стока, при котором гидрологический режим рассматривается как зависимый, формирующийся под влиянием взаимодействия с подземными водами[9-11].

Несмотря на то, что в большинстве случаев первый подход является вполне оправданным, наиболее перспективным и актуальным следует считать второй. Именно он позволяет подходить к выбору гидромодели с позиции единства условий формирования стока, что необходимо при решении более сложных и разнообразных экологических проблем.

Выводы

В данной ситуации, исходя из сложившегося водного кризиса и учитывая острую потребность в сведениях об ожидаемом наполнении водохранилищ – гидромоделирование один из самых важнейших факторов осваивания и управления водных ресурсов. По итогам анализа существующих условий водообеспеченности и видов гидромоделей наиболее приоритетным для условий Крымского полуострова, а в частности для г. Симферополя и Симферопольского водохранилища, является концептуальная модель водосбора. Модель предполагается использовать в условиях ограниченных статистических данных прошлых лет, используя теорию планирования эксперимента. Для разработки, прежде всего, понадобится определить факторы, влияющие на водосбор. Такие как количество осадков, выпавших за месяц, толщина снежного покрова в горах у истока и количество солнечной радиации, влияющей на испарения с поверхности водохранилища.

Для того что бы модель была наиболее достоверной калибровку стоит проводить основываясь на модели года, предшествующему данному, схожему по водности и достаточно изученном. Исходя из графика наиболее схожей водности год по состоянию на момент сентября 2020 – 2012г., когда уровень наполненности Симферопольского водохранилища так же достигал около 15% от проектного объема. По состоянию на момент ноября 2020г. – 1994г., уровень наполненности водохранилища достиг 8%, что является даже меньше 1994г

Список литературы

1. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007.
2. Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1993.
3. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л., Гидрометеоиздат. 1972.
4. А.Т. Зиновьев, К.Б Кошелев, К.В Марусин, Е.Д. Кошелева Математическое моделирование руслового потока для прогнозов влияния строительства в поймах на гидрологический режим крупных рек (на примере реки обь), 2017 год.
5. С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климатак — СПб.: Гос. гидрол. ин-т.
6. Edson Nkonde – Verification of the TIGGE and WRF Models in forecasting the precipitation event for 3rd February 2010 over Zambia – NOAA, 2010 г.
7. World Meteorological Organization WMO Statement on the scientific basis for, and limitations of, river discharge and stage forecasting
8. World Meteorological Organization (WMO); Global Runoff Data Centre (Germany)Global, composite runoff fields based on observerd river discharge and simulated water balances: report no. 22 – GRDC;1999
9. World Meteorological Organization (WMO) Direct

methods of soil moisture estimation for water balance purposes – WMO; 1971
10. World Meteorological Organization (WMO) Problems of evaporation assessment in the water balance – WMO; 1971
11. World Meteorological Organization (WMO) Preparation of maps of precipitation and evaporation with special regards to water balance – WMO; 1970

References

1. Kondrat'yev S.A. Formirovaniye vneshney nagruzki na vodoyemy: problemy modeli-rovaniya. — SPb.: Nauka, 2007.
2. Kovalenko V.V. Modelirovaniye gidrolo-gicheskikh protsessov. — SPb.: Gidrome-teoizdat, 1993.
3. Kuchment L.S. Matematicheskoye modeliro-vaniye rechnogo stoka. L., Gidrometeoiz-dat. 1972.
4. A.T. Zinov'yev, K.B Koshelev, K.V Maru-sin, Ye.D. Kosheleva Matematicheskoye mo-delirovaniye ruslovogo potoka dlya pro-gnozov vliyaniya stroitel'stva v poymakh na gidrologicheskiy rezhim krupnykh rek (na primere reki ob'), 2017 god.
5. S.A. Kondrat'yev, M.V. Shmakova Matema-ticheskoye modelirovaniye stoka reki Nevy v usloviyakh vozmozhnogo izmeneniya klima-tak — SPb.: Gos. gidrol. in-t.
6. Edson Nkonde – Verification of the TIGGE and WRF Models in forecasting the precipitation event for 3rd February 2010 over Zambia – NOAA, 2010 г.
7. World Meteorological Organization WMO Statement on the scientific basis for, and limitations of, river discharge and stage forecasting
8. World Meteorological Organization (WMO); Global Runoff Data Centre (Germany)Global, composite runoff fields based on observerd river discharge and simulated water balances: report no. 22 – GRDC;1999
9. World Meteorological Organization (WMO) Direct methods of soil moisture estimation for water balance purposes – WMO; 1971
10. World Meteorological Organization (WMO) Problems of evaporation assessment in the water balance – WMO; 1971
11. World Meteorological Organization (WMO) Preparation of maps of precipitation and evaporation with special regards to water balance – WMO; 1970

УДК 504.06

Инвентаризация выбросов вредных веществ в атмосферный воздух для объекта «Строительство и реконструкция автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап»

Е.В. Заблоцкая[1], А.С. Горблянская[2], Т.Н. Тищенко[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]evere82@mail.ru, [2]gorblyanskaya2710@gmail.com, [3]hikikomori2550@gmail.com

Статья поступила 12.11.2020 г.; после доработки 16.11.2020 г.

Аннотация

В статье представлены результаты проведённых расчётов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в рамках инвентаризации стационарных источников объекта «Строительство и реконструкция автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап». Инвентаризация является обязательным документом для предприятий, на балансе которых находятся стационарные источники выбросов. Полученные в ходе исследования данные имеют практическое значение.

Ключевые слова: инвентаризация выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха, неорганизованные источники загрязнения атмосферного воздуха, расчёт выделения пыли.

Inventory of emissions of harmful substances into the atmosphere for the object "Construction and reconstruction of the Kerch – Sevastopol highway, stage 6"

E.V. Zablotskaya[1], A.S. Gorblyanskaya[2], T.N. Tishchenko[3]
Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, [1]evere82@mail.ru, [2]gorblyanskaya2710@gmail.com, [3]hikikomori2550@gmail.com

Received 12.11.2020 y.; received in final form 16.11.2020 y.

Abstract

The article presents the results of calculations of emissions of pollutants into the air as part of the inventory of stationary sources of the object "Construction and reconstruction of the Kerch-Sevastopol automobile road, stage 6". Inventory is a mandatory document for enterprises that have stationary sources of emissions on their balance sheet. The data obtained in the course of the study are of practical significance.

Keywords: inventory of emissions of harmful substances into the air, stationary sources of air pollution, unorganized sources of air pollution, calculation of dust release.

Введение

По данным Южного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, в 2019 году суммарный объём выбросов от стационарных источников составил 56,916 тыс. тонн, из которых 28,503 тыс. тонн (или 50%) поступило на очистные сооружения. Около 25,790 тыс. тонн (или 90,5%) вредных (загрязняющих) веществ от объёма выбросов, поступивших на очистные сооружения, – уловлено и обезврежено. Из объёма уловленных и обезвреженных выбросов вредных (загрязняющих) веществ утилизировано около 19,678 тыс.

тонн (или 76,3%).

Таким образом, в атмосферу Республики Крым стационарными источниками загрязнения было выброшено 28,398 тыс. тонн загрязняющих веществ, что на 2,931 тыс. тонн больше, чем в 2018 году.

Основными загрязнителями атмосферного воздуха в Республике Крым являются предприятия, занимающиеся производством химических веществ и химических продуктов, на долю которых приходится 49% от общего объема выбросов, в том числе предприятия, занимающиеся деятельностью сухопутного и трубопроводного транспорта, – 5,4%, обеспечением электрической энергией, газом и паром – 4,8%, сбором, обработкой и утилизацией отходов – 3,5%, растениеводством и животноводством – 1,5%.

Выбросы газообразных и жидких веществ в 2019 году составили 35,724 тыс. тонн, из них основными загрязнителями являются: летучие органические соединения 4,4% (1,584 тыс. тонн), прочие газообразные и жидкие вещества 13% (4,602 тыс. тонн), углеводороды (без ЛОС) 20% (7,182 тыс. тонн), оксиды углерода 26% (9,219 тыс. тонн), оксиды азота (в пересчете на NO2) 18% (6,572 тыс. тонн) и диоксид серы 18% (6,568 тыс. тонн). Из общего объёма твёрдых веществ (21,192 тыс. тонн), отходящих от всех стационарных источников, поступило на очистные сооружения 19,476 тыс. тонн (или 92%). Около 19,016 тыс. тонн (или 98%) от объёма выбросов твёрдых вредных (загрязняющих) веществ из поступивших на очистные сооружения уловлено и обезврежено. А также из объёма уловленных и обезвреженных выбросов твёрдых вредных (загрязняющих) веществ утилизировано около 12,908 тыс. тонн (или 68%).

Данные по выбросам в атмосферу за 2019 год в Южное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования представил 1551 респондент, на балансе которых находилось 16745 источников выбросов [1].

Инвентаризация стационарных источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух является обязательным требованием законодательства для всех предприятий и организаций, на балансе которых стоят стационарные источники выброса загрязняющих веществ. Необходимость проведения инвентаризации определена статьёй 22 Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 N 96-ФЗ [2,3].

Отсутствие материалов инвентаризации трактуется как административное правонарушение, определенное статьей 8.21 КоАП РФ и грозит для юридических лиц штрафом от ста восьмидесяти тысяч до двухсот пятидесяти тысяч рублей или административным приостановление деятельности на срок до девяноста суток [4].

Инвентаризация стационарных источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух является основой для ведения всей воздухоохранной деятельности, что подтверждает актуальность данной работы. И отрасль дорожного строительства не исключение.

Постановка задачи

Целью данной работы являлось: проведение инвентаризации источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух на площадке № 1 объекта «Строительство и реконструкция автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап».

