ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ЭНЕРГЕТИКА
МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭЭМ – 2014

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
I МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

В трех частях
Часть 2. Секция ЭНЕРГЕТИКА

г. Новосибирск, 2–6 декабря, 2014 г.

ELECTRICAL ENGINEERING. ENERGY
MECHANICAL ENGINEERING

EEM – 2014

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
OF YOUNG SCIENTISTS

In 3 Sections
Section 2

Novosibirsk, December 2–6, 2014

НОВОСИБИРСК
2014

УДК 621.3+621.31+621](063)
Э 455

Организаторы:
Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ);
Новосибирский государственный технический университет;
Межвузовский центр содействия научной
и инновационной деятельности студентов и молодых ученых
Новосибирской области

Organizers:
Russian Foundation for Basic Research (RFBR);
Novosibirsk State Technical University;
Interuniversity Centre for the Promotion of research
and innovation activities of students and young scientists
of the Novosibirsk region

Э 455 **Электротехника. Энергетика. Машиностроение**: в 3 ч. : сборник научных трудов I международной научной конференции молодых ученых / коллектив авторов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014.

ISBN 978-5-7782-2543-5

Ч. 2. Секция «Энергетика» / коллектив авторов. – 287 с.

ISBN 978-5-7782-2545-9 (ч. 2)

Председатель канд. техн. наук *Ю.М. Сидоркин*

Chairman of the Section PhD *Yu.M. Sidorkin*

Секретарь секции канд. техн. наук *А.В. Белоглазов*

Secretary of the Section PhD *A.V. Beloglazov*

УДК 621.3+621.31+621](063)

ISBN 978-5-7782-2545-9 (ч. 2)
ISBN 978-5-7782-2543-5

© Коллектив авторов, 2014
© Новосибирский государственный технический университет, 2014

ПРОГРАММНЫЙ
И ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТЫ

Председатель программного и организационного комитетов

Пустовой Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, ректор НГТУ

Заместители председателя

Вострецов Алексей Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе НГТУ

Батаев Анатолий Андреевич, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе НГТУ

Гурова Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов, директор Центра научно-технической работы студентов, директор АНО «Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых»

Программный комитет

Буров Владимир Григорьевич, доктор технических наук, профессор, декан механико-технологического факультета

Сидоркин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета энергетики

Щуров Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, декан факультета мехатроники и автоматизации, заведующий кафедрой электротехнических комплексов

Организационный комитет

Алиферов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электротехнологических установок

Белоглазов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций

Гуров Михаил Геннадьевич, инженер ОАО «Швабе-Приборы» (ЦКБ «Точприбор»)

Дымов Илья Сергеевич, заместитель руководителя Студенческого научного общества НГТУ

Иванов Владлен Владимирович, руководитель Студенческого научного общества НГТУ

Ленивцева Ольга Геннадьевна, аспирант кафедры материаловедения в машиностроении

Макаров Станислав Владимирович, ассистент кафедры электротехнических комплексов

Стрельникова Дарья Максимовна, инженер Центра научно-технической работы студентов

Федорова Наталья Борисовна, ведущий инженер-программист Центра научно-технической работы студентов

Секция
ЭНЕРГЕТИКА

Подсекция 1. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ПАВЛОДАРСКОЙ ТЭЦ-1

С.М. Айтказина, Д.А. Строганов, А.К. Тлеулесов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, kafedra.ipe@mail.ru

В работе разработана рецептура изготовления тяжелых и легких бетонов с использованием золошлаковых отходов Павлодарской тепловой электростанции № 1. Исследования показали, что эти отходы могут использоваться вместо песка, как наполнитель. Если используется до 10 % золы, то получается тяжелый бетон. Если используется от 10 до 40 %, то получается легкий бетон.

In this paper we developed a formulation manufacturing heavy and light concrete with slag waste Pavlodar thermal power plant number 1. Studies have shown that these wastes can be used instead of sand as filler. If you are using up to 10% ash, it turns heavy concrete. If you are using from 10 to 40%, it turns out lightweight concrete.

На Павлодарской ТЭЦ-1 ежегодно сжигаются миллионы тонн угля. Процесс сжигания сопровождается образованием золошлаковых отходов (ЗШО), которые удаляются на золоотвал. При этом возникают экологические проблемы, связанные с отчуждением под золоотвал дорогих городских земель, с пылением при ветре, с загрязнением грунтовых вод и др. Анализ литературных источников показывает, что в

настоящее время разработано большое количество технологий использования ЗШО в строительстве [1].

В работе ставилась задача с учетом химического состава ЗШО Павлодарской ТЭЦ-1 разработать рецептуру их использования в технологиях изготовления строительных материалов.

Проектирование состава стандартных образцов бетона велось расчетно-экспериментальным методом. Расчет состава проводился для декоративного облицовочного камня, изготавливаемого вибролитьевым способом.

Водоцементное отношение (В/Ц) принималось равным 0,4 от массовых составляющих цемента и ЗШО, а в качестве мелкого заполнителя использовался промытый обской речной песок с крупностью 5…10 мм.

В табл. 1 приведены некоторые составы бетонных смесей

Таблица 1

Составы образцов бетона с использованием ЗШО Павлодарской ТЭЦ-1

Марка образца	Массовая составляющая ЗШО, %	Массовая составляющая цемента, %	Массовая составляющая песка, %
Z0040	0	40	60
Z1035	10	35	55
Z2030	20	30	50
Z3025	30	25	45
Z4020	40	20	40

Базовый образец бетона Z0040 по сухому компоненту включал в себя 40 % цемента и 60 % песка. Сухие компоненты перемешивались между собой, далее добавлялась вода. Введение ЗШО проводилось замещением песка и портландцемента с шагом 5 %, при этом 2,5 % приходилось на долю песка и 2,5 % – на долю замещаемого портландцемента.

Полученные образцы исследовались на плотность, истираемость и прочность на сжатие.

Результаты исследований представлены в табл. 2–4.

Таблица 2

Плотность образцов бетона в зависимости от массы ЗШО (ГОСТ 12730.1-78)

Марка образца	Массовая составляющая ЗШО, %	Массовая составляющая цемента, %	Плотность бетона, г/см^3	Класс бетона
Z0040	0	40	2,09	Тяжелый бетон
Z1035	10	35	1,90	
Z2030	20	30	1,76	Легкий бетон
Z3025	30	25	1,64	
Z4020	40	20	1,59	

Таблица 3

Истираемость образцов бетона в зависимости от массы ЗШО (ГОСТ-13087-81)

Марка образца	Массовая составляющая ЗШО, %	Истираемость, г/см^2
Z0040	0	0,09
Z1035	10	0,32
Z2030	20	0,27
Z3025	30	0,28
Z4020	40	0,47

Таблица 4

Прочность на сжатие образцов бетона в зависимости от массы ЗШО (ГОСТ-10180-90)

Марка образца	Прочность, кг/см^2	Прочность, МПа	Класс бетона по прочности	Марка бетона по прочности
Z0040	243,8	23,9	B23	M300
Z1035	175,0	17,2	B17	M200
Z2030	163,3	16,0	B16	M200
Z3025	88,3	8,7	B8	M100
Z4020	36,1	3,5	B3,5	M50

Таким образом, установлено, что при увеличении процентного значения массовой составляющей ЗШО в бетонной смеси характеристики

тяжелого бетона – прочность, истираемость – снижаются. В то же время в большинстве случаев они удовлетворяют нормативным требованиям к некоторым маркам как тяжелых, так и легких бетонов.