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать нормативно-правовую базу проведения инвентаризации источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух;
- охарактеризовать предприятие;
- провести расчёты выделения загрязняющих веществ в соответствии с действующими методиками.

Описание исследования

Автомобильная дорога «Керчь - Феодосия - Белогорск - Симферополь - Бахчисарай – Севастополь (граница Бахчисарайского района)» расположена в республике Крым.

Начало 6 этапа автомобильной дороги ПК 2252+26,67 предусмотрено на границе работ по транспортной развязке на примыкании автомобильной дороги Дубки - Левадки. Конец 6 этапа ПК 2541+19,14 автомобильной дороги принят по границе Бахчисарайского и Севастопольского районов (начало 7 этапа). Общая протяженность 6 этапа составляет 28,9 км. Трасса на протяжении 6 этапа проходит по территории Бахчисарайского и Симферопольского районов.

Объект строительства на протяжении 6 этапа, проходит как вдоль существующей автомобильной дороги Н-06 «Симферополь – Бахчисарай - Севастополь», так и по новому направлению.

На участке 6 этапа предусмотрено устройство 4 транспортных развязок. Так же предусмотрено устройство 7 автобусных остановок [5].

Для линейных объектов, на которых строительно-монтажные работы ведутся, как правило, с последовательным по определенным участкам продвижением от участка к участку, рекомендуется выбирать один из однотипных участков ведения строительно-монтажных работ и проводить для него расчёты. Данный участок должен быть наиболее близко расположен к жилым зонам, к которым предъявляются повышенные экологические требования.

На площадке № 1 находится временная производственная база, расположенная в северной части города Бахчисарай, в районе кольцевой развязки ул. Промышленная в 473 метрах от ближайшей жилой застройки (рис. 1).



Рис. 1. Ситуационная карта размещения производственных площадок

Полученные результаты будут применены и для остальных площадок строительства, поскольку все остальные территории с ограниченным природопользованием находятся в более удаленном расстоянии от строительных площадок.

Временная производственная база предназначена для:

- выпуска бетонных смесей различных марок для укрепления откосов и русла у труб;
- размещение инертных и строительных материалов;
- хранение запасов цемента;
- размещения на отстой авто- и технологического транспорта;
- открытой мойки колес грузовых машин (рис. 2).

В рамках представленного исследования были проведены расчеты выбросов пыли от неорганизованных источников, которые являются основными источниками выброса пыли в атмосферный воздух от площадки № 1. Всего таких

источников 8.

Расчёты проводились по следующим методикам:

1. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов, Новороссийск, 2001;
2. Методическим пособием по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух», НИИ Атмосфера МПР Российской Федерации, СПб, 2012 г.;
3. Временные методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ (пыли) в атмосферу при складировании и перегрузке сыпучих материалов на предприятиях речного флота», Белгород, 1992;
4. Методика проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для асфальто-бетонных заводов (расчетным методом)». М, 1998.

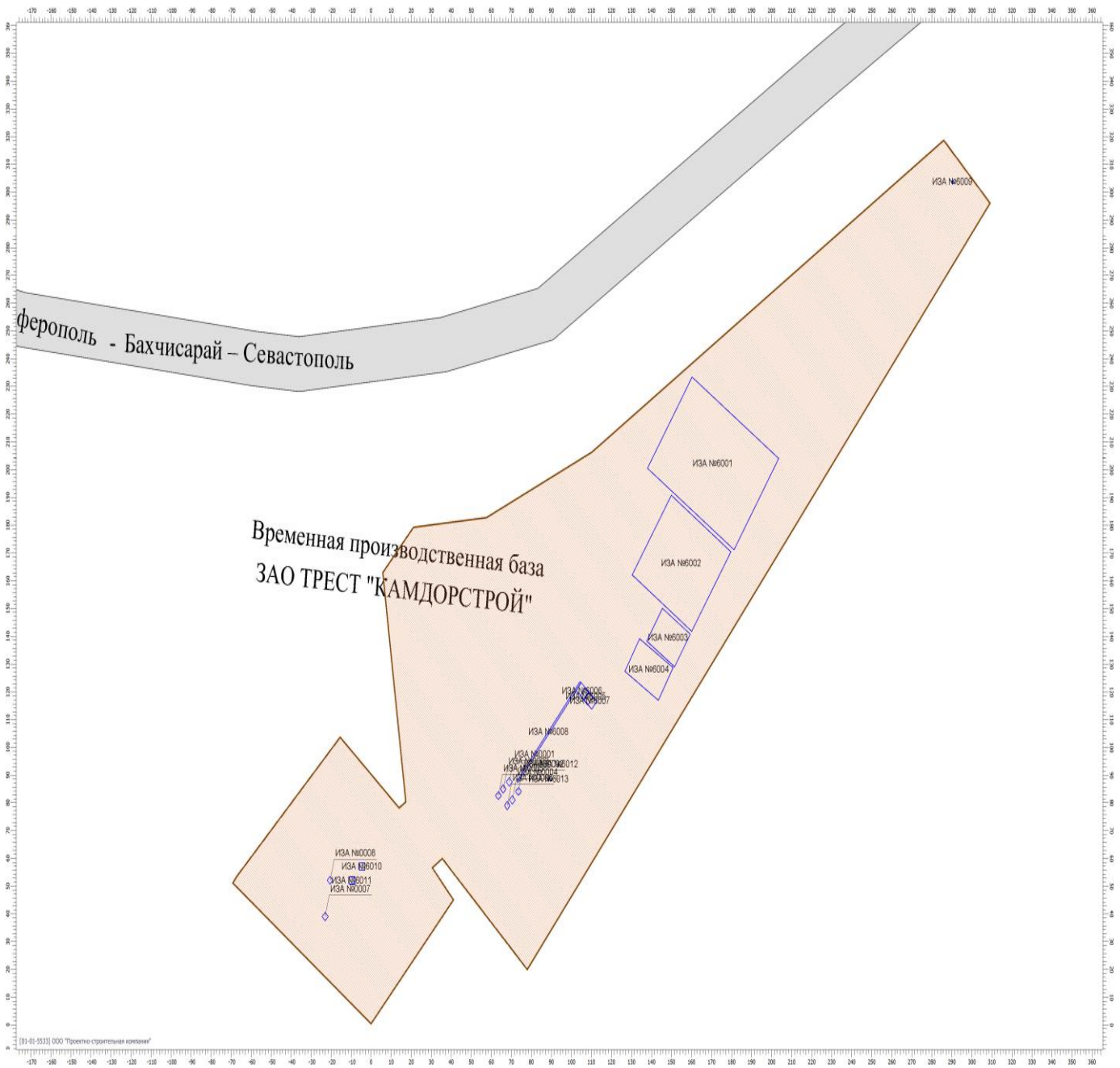


Рис. 2. Карта-схема расположения источников выброса предприятия ЗАО «ТРЕСТ КАМДОРСТРОЙ»

Результаты расчётов выбросов пыли от неорганизованных источников представлены в таблице 1.

Таблица 1. *Результаты расчётов выбросов пыли от неорганизованных источников*

Номер ИЗАВ	Источник загрязнения атмосферного воздуха	Загрязняющее вещество		Максимально разовый выброс, г/с	Годовой выброс, т/год
		код	наименование		
6001	Разгрузка и хранение песка в бурте	2907	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния более 70%	0,7123168	10,368
6002	Разгрузка и хранение щебня фракции 5х20 в бурте	2908	Пыль неорганическая, содержащая 70-20% двуокиси кремния	0,9420063	71,9507549
6003	Разгрузка и хранение щебня фракции 40х70 в бурте	2908	Пыль неорганическая, содержащая 70-20% двуокиси кремния	0,4650607	2,4803338
6004	Разгрузка и хранение ЩПС в бурте	2907	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния более 70%	0,2682356	2,7307139
		2908	Пыль неорганическая, содержащая 70-20% двуокиси кремния	0,6258832	6,3716657
6005	Погрузочные работы – заполнение бункера песком	2907	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния более 70%	0,0099886	0,21
6006	Погрузочные работы – заполнение бункера щебнем	2908	Пыль неорганическая: 70-20% двуокиси кремния	0,2226027	4,68
6007	Погрузочные работы – заполнение бункера ЩПС	2907	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния более 70%	0,0641098	0,62208
		2908	Пыль неорганическая, содержащая 70-20% двуокиси кремния	0,1495894	1,45152
6008	Дозатор с конвейерной лентой	2907	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния более 70%	0,1063365	1,292242
		2908	Пыль неорганическая, содержащая 70-20% двуокиси кремния	0,1188882	1,761261

Заключение

1. Инвентаризация стационарных источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух является обязательной составляющей воздухоохранной деятельности на строительной площадке автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап.
2. Для проведения расчётов был осуществлён анализ нормативно–методической базы по проведению инвентаризация стационарных источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.
3. В данной работе представлены результаты расчёта выделения загрязняющих веществ от неорганизованных источников площадки № 1 объекта «Строительство и реконструкция автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап».
4. Полученные данные будут применены при проведении расчётов нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для объекта «Строительство и реконструкция автомобильной дороги Керчь – Севастополь, 6 этап».

Список литературы

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2019

году, 2020 – 359 с.
2. Об охране атмосферного воздуха: Федер. закон [принят Гос. Думой 02.04.1999] // Собрание законодательства РФ. 1999. № 18. Ст. 2222.
3. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 7 августа 2018 г. № 352 "Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, корректировки ее данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения таких инвентаризации и корректировки".
4. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: Федер. закон [принят Гос. Думой 30.12.2001] // Собрание законодательства РФ. 2002. № 1 (часть I). Ст. 1.
5. Отчёт по инвентаризации выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух для предприятия Закрытого акционерного общества «Камский трест по строительству автомобильных дорог и аэродромов» (Республика Крым, г. Бахчисарай, ул. Симферопольская, участок №1), Краснодар, 2018.