Поэтому представляется целесообразным и с экономической, и с экологической точек зрения использовать золошлаковые отходы Павлодарской ТЭЦ-1 в технологиях изготовления строительных материалов и изделий

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гусев К.П., Ларичкин В.В., Ларичкина Н.И.* Перспективы использования золошлаковых отходов теплоэнергетики Сибири в производстве тротуарного камня // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1–8. – С. 2058–2061.

СТЕНД НА БАЗЕ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ И ПРОВЕРКИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ

М.В. Андреев, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, andreevmv@tpu.ru

В данном докладе речь пойдет о создании стенда для проверки и настройки релейной защиты (РЗ), противоаварийной автоматики (ПА) и систем управления (СУ) на базе гибридного моделирующего комплекса реального времени, а также о возможностях и перспективах его применения. Данный комплекс обладает физическими выходами, что позволяет при использовании усилителей токов и напряжений напрямую подключать оборудование РЗ, ПА и СУ и проводить проверку данных устройств в замкнутом цикле.

In this article we will focus on creating of testbed based on hybrid real-time power system simulator (HRTSim) for setting up and testing of relay protection (RP), automatic (AS) and control systems (CS), as well as the opportunities and prospects of its application. The simulator has physical outputs, which allows using it for close-loop testing of RP, AS and CS. Physical currents and voltages generated in the simulator during a simulation process can be transmitted to the analog inputs of tested device by means of external amplifiers.

Все основное оборудование электроэнергетических систем (ЭЭС) непрерывно взаимосвязано единым процессом производства, передачи,

распределения и потребления электроэнергии. При этом необоснованное отключение или выход из строя обозначенных устройств связаны, как правило, со значительным технологическим и экономическим ущербом. Минимизировать эти последствия позволяет правильное действие релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) энергосистем.

Между тем, согласно обобщенной статистике аварийности в российских и зарубежных ЭЭС, примерно 25 % тяжелых аварий являются следствием неправильных действий РЗ и ПА [1], причем, в 50…70 % случаев они приводят к развитию тяжелых системных аварий. Кроме того, по разным данным, примерно 30…40 % неправильных действий связаны с неисправностью самих устройств РЗ (ошибки в аппаратной части, в логической части или алгоритмах); 15…20 % – с неправильной настройкой.

Основные причины таких ситуаций:

- несоответствие настроек РЗ реальным условиям их функционирования, которое, принимая во внимание применяемые методики, определяется двумя основными факторами: а) использованием при расчете уставок недостаточно полной и достоверной информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС; б) неадекватным учетом погрешностей, формируемых конкретными реализациями РЗ и измерительными трансформаторами (ИТ);
- малая эффективность тестовых проверок программно-аппаратной реализации РЗ.

Для устранения обозначенных причин неправильных действий РЗ и ПА предлагается использовать разработанную в ТПУ гибридную многопроцессорную программно-техническую систему – Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) [2–4].

В отличие от существующих средств, ВМК РВ ЭЭС полностью исключает необходимость декомпозиции режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС, а также присущих существующим средствам моделирования упрощений и ограничений и позволяет осуществлять непрерывное, полное и достоверное моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале совокупности процессов, протекающих в оборудовании, на электрических станциях, электрических сетях, синхронных и асинхронных двигателях, обобщенных нагрузках, устройствах и системах FACTS, с учетом функционирования средств РЗ, технологической и ПА, включая процессы в измерительных трансформа-

торах, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы.

Гибридный комплекс ВМК РВ ЭЭС позволяет реализовать проверку устройств РЗ и ПА в замкнутом цикле [5], а отсутствие ограничений на размер моделируемой ЭЭС позволяет сократить количество всевозможных эквивалентирований и воссоздать максимально близкие к реальным условия проверки и настройки любых устройств РЗ и ПА. Это, как уже отмечалось, особенно актуально для разработки и проверки алгоритмов распределенных устройств защиты и управления.

Для лабораторных тестовых проверок программно-аппаратных реализаций РЗ и некоторых ПА на работоспособность разработан вариант гибридного комплекса, на основе которого планируется создать специальный стенд.

В заключение хочется подчеркнуть, что ВМК РВ ЭЭС позволяет в реальном времени получать полную и достоверную информацию о процессах в ЭЭС, которая может быть использована для адекватной настройки устройств РЗ и ПА. Уникальные характеристики комплекса, а также возможность проверки РЗ и ПА в замкнутом цикле позволяют эффективно использовать его при разработке и тестировании программно-аппаратных реализаций любых устройств защиты и автоматики. В России данный комплекс не имеет аналогов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуревич В.И.* Проблемы оценки надежности релейной защиты // Электричество. – 2011. – № 2. – С. 28–31.

2. *Гусев А.С.* Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия Вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9.10/1. – С. 164–170.

3. *Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О.* Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 10–13.

4. *Боровиков Ю.С., Прохоров А.В., Сулайманов А.О.* Всережимный моделирующий комплекс реального времени и его использование для решения задач управления в ИЭС ААС // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 01 (06). – С. 54–59.

5. *Urban Rudež, Peter Osredkar, Rafael Mihalič.* Overcurrent protection-relay testing with Real-time digital simulator hardware // Elektrotehniški Vestnik. – 2012. – Vol. 79, N 1–2. – P. 25–30 (English edition).

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В СИСТЕМАХ ТИПА МИКРОГРИД

Д.В. Армеев, А.Ю. Арестова, Я.А. Абрамова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, ya.abramova1991@gmail.com

В данной статье представлены три метода ресинхронизации микрогрида с сетью: без управляющих воздействий, с автоматической частотной разгрузкой, с использованием силовой электроники.

This paper presents three control method to be used to reconnect Microgrid with utility: 1. without any emergency control actions, 2. frequency load shedding, 3. frequency control method with using power electronics.

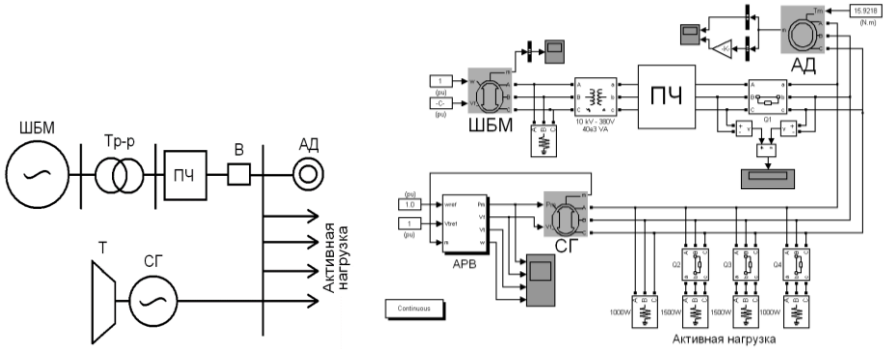
Микрогрид является новой структурой производства электроэнергии и обладает рядом важных преимуществ [1]. Это достигается путем создания систем децентрализованного управления с возможностью выделения при необходимости микрогридов на изолированную работу и обратную синхронизацию с большой энергосистемой в автоматическом режиме. Такой изолированный режим микрогрида в иностранной печати называется Islanding [2, 3].