References

1. Report on the state and protection of the environment in the territory of the Republic of Crimea in 2019, 2020-359 p.
2. On the protection of atmospheric air: Fader. law [adopted by the State. Duma 02.04.1999] // Collection of legislation of the Russian Federation. 1999. № 18. St. 2222.
3. Order of the Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation № 352 dated August 7, 2018 "on approving the procedure for conducting an inventory of stationary sources and emissions of harmful (polluting) substances into the air, correcting its data, documenting and storing data obtained as a result of such inventory and adjustments".
4. Code of administrative offences of the Russian Federation: Feder. law [adopted by the State. Duma 30.12.2001] // Assembly of legislation of the Russian Federation, 2002. № 1 (part I). Article 1.
5. Report on inventory of emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air for the enterprise of the Closed joint-stock company "Kama trust for the construction of automobile roads and airfields" (Republic of Crimea, Bakhchisarai, Simferopol street, Uch-Stok № 1), Krasnodar, 2018.

УДК 502.75

Редкие виды растений на территории парка Института ядерной энергии и промышленности

Е.В. Заблоцкая[1], Т.Н. Тищенко[2], А.С. Горблянская[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, [1]evere82@mail.ru, [2]hikikomori2550@gmail.com, [3]gorblyanskaya2710@gmail.com

Статья поступила 19.11.2020 г.; после доработки 27.11.2020 г.

Аннотация

В статье представлены результаты оценки состояния краснокнижных деревьев парка Института ядерной энергии и промышленности. Установлен видовой состав и определены возрастные группы деревьев, занесённых в Красную книгу. Также дана характеристика распространения представленных видов на территории города Севастополя.

Ключевые слова: Красная книга, инвентаризация зелёных насаждений, древостой, категории состояния насаждений, рабочий дневник.

Rare plant species in the Park of the Institute of nuclear energy and industry

E.V. Zablotskaya[1], T.N. Tishchenko[2], A.S. Gorblyanskaya[3]
Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]evere82@mail.ru, [2]hikikomori2550@gmail.com, [3]gorblyanskaya2710@gmail.com

Received 19.11.2020y.; received in final form 27.11.2020 y.

Abstract

The article presents the results of assessing the state of red book trees in the Park of the Institute of nuclear energy and industry. The species composition and age groups of trees listed in the Red book are determined. The distribution of the presented species on the territory of the city Of Sevastopol is also characterized.

Keywords: Red book, inventory of green spaces, stand of trees, categories of plantings condition, work diary.

Введение

На территории города Севастополя отмечены в настоящее время или достоверно регистрировались в прошлом 187 видов растений, включенных в различные Красные книги и природоохранные конвенции: в Красную книгу Российской Федерации – 53, Красную книгу города Севастополя – 187, Красный список МСОП – 55 (из них 11 имеют высокую природоохранную категорию), Европейский красный список – 61 (из них 10 имеют высокую природоохранную категорию), Приложение к Бернской Конвенции – 11, Приложение к Конвенции CITES – 41, Habitats Directive – 3. Из 176 видов и подвидов сосудистых растений, включенных в первое издание Красной книги города Севастополя, девять предложены с категорией 0 (вероятно исчезнувший), 14 – с категорией 1 (находящийся под угрозой исчезновения), 68 – с категорией 2 (сокращающийся в численности), 80 – с категорией 3 (редкий), четыре – с категорией 4 (неопределенный по статусу). Среди растений, занесенных в Красную книгу города Севастополя, отмечены редкие для Российской Федерации виды, которые имеют ограниченное количество популяций в стране [1].

Постановка задачи

Целью проведённого исследования являлась оценка состояния краснокнижных деревьев, расположенных в парке Института ядерной энергии и промышленности. Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

- выработать наиболее оптимальный подход к оценке состояния насаждений парка Института ядерной энергии и промышленности;
- выявить на территории парка виды деревьев, занесённых в Красную книгу;
- оценить морфологическое и санитарное состояние краснокнижных деревьев парка Института ядерной энергии и промышленности.

Описание исследования

Данные для оценки состояния насаждений были собраны в мае 2018 года в парке ИЯЭиП города Севастополя. Сбор материала выполнен в соответствии с методикой инвентаризации городских зеленых насаждений [2]. Учётные экземпляры деревьев были пронумерованы и нанесены на план инвентаризации в виде условных знаков. Деревья, относящиеся к видам, занесённым в Красную книгу, были выделены на плане красным цветом. Под соответствующим номером растение записывалось в рабочий дневник учёта зелёных насаждений. Качественное состояние деревьев оценивалось по внешним признакам в соответствии с Методическими рекомендациями по оценке жизнеспособности деревьев и правилами их отбора и назначения к вырубке и пересадке [3]. В рабочем дневнике учёта зелёных насаждений растения распределялись по следующим категориям – без признаков ослабления, ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, сухостой текущего года и сухостой прошлых лет.

В результате проведённых исследований на территории парка Института ядерной энергии и промышленности было определено 136 деревьев, занесённых в Красную книгу города Севастополя. Всего 3 вида. Сосна брутийская (с. Станкевича, с. пицундская) (*Pinus brutia* Ten [*P. stankewiczii* (Sukacz.) Fomin; *P. Pityusa* Steven] – 10 шт., 2-я категория статуса редкости – сокращающиеся в численности [4]. Тис ягодный (*Taxus baccata* L.) – 27 шт., 3-я категория статуса редкости – редкие [4]. Фисташка туполистная (*Pistacia mutica* Fisch. et C. A. Mey) – 99 шт., 2-я категория статуса редкости – сокращающиеся в численности [4]. Также на территории парка произрастает Сосна Палласа (с. крымская) *Pinus nigra* J. F. Arnold subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe [*P. Pallasiana* D. Don]. Данный вид занесен в Красную книгу города Севастополя, но с примечанием: – «данный вид охраняется только в естественных популяциях, за исключением искусственных лесопосадок и городских насаждений» [4], поэтому в рамках представленного исследования этот вид не рассматривали. Кроме того, в 2018 году приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации популяция сосны Палласа, произрастающая на территории Республики Крым, исключена из Красной книги России [5]. Такое решение связано с тем, что насаждения сосны крымской, созданные искусственным путем, требуют регулярного проведения лесохозяйственных мероприятий. Как правило, эти насаждения созданы вокруг населенных пунктов и выполняют функции зеленых поясов. Проведённый анализ динамики возгораний на территории лесных насаждений, зафиксированных с 1991 по 2017 годы, показывает, что 98 % пожаров возникли в сосновых древостоях. С целью недопущения крупных пожаров в сосновых насаждениях, а также своевременной их ликвидации необходимо регулярное и оперативное проведение противопожарных и санитарно-оздоровительных мероприятий. Исключение сосны крымской из Красной книги Российской Федерации позволит проводить необходимые противопожарные мероприятия в созданных сосновых насаждениях, что позволит значительно улучшить состояние древостоев.

Результаты качественной оценки состояния краснокнижных видов приведены на рис. 1. В итоге фисташка туполистная оказалась не только самым многочисленным из краснокнижных видов, но и в самом хорошем состоянии. По-видимому, это связано с тем, что условия оказались для неё наиболее комфортными. В основном фисташка туполистная была нами обнаружена на труднодоступных склонах, которые являются оптимальными для её произрастания.

Кроме того, были проведены расчёты, согласно которым определили возрастные группы каждого вида (рис. 2). Сосна брутийская – III класс (25 – 45 лет). Тис ягодный – V класс (старше 60 лет). Фисташка туполистная – II класс (15 – 25 лет).

В 2019 году был проведён мониторинг на особо охраняемых природных территориях города Севастополя. В ходе мониторинга было вы-

явлено 23 вида растений, включенных в Красную книгу города Севастополя. В том числе 10 видов включены в Красную книгу Российской Федерации. Сосна Палласа была обнаружена на территории государственного природного ландшафтного заказника регионального значения «Мыс Фиолент». А фисташка туполистная на следующих особо охраняемых природных территориях: государственный природный ландшафтный заказник регионального значения «Мыс Фиолент»; комплексный памятник природы регионального значения «Мыс Фиолент»; гидрологический памятник природы регионального значения «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Фиолент»; ботанический памятник природы регионального значения «Ушакова балка» [1].