В данной статье авторами рассмотрены несколько стратегий функционирования микрогрид-систем при перерыве питания и предложен способ ресинхронизации посредством метода управления частотой с помощью силовой электроники (преобразователя частоты).

Стратегии функционирования микрогрида рассмотрены на примере следующей модели. Схема состоит из источника напряжения, моделирующего работу большой энергосистемы (ШБМ); элемента распределенной генерации (СГ 5000 Вт); асинхронной нагрузки (АД 3000 Вт); коммутируемой активной нагрузки суммарной мощностью 5000 Вт. Для выполнения опытов по управлению частотой между энергосистемой и микрогридом установлен преобразователь частоты (ПЧ). Моделирование выполнено в среде Matlab, приложении Simulink.

В качестве аварийного возмущения принят перерыв питания от энергосистемы. В ходе выполнения эксперимента было изучено влияние длительности перерыва питания на характер переходного процесса и устойчивость параллельной работы микрогрида с большой энергосистемой. При существующих технических и технологических решениях, в том числе технологиях релейной защиты и автоматики для данного

класса напряжения сети, длительность работы АВР и АПВ лежит в диапазоне от 0,4 до 4 с.



а *б*

Рис. 1. Модель микрогрид-системы:

а – принципиальная схема; *б* – модель Matlab

В результате моделирования с применением той или иной стратегии необходимо было определить минимальное время успешной ресинхронизации микрогрида с большой энергосистемой.

В соответствии с первой стратегией предполагалось, что включение микрогрида на параллельную работу происходит сразу после восстановления напряжения на шинах энергосистемы. Это можно рассмотреть как результат работы несинхронного автоматического повторного включения (АПВ). На рис. 2 представлены результаты расчета и графики переходных процессов в случае максимальной длительности перерыва питания микрогрида 0,4 с.

В случае значительного дефицита генерирующей мощности возникает необходимость применения дополнительных мер, одной из которых является автоматическая частотная разгрузка (АЧР).

В результате минимально возможное время, через которое микрогрид включается в сеть, составляет 3 с при принятых схемных параметрах. Еще 3 с требуется ЧАПВ для включения отключенной нагрузки. Окончание переходных процессов и полный возврат схемы в исходное состояние возможен через 7 с от момента потери питания.

В качестве альтернативного метода авторами предложен метод управления частотой для ресинхронизации с привлечением средств силовой электроники – преобразователя частоты (ПЧ).

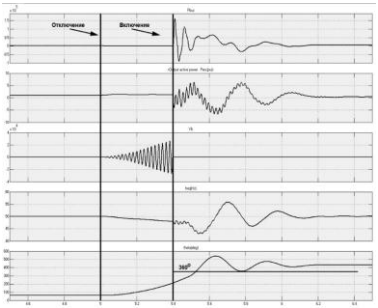


Рис. 2. Переходный процесс микрогрида без применения мер ресинхронизации

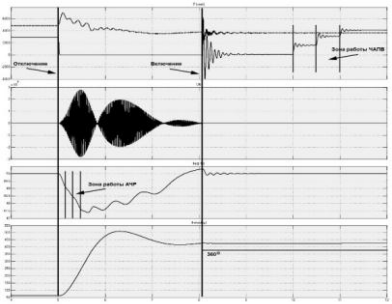


Рис. 3. Переходный процесс микрогрида с применением АЧР

Традиционно ПЧ применяют для управления режимами асинхронной нагрузки в статических режимах [4], однако опыт показал возможность применения ПЧ и достоинства его использования в системах микрогрид.

Наличие ПЧ (между большой энергосистемой и микрогридом) позволяет мгновенно снизить частоту и напряжение питающей сети до соответствующих значений на шинах микрогрида, в результате чего выполняются основные условия синхронизации и за максимально короткий срок происходит ресинхронизация микрогрида. Далее остается только вернуть частоту ПЧ до номинального значения и тем самым восстановить исходный режим работы сети. Переходный процесс показан на рис. 4, время восстановления нормального режима 0,56 с.

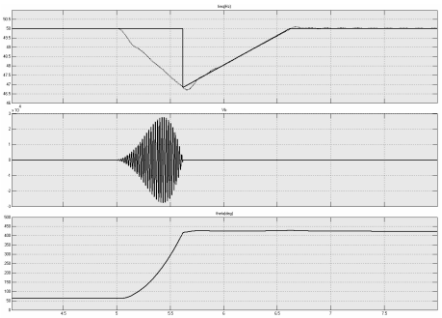


Рис. 4. Переходный процесс микрогрида с применением метода управления частотой

Проведенные исследования в области применения ПЧ показали принципиальную возможность использования подобных устройств и метода ресинхронизации с его участием для управления микрогридами во всем диапазоне длительности перерыва питания (от 0.4 с до 4 с).

ЛИТЕРАТУРА

1. Integration of distributed energy resources – The CERTS MicroGrid concept / CERTS, Submitted to the U.S. Department of Energy, April 2002. – Berkeley, California, 2002. – 32 p.
2. *Piagi P., Lasseter R.H.* Autonomous control of microgrids // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – Montreal, 18–22 June 2006. – P. 1–8. – doi: 10.1109/PES.2006.1708993.
3. *Salam A.A., Mohamed A., Hannan M.A.* Technical challenges on Microgrids // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2008. – Vol. 3, N 6. – P. 64–69.
4. *Bulgakov A.A.* Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami [Frequency control of asynchronous motor]. – 3rd revised ed. – Moscow: Energoizdat Publ., 1982. – 218 p.

УЛУЧШЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ FACTS И HVDC СИСТЕМ В ГИБРИДНЫХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, Р.А. Уфа

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, hecn@tpu.ru

Данная работы посвящена моделированию преобразователя напряжения (ПН) на основе технологий гибких линий электропередачи переменного тока (FACTS Flexible Alternative Current Transmission Systems) и высоковольтной передачи энергии постоянным током (HVDC). Основное внимание уделяется концепции гибридного подхода моделирования в реальном времени, которая обеспечивает адекватное и всережимное моделирование электроэнергетических систем (ЭЭС), содержащих FACTS и HVDC. Результаты экспериментальных исследований подтверждают необходимый уровень адекватного моделирования коммутационных процессов и пригодности представленной концепции и инструмента моделирования для эффективного решения научно-исследовательских задач, связанных с использованием HVDC и FACTS устройств в ЭЭС.

The present paper focuses on simulation of VSC (voltage source converter) based on FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) and HVDC (High Voltage Direct Current) transmission technologies. Particular attention is paid to hybrid real time simulation approach which provides adequate and comprehensive modeling of electric power systems (EPS), containing FACTS and HVDC. The results of experimental research support the necessary level of adequate simulation of commutation processes and suitability presented concept and simulation tools for effective solution of research and development tasks of effective use of HVDC and FACTS devices in EPS.