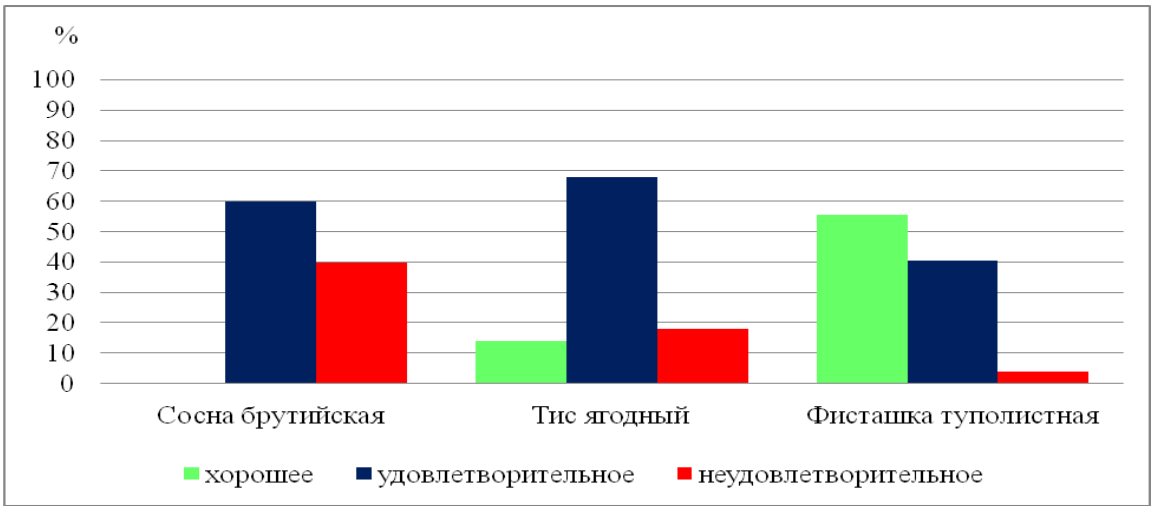


Рис. 1. Распределение видов деревьев по категориям состояния

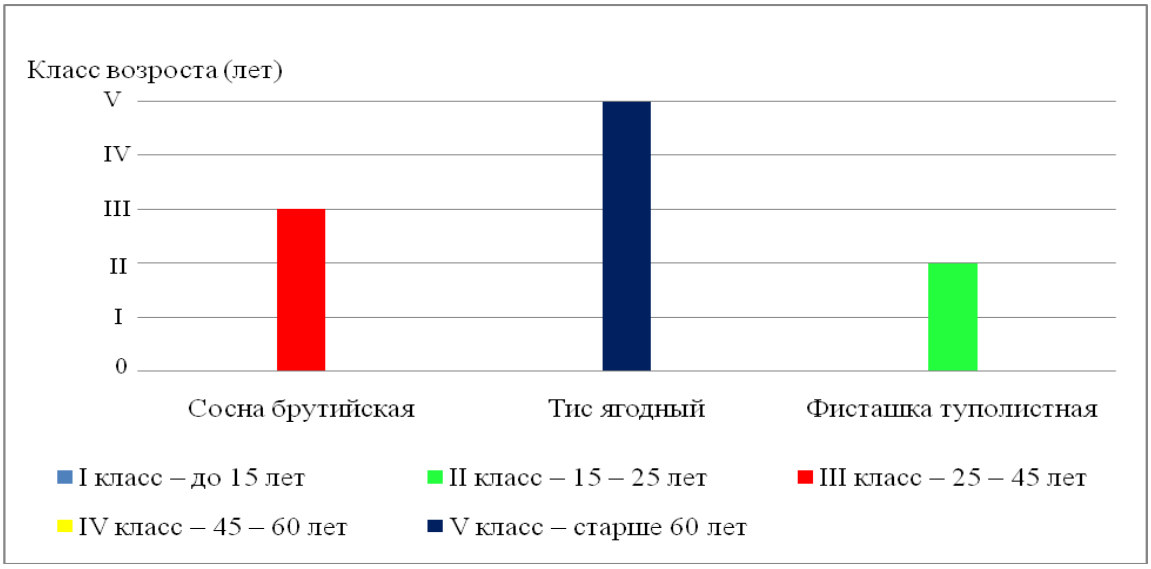


Рис. 2. Распределение видов деревьев по возрастным группам

Что касается «Ушаковой балки», то важнейшим компонентом данного памятника природы является занесённая в Красную книгу Российской Федерации фисташка туполистная (кевовое дерево), относящаяся к семейству сумаховые. Это невысокое кряжистое дерево высотой до 8-10 метров, реже – кустарник. Фисташка очень декоративна, особенно осенью, из-за красивой окраски листьев и плодов. Растение является реликтом третичного периода.

Редколесья из фисташки туполистной сохранились лишь в немногих местах Южного берега Крыма, где площади их распространения постоянно сокращаются. В связи с этим сохранение местообитаний фисташки туполистной и

поддержание их устойчивого состояния в современных условиях приобретает особую актуальность.

Экземпляры фисташки туполистной в Ушаковой балке имеют типичную раскидистую крону. Прекрасная жизненность фисташки в данном месте обитания определяется не только размерами деревьев, но и отсутствием фитопатологии, а также наличием подроста фисташки в этих сообществах.

Растительный покров представлен двумя основными формациями: фисташки туполистной и ясеня остроплодного. Формация фисташки туполистной располагается на ровных участках выположенного дна балки, а также на среднекрутых (до 35-20 градусов крутизны) склонах балки; кроме того, небольшие участки фисташки отмечены на водораздельной равнине, прилегающей к балке.

Наиболее мощные и хорошо сохранившиеся деревья фисташки туполистной, с очень хорошей жизненностью и возрастом около 150-200 лет отмечены в сообществах, расположенных в тальвеге балки, единично они встречаются и на приводораздельной пологой террасе. В указанных местах таких деревьев довольно много, так как именно здесь скапливается вода, и рыхлый материал, столь необходимый фисташке для успешного произрастания, в этих экотопах больше, чем в других, склоновых. Положительную роль играет и отсутствие сильных ветров, от которых защищает балка и окружающая застройка. Диаметр деревьев фисташки обычно составляет здесь 50-65 см, достигая нередко 80 см и более. Высота особей в среднем 5-6 м, часто 7-8 м. По структуре эти сообщества следует отнести к редколесьям.

Интересным фитоценотическим моментом является успешное совместное произрастание фисташки туполистной с экзотами.

На территории памятника природы насчитывается около 300 экземпляров фисташки с диаметрами стволов более 30 см, встречаются деревья с диаметрами стволов 65-80 см, а также настоящие «патриархи» – двух-трёхствольные особи, диаметр стволов которых превышает 90 см. Все они имеют хорошую жизненность, значительный возраст (от 70-90 лет до 120-150 лет, реже около 200-300 лет) и должны особо охраняться.

Природная система памятника природы является открытой и очень уязвимой [6].

Все обследованные особо охраняемые природные территории подвергаются неконтролируемому антропогенному воздействию. Основные негативные факторы воздействия на экосистемы – вытаптывание (прокладывание троп, оборудование туристических стоянок), разведение костров, механические повреждения деревьев (обламывание и спиливание ветвей).

Антропогенное воздействие приводит к активному развитию грибных и бактериальных инфекций в ослабленных и поврежденных экземплярах и соответственно к преждевременному отмиранию редких деревьев. Список выявленных видов базидиальных грибов, паразитирующих на деревьях и кустарниках, насчитывает 10 видов [1].

Заключение

1. Получение достоверной информации о количественных и качественных характеристиках зелёных насаждений является весьма актуальным вопросом для Севастополя.

2. При проведении инвентаризации на территории парка Института ядерной энергии и промышленности было определено 136 деревьев (3 вида), занесённых в Красную книгу города Севастополя.

3. Результаты качественной оценки состояния краснокнижных видов показали, что фисташка туполистная оказалась не только самым многочисленным из краснокнижных видов, но и в самом хорошем состоянии.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2019 год: ежегодный доклад Главного управления природных ресурсов и экологии города Севастополя. 2020.
2. Методика инвентаризации городских зелёных насаждений: утв. Минстроем России: ввод в действие с 01.01.97. – М.: Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1997.
3. Методическими рекомендации по оценке жизнеспособности деревьев и правилам их отбора и назначения к вырубке и пересадке: утверждены постановлением Правительства Москвы от 30 сентября 2003 г. № 822-ПП.
4. Приказ Главного управления природных ресурсов и экологии города Севастополя от 11.05.2016 г. № 66 «Об утверждении Перечней (списков) объектов животного и растительного мира, грибов, занесенных в Красную книгу города Севастополя» С. 1-15.
5. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 20 декабря 2018 г. № 678 “О внесении изменения в Перечень (список) объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации (по состоянию на

1 июня 2005 г.), утвержденный приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 25.10.2005 № 289”.
6. Постановление Правительства Севастополя от 29.04.2016 № 404-ПП "Об утверждении паспорта ботанического памятника природы регионального значения "Ушакова балка".

References

1. On the state and environmental protection of the city of Sevastopol for 2019: annual report of the Main Department of natural resources and ecology of the city of Sevastopol. 2020.
2. Method of inventory of urban green spaces: approved. The Ministry of construction was put into effect from 01.01.97. – M.: Academy of municipal economy named. K. D. Pamfilova, 1997.
3. Guidelines for the assessment of the viability of trees and rules for their selection and appointment to the felling and transplanting: approved by Moscow Government resolution dated September 30, 2003 № 822-PP.
4. The order of the Main Department of natural resources and environment of the city of Sevastopol from 11.05.2016 № 66 "On approving Lists (lists) of fauna and flora, the fungi listed in the Red book of the city of Sevastopol", P 1-15.
5. Order of the Ministry of natural resources and ecology of the Russian Federation № 678 of December 20, 2018 "On making changes to the List (list) of plant world objects listed in the Red book of the Russian Federation (as of June 1, 2005), approved by order Of the Ministry of natural resources of the Russian Federation № 289 of 25.10.2005”.
6. Resolution Of the government of Sevastopol dated 29.04.2016 № 404-PP "On approval of the passport of the Botanical nature monument of regional significance "Ushakova Balka".

УДК 628.161.2

Математическое описание процессов сорбции и регенерации сульфатов на анионите АВ-17-8

Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, Galina_kucherik@mail.ru

Статья поступила 02.11.2020 г.; после доработки 06.11.2020 г.

Аннотация

В работе представлены результаты изучения процессов сорбции сульфат-анионов на анионите АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах. Показано, что емкость ионита выше в CO_3^{2-} -форме. Определена эффективность регенерации ионита в SO_4^{2-} -форме растворами щелочи и соды. Показано, что эффективность процесса при концентрациях щелочи 4–10 % и соды 5–20 % мало зависит от концентрации реагента, а больше зависит от скорости фильтрования и удельного расхода его раствора. Рассчитаны уравнения регрессии для зависимости остаточных концентраций сульфат-ионов в воде от начальной концентрации сульфатов и объема пропущенного раствора и уравнения регрессии для зависимости концентраций сульфат-ионов в регенерационном растворе от исходной концентрации раствора соды и его удельного расхода.