Одной из тенденций развития и совершенствования электроэнергетических систем (ЭЭС) является внедрение технологий высоковольтной передачи энергии постоянным током (HVDC) и гибких линий электропередачи переменного тока (FACTS – Flexible Alternative Current Transmission Systems) [1, 2].

Однако масштабное внедрение данный устройств связано с необходимостью решения ряда комплексных задач, направленных на обеспечение надежности и устойчивости новых HVDC и HVAC (системы высоковольтной передачи энергии переменным током) систем, разработку их систем управления, защиты и автоматики, оценку взаимного влияния HVDC и традиционных HVAC систем, а также анализ взаимодействия их систем релейной защиты и управления.

Невозможность проведения натурных экспериментов определяет растущую потребность в системах моделирования, соответствующих высоким требованиям со стороны поставленных задач.

Для обеспечения адекватного и всережимного моделирования процессов и режимов работы трехфазных реальных ЭЭС, содержащих HVDC и FACTS, средства моделирования должны удовлетворять следующим требованиям [3]:

- адекватное моделирование всех процессов и режимов трехфазных ЭЭС в целом без декомпозиции и ограничения на их продолжительность;
- непрерывное методично точное решение в режиме реального времени и на неограниченном диапазоне с гарантированной точностью жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого порядка, адекватно и точно описывающих полный спектр различных процессов в энергетическом оборудовании и энергосистеме в целом;
- взаимосвязь с различными внешними программно-техническими средствами: оперативные информационные системы, системы SCADA и т. д.

Для соответствия этим требованиям необходим поиск новых технологий и инженерных решений, обеспечивающих такие ключевые характеристики системы моделирования, как реальное время, отсутствие декомпозиции процессов, неограниченная масштабируемость модели и др.

В данной статье представлены концепция и средства гибридного моделирования, основанные на использовании трех подходов к построению модели ЭЭС: аналогового, цифрового и физического, каждый из которых обеспечивает достижение максимальных свойств в решении отдельных подзадач. В результате объединения указанных подходов был создан всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС, отвечающий следующей совокупности требований: отсутствие декомпозиции процессов, ограничений на размер моделируемой ЭЭС и дифференциальный порядок моделей оборудования, на длительность моделируемых процессов, а также обеспечение реального времени моделирования. Универсальность концепции и модульность структуры средств гибридного моделирования, подробно описанных в [4], позволяет выполнить разработку модели любого элемента ЭЭС, в том числе HVDC и FACTS устройств, и интегрировать ее в ВМК РВ ЭЭС.

В рамках данной работы представлены только фрагменты результатов исследований и моделирования преобразователя напряжения (VSC – Voltage Source Converter) HVDC представлены в формате этой работы.

Рассмотренные концепция и средства моделирования силовых полупроводниковых ключей, соответственно устройств FACTS, HVDC и также ЭЭС в целом, позволяют достаточно полно и достоверно воспроизводить в реальном времени и на неограниченном интервале единый непрерывный спектр всевозможных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и трехфазных реальных ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. The role of facts and HVDC in the future paneuropean transmission system development / A. L'Abbate, G. Migliavacca, U. Häger, C. Rehtanz, S. Rüberg, H. Ferreira, G. Fulli, A. Purvins // IEEE 9th IET International conference on AC and DC Power Transmission. – London, Great Britain, 2010. – P. 1–8.

2. *Snider L., Belanger J., Nanjundaiah G.* Today’s power system simulation challenge: High-performance, scalable, upgradable and affordable COTS-based real-time digital simulators // International conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PADES) & 2010 Power. – India, Delhi, 2010. – P. 1–10.

3. Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements / Y. Zhang, A.M. Gole, W. Wu, B. Zhang, H. Sun // IEEE Transaction on Power System. – 2013. – Vol. 28, iss. 1. – P. 357–366.

4. Development of hybrid models of high voltage direct current systems for comprehensive analysis of large power systems / A. Prokhorov, A. Vasilev, N. Ruban, R. Ufa // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2014. – Vol. 324 (4). – P. 123–131.

КОНСТРУКТОР ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ SIMENS 3AP1 DT 145kV

О.С. Возисова, А.О. Егоров, А.В. Трембач

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, vozisova_olya@mail.ru

Технология печати 3D обеспечивает новые системы энергетического оборудования, основанного на методах промышленного проектирования. В статье рассматривается новый конструктор выключателя Simens 3AP1 DT 145kV.

3D printing techniques provides new power systems equipment industrial designing methods. The new constructor Siemens 3AP1 DT 145kV circuit breaker is considered in the article.

Обзор работы. В настоящее время обучение будущих специалистов электроэнергетической отрасли отличается неэффективностью при значительных финансовых и временных затратах. Доступ к реальным объектам и оборудованию энергосистемы имеет ограниченный круг людей: персонал предприятия, обслуживающий энергообъект. Основное же обучение методам проектирования, монтажа и эксплуатации выполняется по технологии плоских чертежей на бумажном или электронном носителе. При таких условиях отсутствует возможность донесения знаний о внешнем виде и устройстве оборудования, принципах его действия, назначения, оперативного управления, проблемах монтажа, правилах сборки и технической эксплуатации.

С сентября 2013 г. кафедра АЭС УралЭНИН УрФУ (г. Екатеринбург) реализует долгосрочный проект «Конструктор электроэнергетических систем». Одной из последних работ стало создание уменьшенной модели выключателя Siemens 3AP1 DT 145. Данная модель пред-

ставляет собой конструктор выключателя, выполненного в масштабе 1/35 кВ. Этот исследовательский проект был поддержан УрФУ в рамках программы развития «Молодые ученые УрФУ».

Конструктор выключателя выполняется на основе методов и технологий масштабного моделирования с применением новейших промышленных систем объемного проектирования, 3D принтеров, обрабатывающих станков с числовым программным управлением и микропроцессорной техники. Такой подход к производственному процессу позволяет производить уменьшенные копии (масштабные модели) силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем и обеспечить их высокую внешнюю точность и идентичность (копийность). Очевидным преимуществом масштабного моделирования является обеспечение наглядности изучаемого или управляемого объекта.

Малые размеры оборудования, собираемого из такого конструктора, позволяют эффективно решать задачи обучения студентов и персонала на предприятии, проектирования и инжиниринга и, что немаловажно, сделать обучение увлекательным, познавательным, интересным, интерактивным, дистанционным и ввести его в программу обучения на этапах довузовского образования, что существенно повышает интеллектуальные способности будущих инженеров и конструкторов, необходимых для промышленности и энергетики сегодня в России. Очевидно, что такое собранное оборудование, не находящееся под опасным напряжением, совершенно безопасно для человека, так как отсутствует риск поражения электрическим током.

В ходе научно-технических разработок нами определено несколько производственных и технологических этапов, позволяющих организовать серийное производство масштабных моделей оборудования.

Среди технологических и производственных этапов можно выделить основные:

– проектирование в программном комплексе;

– формирование матрицы спроектированного оборудования (позитив);

– изготовление пресс-форм для серийного производства (негатив);

– серийное производство позитива на основе негатива;

– сборка, грунтовка, окраска, тонировка.

Для проектирования на ранних стадиях используются компьютеры с программами, которые позволяют выполнять объемные чертежи. Для производства матриц-позитивов используются экструдеры (термопласт-

автоматы), позволяющие осуществлять литье различных материалов как под атмосферным давлением, так и в условиях высокого и низкого вакуума.

Создание выключателя. Проект создания масштабной модели выключателя Siemens 3AP1 DT 145kV был реализован студентом-конструктором 5-го курса Трембачем Антоном Вадимовичем. На создание объемной модели данной марки выключателя в одной из современных CAD программ ему понадобилось 1,5 месяца чистого времени.

Модель выключателя Siemens 3AP1 DT 145kV состоит из 151 детали:

1) вводы выключателя 7×6 деталей для шести отдельных вводов;
2) камеры дугогашения 18×3 деталей на каждую из трех фаз;
3) шкаф управления, состоящий из 16 деталей;
4) металлоконструкция основания выключателя – 34 детали;
5) поворотный механизм дугогасительных камер – 2 детали;
6) элементы крепления поворотного механизма к основанию – 3 детали.

Особенностью данной модели выключателя является, то что все вводы абсолютно идентичны т. е. универсальны и подходят к любому разъему дугогасительной камеры. Таким же образом выполнены и дугогасительные камеры каждой из фаз, они одинаковы и универсальны.

Заключение. Конструктор масштабных моделей силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем создается главным образом для образовательных и инженерных целей. Созданная масштабная модель силового выключателя Siemens 3AP1 DT 145kV имеет масштабы 106×76×116 мм. Такие габариты позволяют детально изучить устройство и особенности сборки энергообъекта, тем самым позволяет подготовить будущих специалистов в области электроэнергетики, начиная с довузовского образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструктор электроэнергетических систем / М.В. Вяткина, А.О. Егоров, С.А. Ерошенко, А.С. Тавлинцев, Е.М. Тренина // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов всероссийской студенческой научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием, г. Екатеринбург, 17–20 дек. 2013 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 59–60.

2. *Егоров А.О., Ерошенко С.А.* Школа умного потребителя (АИИС КУЭ школы) // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов всероссийской студенческой научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием, г. Екатеринбург, 17–20 дек. 2013 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 83–84.

3. *Егоров А.О., Мухлынин Н.Д., Овчинников А.В*. // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов всероссийской студенческой научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Екатеринбург, 17–20 дек. 2013 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 152–154.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СЕВЕРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Ю.М. Денчик, Н.А. Ковалева, А.А. Глотов

Новосибирская государственная академия водного транспорта, г. Новосибирск, nsawt_ese@mail.ru

Статья посвящена исследованию факторов, влияющих на качество функционирования электрических сетей. Данная проблема актуальна в связи с активно развивающимся освоением северных нефтегазовых месторождений Российской Федерации. В работе представлена схема взаимодействия факторов, отображающая общность негативного влияния, и механизм воздействия напряжения обратной последовательности на рецепторы.

This article investigates the factors affecting the quality of the operation of electrical networks. This problem is relevant in connection with the development of the northern oil and gas fields of the Russian Federation. This article presents a scheme of interaction of factors, showing all the negative influence. The mechanism that impacts the negative phase sequence voltage on receptors.

Нарастающие темпы освоения регионов Сибири и Дальнего Востока России обусловливают интенсивную их электрификацию. Влияющим фактором в комплексе предъявляемых требований к надежности и экономичности систем электроснабжения является повышение качества функционирования электрических сетей общего назначения, име-

ющих в основном трехфазное трехпроводное исполнение. При этом под качеством функционирования понимается способность технических средств удовлетворять требованиям эксплуатации (ГОСТ Р 50397-93).

Ежегодно увеличивающееся число приемников электрической энергии, искажающих ее качество, незначительные интегральные показатели сетей общего назначения (полная мощность трехфазного короткого замыкания) и недостаточная долговечность электросетевых конструкций линий электропередачи (опоры воздушных линий, фундаменты, электросетевая арматура и т. д.), работающих в условиях сурового климата, обостряют проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств [1]. Нарушаются нормы технологического расхода электроэнергии на ее транспорт [2]. В электрических сетях общего назначения наблюдается значительная несимметрия трехфазных систем напряжений, которая обусловливает появление кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех (ЭМП) по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности, очень опасных для силового и электронного оборудования.

Основным научным направлением решения проблемы ЭМС технических средств, развитым учеными многих стран мира, является улучшение электромагнитной обстановки (ЭМО). Однако, рассматриваемая проблема многогранна, и одна из научно-технических задач – повышение качества функционирования электрических сетей общего назначения с низкими интегральными характеристиками, работающих в регионах с искажающими нагрузками и суровым климатом, не решена, нет соответствующего стандарта.

Показано, что природно-климатические условия этих регионов, незначительные интегральные характеристики сетей, несимметрия элементов сетей и несимметричные нагрузки являются основными факторами, снижающими качество функционирования линий электропередачи. Разработана схема взаимодействия этих факторов (рис. 1).

Рассмотрена несимметрия трехфазной системы напряжений обратной последовательности как вид искажения. С учетом требований ГОСТ Р 51317.2.5.–2000 (МЭК 6100-2-5-95) определен предмет исследования и обоснован выбор объекта исследования.

Представлен системный анализ качества функционирования электрических сетей общего назначения с несимметричными нагрузками, который позволил выделить объект исследования из сложной иерархической структуры региональной ЭЭС. Сформулирован главный аспект

системного анализа применительно к задачам исследования – обеспечение качественного функционирования электрических сетей общего назначения как рецепторов, реагирующих на кондуктивные низкочастотные ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности в регионах с суровым климатом. Разработана схема механизма воздействия напряжения обратной последовательности в высоковольтной трехфазной сети общего назначения на технические средства (рис. 2).

Рис. 1. Схема взаимодействия влияющих факторов на качество функционирования исследуемой электрической сети

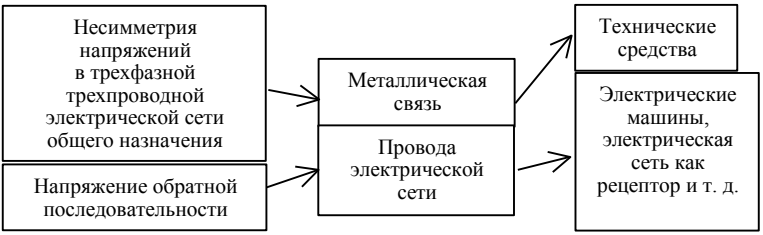


Рис. 2. Схема механизма воздействия напряжения обратной последовательности в высоковольтной трехфазной сети общего назначения на технические средства

Показано, что интенсивность воздействия кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности на технические средства, подключенные к объекту исследования, является высокой, требующей снижения уровня несимметрии напряжений до нормируемых значений.

Представлена концепция взаимодействия влияющих факторов, обусловленных особенностями сурового климата, состоянием опор и фундаментов и спецификой электрической нагрузки интенсивно развивающихся регионов, на качество функционирования электрических сетей общего назначения с низкими интегральными характеристиками, которую раскрывают следующие положения:

– приведена схема взаимодействия факторов, отображающая общность негативного влияния;

– представлен механизм воздействия напряжения обратной последовательности на трехфазную трехпроводную электрическую сеть общего назначения и электрооборудования как рецепторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников; под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова; Новосиб. гос. акад. вод. трансп. – Новосибирск: НГАВТ, 2013. – 559 с.