Ключевые слова: ионит, ионный обмен, сульфат-ионы, сорбция, регенерация.

Mathematical description of sorption and regeneration processes sulfates on anion exchanger AB-17-8

G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, Galina_kucherik@mail.ru

Received 02.11.2020 y.; received in final form 06.11.2020 y.

Abstract

The paper presents the results of studying the processes of sorption of sulfate anions on the AB-17-8 anion exchanger in the OH^- and CO_3^{2-} forms. It is shown that the capacity of the ion exchanger is higher in the CO_3^{2-} form. The efficiency of ion exchanger regeneration in SO_4^{2-} -form with alkali and soda solutions has been determined. It is shown that the efficiency of the process at concentrations of alkali of 4–10% and soda of 5–20% depends little on the concentration of the reagent, and more depends on the rate of filtration and the specific consumption of its solution. There are calculated the regression equations for the dependence of the residual concentrations of sulfate ions in water on the initial concentration of sulfates and the volume of the passed solution and the regression equations for the dependence of the concentrations of sulfate ions in the regeneration solution on the initial concentration of the soda solution and its specific consumption.

Keywords: ion exchanger, ion exchange, sulfate ions, sorption, regeneration.

Введение

Проблема очистки сточных вод от сульфатов до значений ПДК актуальна в угольной промышленности (шахтные воды), цветной металлургии (воды рудников, сточные воды обогатительных фабрик и изготовления серной кислоты), а также в производстве сульфоугля, силикагеля, стекла, минеральных удобрений и др.

Известны следующие реагентные методы очистки водных растворов от сульфатов: осаждение известью [1], солями бария [2], соосаждение с карбонатом кальция [3], удаление в составе гидросульфоалюминатов кальция [4].

Метод очистки нейтрализацией известью не

позволяет снизить концентрацию до значений менее 1500 мг/дм^3, что обусловлено растворимостью гипса, при санитарной норме 250–500 мг/дм^3 для питьевых вод и не более 100 мг/дм^3 для рыбохозяйственных водоемов [5].

Наиболее эффективно осаждение сульфатов оксидом или гидрооксидом бария [2,6]. Осадок $BaSO_4$ восстанавливают углеродом, водородом или окислом углерода до BaS при 1100 °С. BaS растворяют в воде и раствор подвергают карбонизации углекислым газом с получением $BaCO_3$, который подвергают термическому разложению с получением BaO, который используют для осаждения сульфат-ионов [5].

В работе [7] рассмотрены различные методы очистки водных растворов от сульфат-ионов путем их осаждения в виде малорастворимого сульфида свинца. Для осаждения предложено применять раствор нитрата свинца (II). Основным недостатком рассмотренного реагентного способа снижения концентрации сульфат-ионов в водных растворах является их вторичное загрязнение, в частности, нитрат-ионами. Для предотвращения вторичного загрязнения растворов анионами может быть применен электрохимический способ очистки.

Постановка задачи

Сложность проблемы повышенной минерализации воды, когда общее солесодержание превышает уровень 1 г/дм^3, состоит в том, что очистить воду от солей на существующих станциях водоподготовки невозможно.

Традиционными технологиями воду можно чистить от взвешенных и коллоидных примесей, от микроорганизмов, в отдельных случаях – от тяжелых металлов. Однако эти методы не позволяют снизить уровень минерализации. На предприятиях воду опресняют с помощью ионного обмена.

Цель данной работы состояла в математическом описании процессов сорбции и регенерации сульфатов на аниоците АВ-17-8.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучить процессы сорбции сульфат-анионов на аниоците АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах;
- определить эффективность регенерации ионита в SO_4^{2-} -форме растворами щелочи и соды;
- выявить детальные зависимости между основными параметрами процессов сорбции и регенерации в оптимальных условиях их проведения;
- рассчитать уравнения регрессии для зависимости остаточных концентраций сульфат-ионов в воде от начальной концентрации сульфатов и объема пропущенного раствора;
- рассчитать уравнения регрессии для зависимости концентраций сульфат ионов в регенерационном растворе от исходной концентрации раствора соды и его удельного расхода.

Описание исследования

При проведении сорбции использовали анионит АВ-17-8 (объемом 20–50 см^3) в OH^- и CO_3^{2-} -форме. В качестве ионообменной колонки использовали колонку диаметром 2 см, заполненную ионитом АВ-17-8.

Сорбция сульфатов была исследована при пропускании через анионит модельных растворов сульфата натрия.

В процессе сорбции исходную воду, содержащую сульфаты (1000, 1500, 2000 мг/дм^3) пропускали через анионит АВ-17-8 (V_i=20 см^3) со скоростью 2,12–3,18 м/ч, отбирали пробы по 100–200 см^3 и по общепринятым методикам определяли остаточное количество сульфатов и щелочность. Концентрацию сульфат ионов определяли фотоколориметрически по методике, приведенной в [8]. Щелочность определяли титрованием анализируемой пробы воды раствором сильной кислоты [8]. Количество титрованного раствора, израсходованного для достижения pH=4,5 – эквивалентно общей щелочности. Индикатор – 0,05 % раствор метилового оранжевого.

Результаты эксперимента приведены на рисунках 1, 2.

Как видно из рисунка 1, емкость ионита возрастает с повышением исходной концентрации сульфатов от 1,0 г/дм^3 до концентрации сульфатов 2,0 г/дм^3.

При концентрации сульфатов 2,0 г/дм^3 емкость ионита по сульфатам падает, что связано с подщелачиванием воды при сорбции сульфатов на аниоците в основной форме. В этом случае щелочность обработанной воды достигает 42,0 мг-экв/дм^3 (~1,7 %), что ограничивает емкость ионита по сульфатам на уровне ~1200,0 мг-экв/дм^3.

В целом, обменная емкость анионита АВ-17-8 достаточно высокая при использовании его как в основной, так и карбонатной форме. Обменная емкость ионита в OH^- -форме достигла

1448 мг-экв/дм^3 при исходной концентрации сульфатов 1 г/дм^3, а в CO_3^{2-} -форме – 1513 мг-экв/дм^3, что обусловлено большей селективностью ионита по сульфат ионам. Карбонаты по селективности уступают как сульфатам, так и гидрооксид-анионам.

При этом селективность ионита по сульфатам настолько выше селективности анионов OH^- и CO_3^{2-}, что в процессе ионного обмена практически нивелируется разница в селективности анионита по гидрооксид-анионам и карбонат-анионам. Поэтому емкость ионита по сульфатам в OH^- -форме мало отличается от его емкости в CO_3^{2-} -форме. Необходимо также отметить, что емкость анионита АВ-17-8 в основной форме по сульфатам является достаточно высокой ~1500 мг-экв/м^3, что обеспечит его значительную эффективность при деминерализации воды.

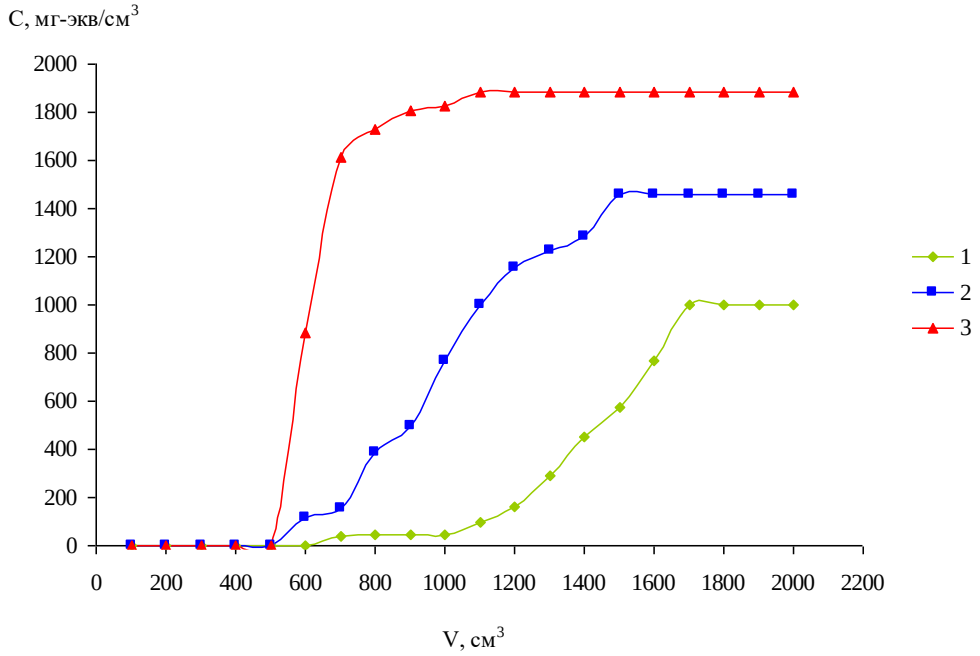


Рис. 1. Выходные кривые адсорбции сульфатов на аниоците АВ-17-8 (V_i=20 см^3) в OH^- -форме (скорость фильтрования 3,18 м/ч): ПОДЕ$_1$=1402 мг-экв/дм^3; ПОДЕ$_2$=1512 мг-экв/дм^3; ПОДЕ$_3$= 1238 мг-экв/дм^3
1 – $[SO_4^{2-}]$=1 г/дм^3; 2 – $[SO_4^{2-}]$=1,5 г/дм^3; 3 – $[SO_4^{2-}]$=2 г/дм^3

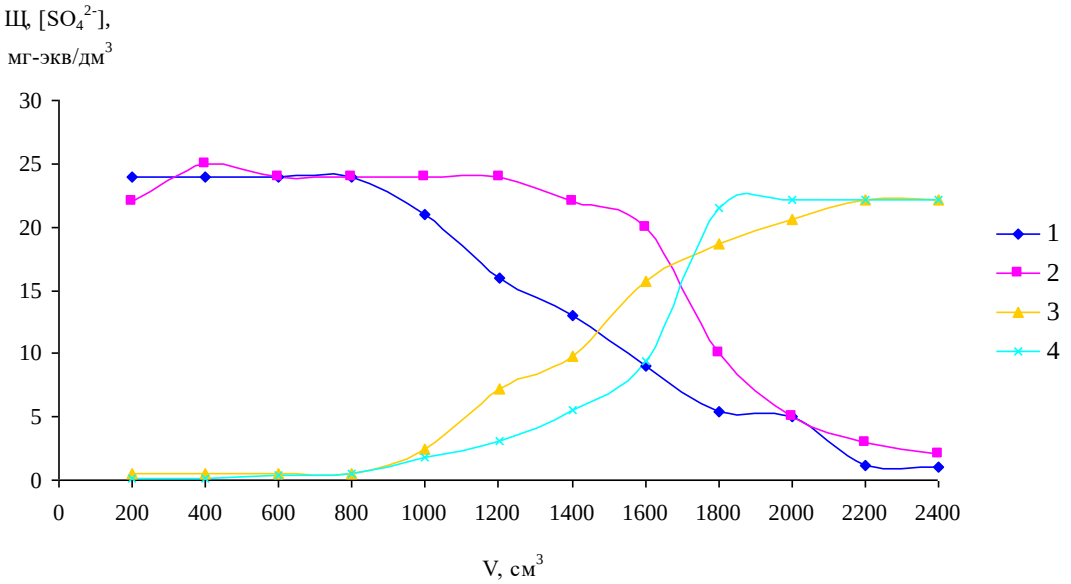


Рис. 2. Зависимость щелочности, остаточной концентрации сульфатов от объема пропущенного раствора Na_2SO_4 ($[SO_4^{2-}]$=1000 мг/дм^3) через анионит АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -форме (V_i=20 см^3): ПОДЕ$_1$=1448 мг-экв/дм^3 ; ПОДЕ$_2$=1513 мг-экв/дм^3; 1; 2 – Щ; 3; 4 – $[SO_4^{2-}]$; 1; 3 – OH^- –форма ионита; 2; 4 – CO_3^{2-} – форма ионита

Очевидно, что процессы ионообменной очистки невозможны без эффективной регенерации ионитов. Учитывая высокую емкость анионита по сульфатам в карбонатной форме были проведены исследования по регенерации анионита растворами щелочи и соды.

Для регенерации ионита от сульфат-анионов использовали 4, 6 и 10 % растворы NaOH а также 5, 10, 15, 20 % растворы Na_2CO_3. Для этого через ионит в SO_4^{2-} -форме пропускали со скоростью 2–5 $см^3$/мин. (что соответствует скорости фильтрования 0,42–1,06 м/ч) раствор щелочи или соды, отбирали пробы 40–80 $см^3$. В отобранных пробах определяли щелочность, содержание сульфатов.

В отобранных пробах определяли остаточное содержание сульфатов и щелочность. В данном случае эффективность десорбции растет с увеличением концентрации NaOH и при уменьшении расхода раствора (таблицы 1–3). Как видно из таблиц концентрация сульфатов в первых пробах более высокая в случае использования 6 % раствора NaOH по сравнению 4 %. При этом практически 85 % сульфатов десорбируются уже при удельном расходе регенерационного раствора 2 $см^3/см^3$, что является достаточно высоким показателем.

Таблица 1. *Зависимость концентрации сульфатов от удельного расхода регенерационного раствора (q) (4 % NaOH) через анионит АВ-17-8 в SO42– -форме (Vi=20 см3) (Мсорб. SO42–= 1631 мг) (скорость фильтрования 1,06 м/ч)*

V, см3	qуд, см3/см3	Щ, мг-экв/дм3	[SO42–]		Мдесорб. SO42–, мг	Z, %
			мг/дм3	мг-экв/дм3		
40	2	370	15226,63	317,22	609,07	37,34
80	4	740	7271,01	151,48	290,84	55,18
120	6	800	5571,29	116,07	222,85	68,84
160	8	800	2148,25	44,76	85,93	74,11
200	10	800	1017,47	21,20	40,70	76,60
240	12	800	943,34	19,65	37,73	78,92
280	14	800	547,69	11,41	21,91	80,26
320	16	840	442,40	9,22	17,70	81,34
360	18	880	322,00	6,71	12,88	82,13
400	20	880	0,00	0,00	0,00	83,00
Итого:					1339,60	

Таблица 2*. Зависимость концентрации сульфатов от удельного расхода регенерационного раствора (q) (6 % NaOH) через анионит АВ-17-8 в SO42– -форме (Vi=20 см3) (Мсорб. SO42–=1739 мг) (скорость фильтрования 1,06 м/ч)*

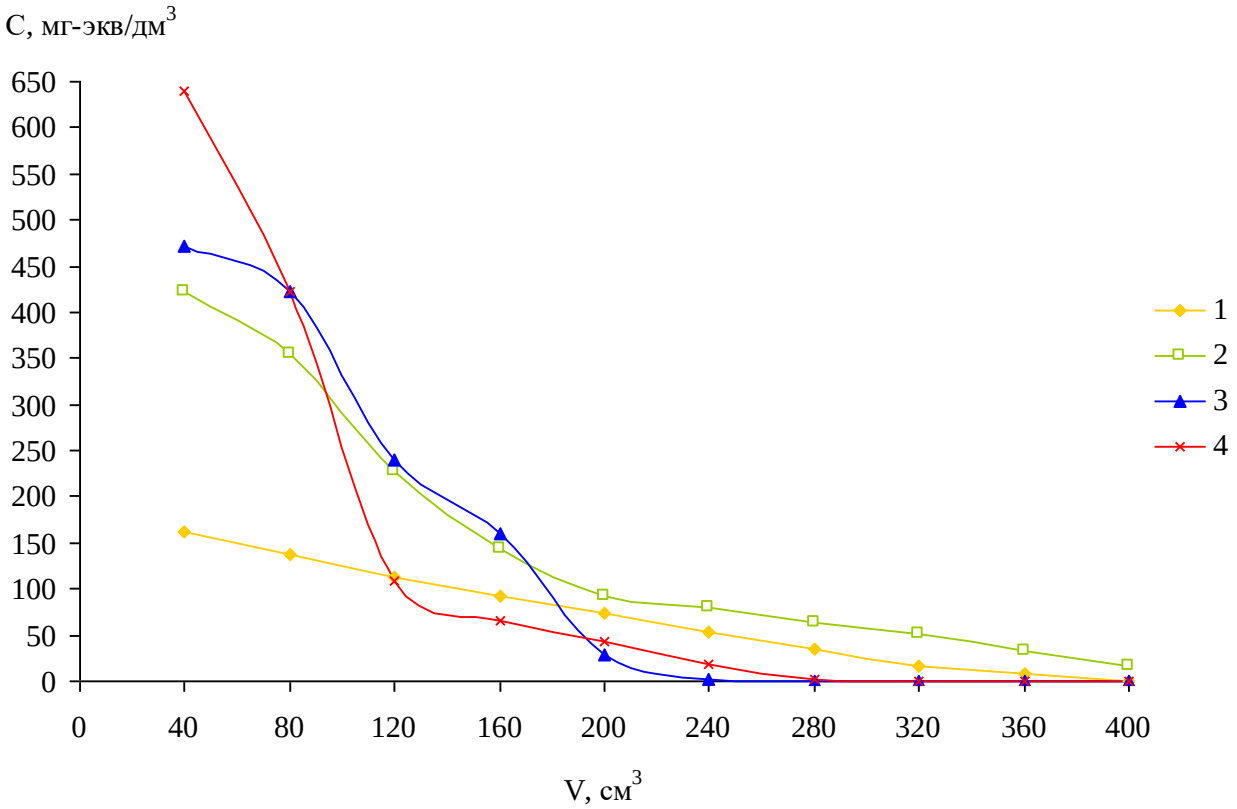
V, см3	qуд, см3/см3	Щ, мг-экв/дм3	[SO42–],		Мдесорб. SO42–, мг	Z (SO42–), %
			мг/дм3	мг-экв/дм3		
40	2	480	15509,92	323,12	620,40	35,68
80	4	840	9915,01	206,56	396,60	58,48
120	6	1020	4721,44	98,36	188,86	69,34
160	8	1040	2124,65	44,26	84,99	74,23
200	10	1060	1638,34	34,13	65,53	78,00
240	12	1120	1558,07	32,46	62,32	81,58
280	14	1308	1529,75	31,87	61,19	85,10
320	16	1320	1477,81	30,79	59,11	88,50
360	18	1480	1336,17	27,84	53,45	91,57
400	20	1600	1085,93	22,62	43,44	94,07
440	22	1600	859,77	17,91	34,39	96,05
480	24	1600	969,78	20,20	38,79	98,28
520	26	1600	708,22	14,75	28,33	99,91
560	28	1600	26,91	0,56	1,08	100,00
Итого:					1738,47	

Таблица 3. *Зависимость концентрации сульфатов от удельного расхода регенерационного раствора (q) (10 % NaOH) через анионит АВ-17-8 в SO42– -форме (Vi=20 см3) (Мсорб. SO42–=1386 мг) (скорость фильтрования 1,06 м/ч)*