2. *Иванова Е.В.* Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека; Новосиб. гос. акад. вод. трансп. – Новосибирск: НГАВТ, 2006. – 432 с.

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА-СОВЕТЧИК ДИСПЕТЧЕРА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

А.И. Глущенко, Ю.И. Еременко, М.А. Цуканов

Старооскольский технологический институт (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Старый Оскол,
tsukanov_m_a@mail.ru

Управленческая деятельность в сфере электроснабжения, как правило, базируется на использовании стационарных моделей. При таком подходе принятие управленческих решений в результате произошед-

ших изменений в системе осуществляется с задержкой. Время задержки может быть существенным и зависит от сроков выявления самих изменений и нормативов для различных объектов промышленности. Поэтому разработка автоматизированной системы электроснабжения является в настоящее время актуальной задачей.

Control activities in the field of electricity, as a rule, based on the use of stationary models. With this approach, management decisions as a result of the changes in the system is carried out with a delay. The delay time can be significant , depending on the timing of the changes themselves and identify standards for various industrial facilities . Therefore, development of an automated system and electricity is now an urgent task , which will eliminate the backlog in the volume and level of IT use in the economy, public administration and improve the competitiveness of domestic IT products for the domestic and international markets.

Стратегия оперативного диспетчерского управления энергосистемами заключается в принятии решений по контролю и оптимизации основных показателей системы человеком-оператором. Так как управление производится по модели-пульту, лишь гомоморфно отображающему исходную систему, то значительная часть информации с объектов воспринимается диспетчером системы по телефону. В силу того, что время восприятия информации даже одного характера может меняться в значительных пределах в зависимости от подготовки, усталости, настроения персонала, то достоверность этой информации весьма вариативна [2].

Для повышения эффективности решения этой проблемы предлагается система-советчик на основе мультиагентных технологий (МАТ), которая базируется на комплексе моделей и алгоритмов оптимизации распределения электроэнергии в темпе процесса управления.

Блок принятия решений концептуальной схемы системы-советчика (рис. 1) представлен агентом-супервизором, блок анализа проблем – агентом-анализатором, имитационная модель распределительной сети – агентами-распределителями и агентами-потребителями.

Агент-супервизор – интерфейсный агент, решающий задачу взаимодействия агентов МАС и связи с пользователем. Он выдает отчет по анализу «узких мест» в системе энергоснабжения и варианты их корректировки, формирует задания нижестоящим агентам-распределителям по распределению электроэнергии в соответствии с определенными заданиями.

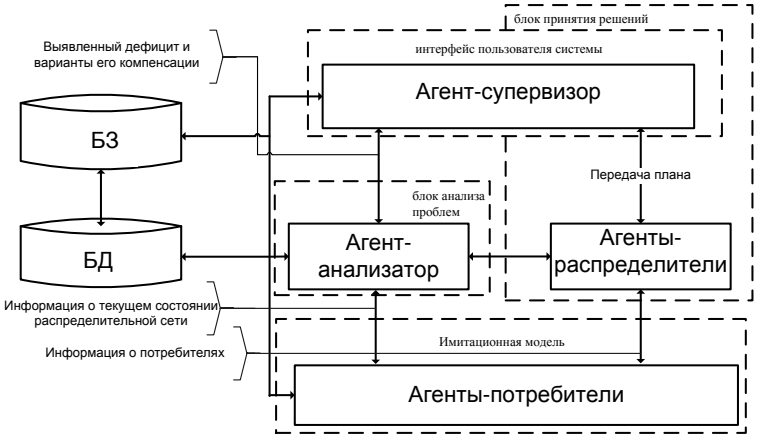


*Рис. 1. С*хема системы-советчика для диспетчера системы управления энергосистемами

Агент-анализатор – гибридный агент, который осуществляет распределение ограниченных энергомощностей энергосистемы в условиях оперативно возникающего дефицита.

Агент-распределитель – партнерский агент, задачей которого является слежение за работой конкретного энергораспределительного агрегата, входящего в состав распределительной сети.

Агент-потребитель – партнерский агент, задачей которого является слежение за потреблением энергоресурса конкретным потребителем.

Координация агентов в системе осуществляется на основе непрямого взаимодействия соответственно распределению функциональных задач МАС.

Супервизор на основе информации о готовности агентов-распределителей и о возникшем дефиците корректирует план распределения электроэнергии и направляет откорректированный план агенту-анализатору для проверки возможности его реализации.

Для формирования и оптимизации плана распределения электроэнергии и внесения в него необходимых корректировок в режиме реального времени предлагается математический аппарат одной из модификаций алгоритма иммунных сетей, обеспечивающего эффективный параллельный поиск оптимального решения на основе принципа клональной селекции, предложенного De Castro [3].

Оптимизация расписания осуществляется путем выбора одного или нескольких распределителей для обслуживания группы потребителей i, минимизирующей суммарные приведенные потери R_{ij}, связанные с отключением (включением) линий, отключением (включением) трансформаторов, переключением на шинах станций и т. д.

$$F = \sum_i \sum_j R_{ij} \to \min . \qquad (1)$$

Алгоритм проверки составленного плана на реализуемость осуществляется с использованием математического аппарата вложенных сетей Петри.

В случае, если план признан невыполнимым, на основе недоступных позиций или неосуществимых переходов базой знаний формируется набор рекомендуемых корректировок с целью устранения дефицита электроэнергии при перепланировке плана агентом-реализатором.

Для имитационного моделирования отдельных моделей распределителей и потребителей предлагается агрегативная модель Н.П. Бусленко [1].

Таким образом, обеспечивается эффективное выполнение плана по обеспечению потребителей энергоресурсом с высокой эффективностью за счет упреждения нерациональных, а порой и ошибочных действий оперативно-диспетчерского персонала в процессе управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968. – 355 с.

2. *Меркурьев Г.В.* Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами: метод. пособие / Центр подготовки кадров энергетики. – СПб., 2002. – 116 с.

3. *De Castro L.N., Von Zuben F.J.* The Clonal selection algorithm with engineering applications // Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO). – Las Vegas, USA, 2000. – Vol. 2000a. – P. 36–42.

НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ КАК СРЕДСТВО ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

О.И. Горте, М.С. Хмелик

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, ogorte@gmail.com

В работе предложена упрощенная модель маховикового накопителя энергии на базе синхронной машины на постоянных магнитах (СМПМ) для применения в составе математической модели микроэнергосистемы о. Русский. Приведены результаты исследования динамических свойств микроэнергосистемы средствами MATLAB/ Simulink.

A simplified model based on the flywheel drive permanent magnet machine is suggested. The results of the dynamic properties examination for the Russky Island power network with the use of MATLAB/Simulink/ SimPowerSystems package is presented here.

Введение

Министерство науки и образования РФ намерено сформировать на базе вновь созданного на о. Русский Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) образовательно-энергетический кластер и полигон для отработки технических, коммерческих и информационных решений в области Smart Grid в России [1].