V, см3	qуд, см3/см3	Щ, мг-экв/дм3	[SO42–],		Мдесорб. SO42-, мг	Z (SO42–), %
			мг/дм3	мг-экв/дм3		
40	2	1000	16525,02	344,27	661,00	47,69
80	4	1360	9442,87	196,73	377,71	74,94
120	6	1440	3541,08	73,77	141,64	85,16
160	8	1480	1888,57	39,35	75,54	90,61
200	10	1520	1303,12	27,15	52,12	94,37
240	12	1560	944,29	19,67	37,77	97,10
280	14	1680	333,33	6,94	13,33	98,06
320	16	1800	330,50	6,89	13,22	99,02
360	18	2000	322,47	6,72	12,90	100,00
Итого:					1385,00	

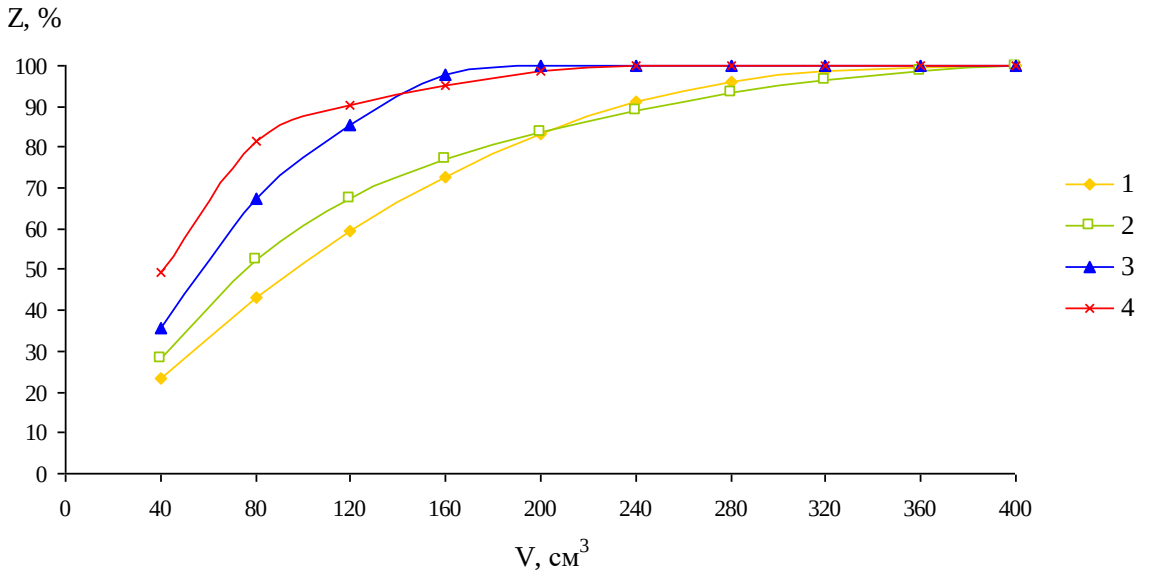
При использовании 4 %-го раствора щелочи при удельном расходе $q_{уд}$=2 см^3/см^3 степень десорбции достигает 71 % и только при $q_{уд}$=5 см^3/см^3 регенерация достигает 82 %.

Результаты регенерации ионита в SO_4^{2-} -форме содой (5, 10, 15, 20 %) достаточно высокие, как и при использовании щелочи (рисунки 3, 4).



Концентрация Na_2CO_3: 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20%

Рис. 3. Выходные кривые десорбции сульфатов при пропускании через анионит АВ-17-8 в SO_4^{2-} -форме (V_i=20 см^3) раствора Na_2CO_3



Концентрация Na_2CO_3: 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %

Рис. 4. Зависимость степени регенерации анионита АВ-17-8 в SO_4^{2-} -форме (V_i=20 см^3) от пропущенного объема раствора Na_2CO_3

Для внедрения метода необходимо владеть детальными зависимостями между основными параметрами процесса в оптимальных условиях его проведения. Поэтому на основании методики [9] были рассчитаны уравнения регрессии для зависимости остаточных концентраций сульфат ионов в воде от начальной концентрации сульфатов и объема пропущенного раствора.

В основу расчета был положен полный факторный план (ПФП) типа 2^2. План-матрица ПФП 2^2 и результаты эксперимента приведены в таблице 4.

Таблица 4 *– План–матрица ПФП 2^2 и результаты исследований по сорбции сульфат-ионов на аниоците АВ-17-8*

№ п/п	Кодовые значения факторов		Натуральные значения факторов		Значения параметра оценки
					Концентрация сульфатов, мг/дм^3
	X_1	X_2	$C_н(SO_4^{2-})$, мг/дм^3	V, мл	Y
1	+1	+1	2000	1300	2000
2	-1	-1	1000	100	2,88
3	-1	+1	1000	1300	1000
4	+1	-1	2000	100	2,88

В результате вычислений после проверки соответствия результатов исследований, оценки значимости полученных коэффициентов и проверки уравнения регрессии на адекватность, неизвестная зависимость приняла следующий вид:

$$Y = 576,44 + 425,00 \cdot X_1 + 573,56 \cdot X_2 + 425,00 \cdot X_1 \cdot X_2$$

После замены в полученном уравнении кодовых значений натуральными,

$$X_1 = \frac{C_{SO_4^{2-}} - 1500}{500}; \; X_2 = \frac{V - 700}{600}$$

получили следующее уравнение регрессии в натуральном виде:

$$Y = 102,24 - 0,13 \cdot C_{SO_4^{2-}} - 1,144 \cdot V + 0,0014 \cdot C_{SO_4^{2-}} \cdot V.$$

Полученная зависимость представлена на рисунке 5 в виде площади, на которой лежит решение приведенного уравнения.

Как видно из рисунка, емкость ионита возрастает с повышением исходной концентрации сульфатов. Анализ представленного графика показывает, что экспериментальные точки, использованные при расчете уравнения регрессии, находятся на построенных площадях решений, что свидетельствует об адекватности использованного уравнения.

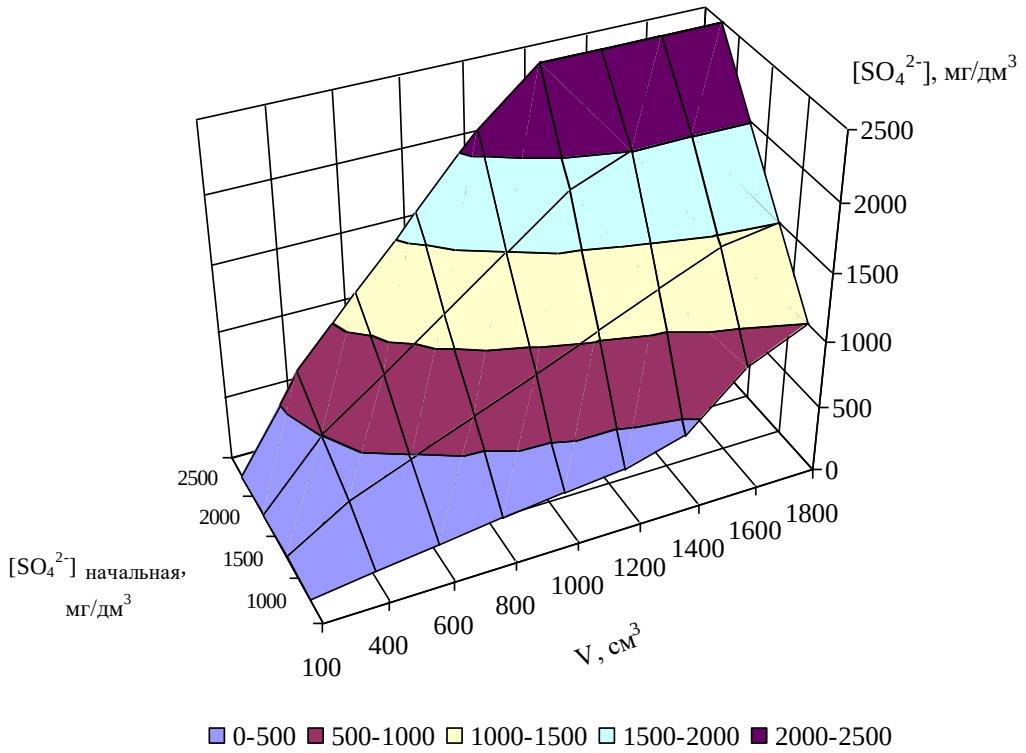


Рис. 5. Графическое изображение результатов ПФП типа 2^2 при адсорбции сульфатов на аниоците АВ-17-8 (V_i=20 см^3) в OH^- -форме (скорость фильтрования 3,18 м/ч)

Используя данные уравнения регрессии довольно легко рассчитать объем пропущенного раствора до исчерпания ёмкости анионита в зависимости от начальной концентрации сульфат-анионов в растворе.

Учитывая высокую емкость анионита по сульфатам в карбонатной форме были рассчитаны уравнения регрессии для зависимости концентраций сульфат ионов в регенерационном растворе от исходной концентрации раствора соды и его удельного расхода.

План–матрица ПФП 2^2 и результаты исследований по десорбции сульфат-ионов из анионита АВ-17-8 растворами соды приведены в таблице 5.

Таблица 5 *– План–матрица ПФП 2^2 и результаты исследований по десорбции сульфат-ионов из анионита АВ-17-8 растворами соды*

№ п/п	Кодовые значения факторов		Натуральные значения факторов		Значения параметра оценки
					Концентрация сульфатов, мг/дм^3
	X_1	X_2	$C_н(Na_2CO_3)$, %	V, мл	Y
1	+1	+1	20	280	42,02
2	-1	-1	5	40	7790,36
3	-1	+1	5	280	1652,50
4	+1	-1	20	40	17941,45

В результате соответствующих расчетов было получено уравнение регрессии:

$$Y = 6856,58 + 2135,15 \cdot X_1 - 6009,32 \cdot X_2 - 2940,39 \cdot X_1 \cdot X_2$$

и после замены в полученных уравнениях кодовых значений натуральными, получили уравнение регрессии в натуральном виде:

$$X_1 = \frac{C_{Na_2CO_3} - 12,5}{7,5};\ X_2 = \frac{V - 160}{120};$$

$$Y = 4770 + 807,41 \cdot C_{Na_2CO_3} - 9,2 \cdot V - 3,27 \cdot C_{Na_2CO_3} \cdot V$$

Полученная зависимость представлена на

рисунке 6 в виде площади, на которой лежит решение приведенного уравнения.

Анализ представленного графика показывает, что экспериментальные точки, использованные при расчете уравнения регрессии, находятся на построенных площадях решений, что свидетельствует об адекватности использованного уравнения. Как видно из рисунка 6, эффективность процесса регенерации при концентрациях соды 5–20 % мало зависит от концентрации реагента, а больше зависит от удельного расхода его раствора. Тем не менее, полученные уравнения регрессии позволяют рассчитать количество десорбированных сульфат-анионов объемом регенерационного раствора в зависимости от концентрации раствора соды.

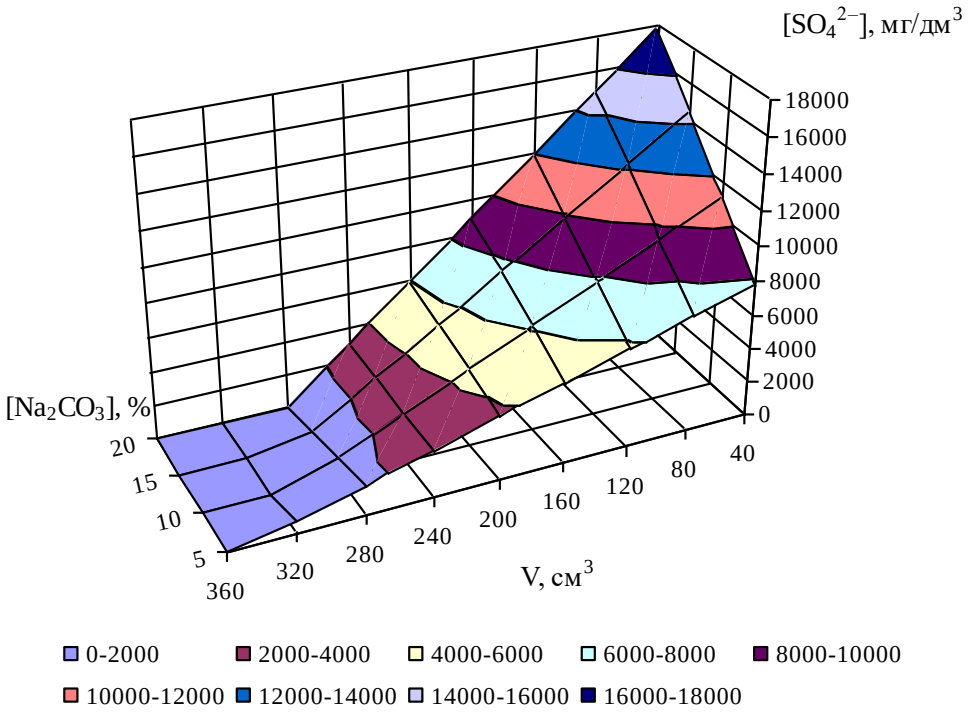


Рис. 6. Графическое изображение результатов ПФП типа 2^2 десорбции сульфатов при пропускании через анионит АВ-17-8 в SO_4^{2-} -форме (V_i=20 см^3) раствора Na_2CO_3

Заключение

Таким образом, в работе изучены процессы сорбции сульфат-анионов на аниоците АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах. Показано, что емкость ионита выше в CO_3^{2-} -форме. Определена эффективность регенерации ионита в SO_4^{2-} -форме растворами щелочи и соды. Показано, что эффективность процесса при концентрациях щелочи 4–10 % и соды 5–20 % мало зависит от концентрации реагента, а больше зависит от скорости фильтрования и удельного расхода его раствора. При больших расходах регенерационных растворов можно достичь полного восстановления обменной емкости ионита.

В целом, приведенные данные говорят о том, что анионит АВ-17-8 в OH^- -форме можно использовать для ионообменной очистки воды от сульфатов с одновременным умягчением воды. Это допустимо для технических вод, которые используются в промышленности. В отдельных случаях необходима корректировка pH воды.

Рассчитаны уравнения регрессии для зависимости остаточных концентраций сульфат-ионов в воде от начальной концентрации сульфатов и объема пропущенного раствора и уравнения регрессии для зависимости концентраций сульфат ионов в регенерационном растворе от исходной концентрации раствора соды и его удельного расхода.

Список литературы

1. Милованов Л.В. Очистка и использование сточных вод предприятий цветной металургии / Милованов Л.В. – М: Металлургия, 1971. – 384 с.
2. Кубасов В.Л. Схема очистки воды от ионов суль-

фатов / В.Л. Кубасов, В.Б. Чинкин // Цветная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 26–27.
3. Сальникова Е.О. Очистка сточных вод от сульфата кальция методом химического осаждения / Е.О. Сальникова, О.Г. Передерий, В.В. Пушкарев // ЖПХ. – 1979. – Т. 52. – №. 6. – С. 1266–1270.
4. Сальникова Е.О. Выбор осадителя при очистке сточных вод от сульфата кальция / Е.О. Сальникова, О.Г. Передерий, В.В. Пушкарев // Цветные металлы. – 1979. – № 9. – С. 41–43.
5. Лебедев В.Н. Десульфатация стоков химической очистки бадделеитового концентрата Ковдоровского ГОКА / В.Н. Лебедев, Э.П. Локшин, И.С. Бармин // Обогащение руд. – 2007. – № 3. – С. 42–44.
6. Qinghua Zhang. Numerical simulation of barium sulfate precipitation process in a continuous stirred tank with multiple-time-scale turbulent mixer model. [Численное моделирование процесса осаждения сульфата бария в мешалке непрерывного действия при помощи модели турбулентного смесителя с множеством временных масштабов] / Zhang Qinghua, Mao Zai-Sha, Yang Chao, Zhao Chengjun // Ind. and Eng. Chem. Res. –2009. – Т. 48, № 1. – С. 424–429.
7. Тюрикова А.А. Физико-химическое обоснование процессов очистки водных растворов от сульфат-ионов / А.А. Тюрикова, В.В. Шмелева, С.В. Смирнов, Г.В. Киселева // Экология и научно-технический прогресс: Материалы 3 Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Пермь, 2005, Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. – 2005. – С. 96–97.
8. Кагановский Л.А. Справочник по свойствам, методам анализа и очистки воды / Л.А. Кагановский, М.А. Шевченко. – К.: Наукова думка, 1980. – Т.1. – 680 с.
9. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента / Асатурян В.И. – М.: Радио и связь, 1983 – 248 с.

References

1. Milovanov L.V. Ochistka i ispol'zovaniye stochnykh vod predpriyatiy tsvetnoy metalurgii [Purification and use of waste water from non-ferrous metallurgy enterprises], Moscow, Metallurgy, 1971, 384 p.
2. Kubasov V.L., CHinkin V.B. *Skhema ochistki vody ot ionov sul'fatov* [Scheme of water purification from sulfate ions], Cvetnaya metallurgiya, 2010, No 3, pp. 26–27.
3. Sal'nikova E.O., Perederij O.G., Pushkarev V.V. *Ochistka stochnyh vod ot sul'fata kal'ciya metodom himicheskogo osazhdeniya* [Purification of waste water from calcium sulfate by chemical precipitation], ZHPH, 1979, Vol. 52, No. 6, pp. 1266–1270.
4. Sal'nikova E.O., Perederij O.G., Pushkarev V.V. *Vybor osaditelya pri ochistke stochnyh vod ot sul'fata kal'ciya* [The choice of a precipitant in wastewater treatment from calcium sulfate], Cvetnye metally, 1979, No 9, pp. 41–43.
5. Lebedev V.N., Lokshin E.P., Barmin I.S. *Desul'fataciya stokov himicheskoj ochistki baddeleitovogo koncentrata Kovdorovskogo GOKa* [Desulfation of effluents from chemical treatment of baddeleyite concentrate from Kovdorovsky MPP], Obogashchenie rud, 2007, No 3, pp. 42–44.
6. Qinghua Zh., Zai-Sha M., Chao Ya., Chengjun Zh. Numerical simulation of barium sulfate precipitation process in a continuous stirred tank with multiple-time-scale turbulent mixer model. Ind. and Eng. Chem. Res, 2009, Vol. 48, No 1, pp. 424–429.
7. Tyurikova A.A., Shmeleva V.V., Smirnov S.V., Kiseleva G.V. *Fiziko-himicheskoe obosnovanie processov ochistki vodnyh rastvorov ot sul'fat-ionov* [Physicochemical substantiation of the processes of purification of aqueous solutions from sulfate ions], Ekologiya i nauchno-tekhnicheskij progress: Materialy 3 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Perm', 2005, Perm': Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2005, pp. 96–97.
8. Kaganovskij L.A., Shevchenko M.A.. *Spravochnik po svojstvam, metodam analiza i ochistki vody* [Handbook of properties, methods of analysis and water purification], Kiev, Naukova dumka, 1980, Vol. 1, 680 p.
9. Asaturyan V.I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta* [Experiment design theory], Moscow, Radio i svyaz', 1983, 248 p.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 6 № 4

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 6 No 4

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

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

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

Подписано к печати 22.12.2020. Изд. № 50/20. Зак. 35/20. Тираж 65 экз.
Объем 20,5 п.л. Усл. печ. л. 19,06. Уч.-изд. л. 20,09. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»