Возможное применение разнообразных накопителей энергии (НЭ) на полигоне обусловливает необходимость освоения технологий их моделирования в составе микроэнергосистемы о. Русский.

Если будут осуществлены планы ДВФУ по освоению в этом регионе ветровой и солнечной энергетики, то на о. Русский возникнет классическая система распределенной генерации с возобновляемыми источниками энергии. Она требует адекватного математического моделирования, в том числе накопителей энергии, без которых ветроагрегаты и солнечные батареи будут недостаточно эффективными.

Упрощенная модель накопителя

Одна из наиболее предпочтительных схем маховиковых накопителей основана на применении СМПМ) и конверторов на преобразователях напряжения. Такая схема обеспечивает возможность независимого

управления потоками активной и реактивной мощности через конверторы. Схема такого накопителя и системы управления одного из конверторов приведены на рис. 1 [2].

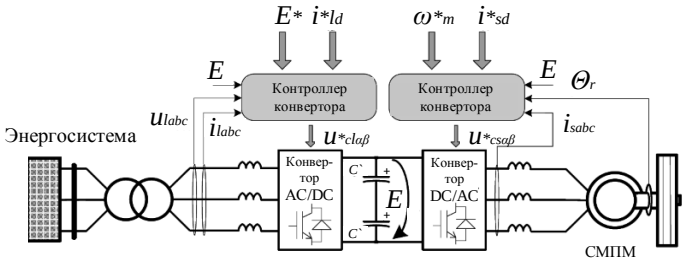


Рис. 1. Принципиальная схема маховикового накопителя на базе СМПМ:

E и E^* – напряжение и уставка по напряжению на звене постоянного тока; Θ_r – угол между вектором синхронно вращающейся оси и вектором ЭДС СМ; ω^*_m – уставка по механической скорости вращения ротора СМ; i^*_{ld} и i^*_{sd} – токовые уставки в сети и статоре в продольной оси

На рис. 2 приведена схема реализации упрощенной схемы в формате ПВК MATLAB/Simulink/SymPowerSystems.

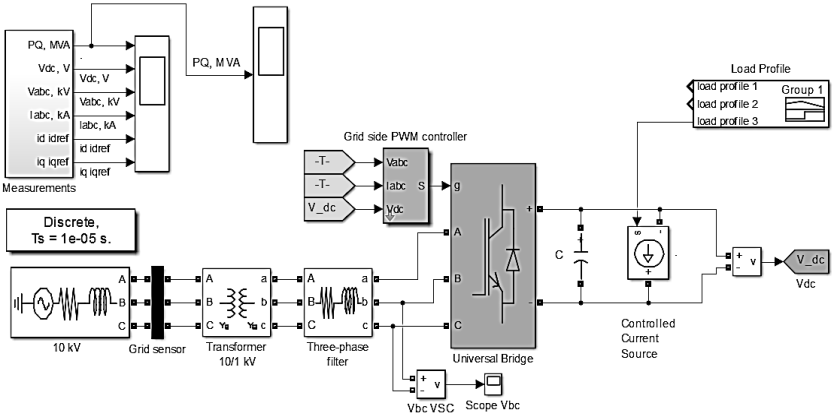


Рис. 2. Упрощенная модель накопителя в ПВК MATLAB/Simulink/SymPowerSystems

Для проверки работоспособности предложенной схемы канал управления источника тока был соединен с источником тестового сигнала, приведенного на рис. 3.

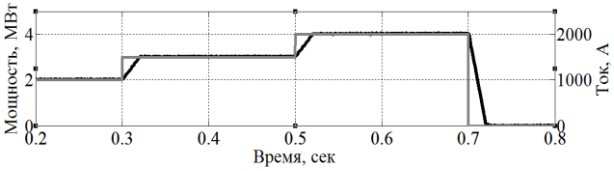
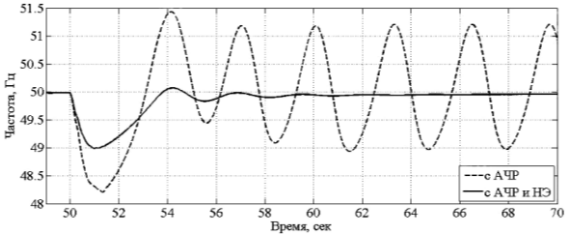
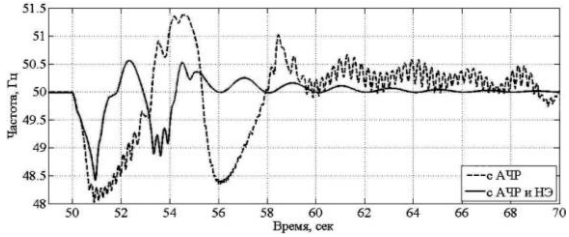


Рис. 3. Управляющий сигнал источника тока, эмулирующего конвертор со стороны СМПМ и мощность накопителя в точке присоединения к сети

Результаты моделирования аварийного отключения сети электроснабжения о. Русский от ОС Востока отражены на рис. 4. Были представлены две системы противоаварийного управления: 1) АЧР и 2) АЧР и накопители энергии в качестве управляемой нагрузки, а также результаты моделирования переходных режимов с ветроэлектростанцией и без нее (*а* и *б* соответственно) в качестве источника возобновляемой энергии.



а



б

Рис. 4. Частота в сети в условиях действия АЧР и накопителей энергии

В первом случае не была учтена ветроэлектростанция. Во втором случае она была представлена моделями турбин Ровена, а генераторы – машинами двойного питания.

Заключение

Упрощенная модель маховикового накопителя может быть использована для уменьшения времени расчета переходных режимов интеллектуальных энергосистем, включая сеть электроснабжения о. Русский.

Типовые устройства АЧР способны обеспечить устойчивость микроэнергосистемы в случае аварийного отключения от ОС Востока, но они не могут демпфировать низкочастотные колебания в должной мере.

Применение накопителей энергии, как одного из компонентов управляемой нагрузки, позволяет координировать действия регуляторов ветровых турбин для того, чтобы улучшить качество управления в случае нарушений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остров Русский – экспериментальная площадка для исследования противоаварийной автоматики микроэнергосистем / О.И. Горте, Н.Г. Кирьянова, М.С. Хмелик, В.К. Шипилов, А.И. Остапенко, А.А. Гробовой // XXII научно-практическая конференция «Релейная защита и автоматика энергосистем 2014». – М., 2014.

2. Modeling and Validation of a Flywheel Energy Storage Lab-Setup / F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, R. Villafafila-Robles // 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe): Proceedings. – Berlin, Germany, 2012. – P. 1–6.

3. *Sylvain Lechat Sanjuan*. Voltage oriented control of three-phase boost PWM converters. Design, simulation and implementation of a 3-phase boost battery charger / Chalmers University of technology. – Göteborg, Sweden, 2010. – 114 p.

ОБОСНОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ГЭС В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА

Е.А. Дворцов

Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, р.п. Черемушки, filialsfu@bk.ru

Проведен обзор основных проблем энергетики в Республике Тыва. Выполнен экономический расчет, показывающий эффективность строительства малых ГЭС как альтернативы дизельным станциям.

A review of the main problems of energy in the Republic of Tyva. Economic calculation is made showing the effectiveness of the construction of small hydro power plants as an alternative to diesel stations.

В энергоснабжении отдаленных районов Республики Тыва существует ряд проблем. Высокая себестоимость отпускаемой электроэнергии, производимой дизельными станциями, ставит вопрос о поиске новых, дешевых энергоносителей. Ежегодно правительством республики выделяются субсидии в размере около 100 млн руб. [1]. Республика Тыва включена в программу развития электроэнергетики, рассчитанную до 2030 года [2].

Целью данной статьи является обоснование строительства малых ГЭС в труднодоступных районах Республики Тыва, не обеспеченных электроэнергией.

Малые ГЭС позволяют сохранять природный ландшафт и окружающую среду. В отличие от других возобновляемых источников электроэнергии, таких как солнце и ветер, малая гидроэнергетика практически не зависит от погодных условий и способна обеспечить устойчивую подачу дешевой электроэнергии потребителю.

Мощность энергопотребления одного усредненного населенного пункта с числом жителей 100 человек P = 360 кВт [2]. Годовая выработка электроэнергии 2022 кВт/ч.

При стоимости дизельного топлива 35 руб. за 1 литр себестоимость вырабатываемой электроэнергии равна 8 руб. за 1 кВт/ч:

$$Ц_{э\ ДЭС} = 16\ 174 \text{ тыс. руб/год.}$$

Прибавим к этой сумме производственные расходы (100 тыс. руб/год), также учтем амортизационные отчисления (191 тыс. руб/год).

Итого годовые отчисления с использованием ДЭС составят

$$Ц_{э\ ДЭС} = 16\ 465 \text{ тыс. руб/год}$$

Строительство МГЭС позволит существенно уменьшить затраты. В среднем для строительства малой ГЭС цена 1 кВт мощности составляет от 30 тыс. руб. до 56 тыс. руб. [3].

Расчет текущих затрат предполагает включение в текущие затраты процентов на используемый капитал. Текущие затраты определяются по формуле

$$И = И_п + И_к,$$

где $И_п$ – производственные затраты (987 тыс. руб/год); $И_к$ – амортизационные отчисления и проценты на капитал (700 тыс. руб/год).

Берется кредит 15 млн руб. на 7 лет под 15 % в год.

Итого при оплате кредита необходимо погасить:

$$И_{1год} = 5976 \text{ руб.}$$

Чистая прибыль определяется по формуле

$$П = Ц_{э\ ДЭС} – И,$$

где $Ц_{э\ ДЭС}$ – затраты на ДЭС; И – затраты на МГЭС.

$$П_{1год} = 10\ 489 \text{ тыс. руб.}$$

Срок службы станции рассчитан не менее чем на 20 лет эксплуатации. За это время станция неоднократно окупит себя и будет продолжать приносить прибыль ее владельцу [4].

Оценка эффективности инвестиций по сроку окупаемости в случае единовременной оплаты

$$T_{ок} = \frac{C_0}{П} = 1{,}1 \text{ года},$$

где $T_{ок}$ – срок окупаемости; C_0 – сумма инвестиций; П – чистая прибыль.

Себестоимость электроэнергии, производимой МГЭС в случае с выплатой кредита (рассчитаем среднюю величину 4 года):

$$Ц_э^{ГЭС} = \frac{И^{ГЭС}}{Э_0^{ГЭС}} = 1{,}61 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч},$$

где $И^{ГЭС}$ – ежегодные издержки производства; $Э_0^{ГЭС}$ – среднегодовая выработка электроэнергии.

Таким образом, проблема энергоснабжения в децентрализованных районах может быть решена с помощью малых ГЭС. Выполненный расчет показывает экономическую эффективность применения малых ГЭС. Более полная информация приведена в сборнике материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ». www.shf-sfu.ru/upload/Sbornik.pdf.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сенин И.* Малые ГЭС могут разгрузить бюджет // Сайт еженедельника «Плюс Информ». – URL: http://plusinform.ru/main/4614-malye-ges-mogut-razgruzit-byudzhet.html (дата обращения: 24.10.2013).

2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: приложение к Распоряжению Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. N 1715-р. – URL: http://base1.gos-tedu.ru/57/57547 (дата обращения: 24.10.2013).

3. Информация по дизельным электростанциям // БезФормата.ru Кызыл. – URL: http://kizil.bezformata.ru/listnews/dizelnim-elektrostantciyam/12257145/ (дата обращения: 03.11.2013).

4. Стоимость оборудования на 01.03.2012: прайс // ИНСЭТ: web-сайт межотрасл. науч.-техн. объединения по проектированию, серийному изготовлению и монтажу мини ГЭС и микро ГЭС. – URL: http://www.inset.ru/r/obor_tab.htm (дата обращения: 05.12.2013).

5. *Соболева О.Н.* Экономическая оценка установки малой ГЭС на реке Коса Зуевского района Кировской области // Научный журнал КубГАУ: политемат. сетевой электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та. – 2012. – № 75 (01). – С. 1–17. – URL: http://ej.kubagro.ru/get.asp?id=1890&t=0 (дата обращения: 24.10.2013).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТА СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

С.С. Достовалова, В.В. Бирюк, Д.А. Угланов

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара, sophiadost@mail.ru

В данной статье оценен потенциал использования ветроэнергетики на территории Самарской области, а также обоснована перспективность использования вихревой ветроэнергетической установки на территориях со среднегодовыми скоростями ветра менее 6 м/с.

In this article the potential of using wind power in the Samara region was assessed. The perspective of using whirling wind power plant on site with average wind speeds lower than 6 mps was also considered.

В Евросоюзе доля возобновляемых источников энергии, к которым относится и ветроэнергетика, по плану к 2020 году должна составить 20 %. В России 0,1 % электроэнергии вырабатывается с использованием возобновляемых источников энергии.

Незначительное использование энергии ветра в России объясняется невозможностью эффективного применения предлагаемых рынком ветроэлектрогенераторов в силу их конструктивных особенностей и низкого потенциала ветров. Для эффективной работы современных лопастных ветрогенераторов, вырабатывающих электричество, необходима скорость ветра более 6 м/с. Такая средняя скорость ветра наблюдается лишь в некоторых районах страны, например, на Дальнем Востоке и Сахалине. В европейской же части России, в которой проживает 65 % населения страны, средняя скорость ветра крайне редко достигает 4,5 м/с и не обеспечивает условий эксплуатации ветрогенераторов [1].

При принятии решения об использовании ветроэнергетических установок (ВЭУ) необходим точный анализ ветроэнергетических возможностей региона. По данным замеров скоростей, проводимых с 1960 г. на полевых учебных аэродромах Самарской области на высоте 6 м над метеоплощадкой, выявлены реальные возможности региона. Средняя скорость ветра в течение года колеблется от 2,6 до 8,6 м/с, а максимальная скорость ветра – от 12 до 25,6 м/с. Пороговое значение ветра, при котором современные ВЭУ начинают работать в режимах

генерации, составляет 2…3 м/с. Это говорит о целесообразности использования ВЭУ в Самарской области.

Валовый потенциал ветровой энергии региона – это часть среднемноголетней суммарной ветровой энергии, которая доступна для использования на площади региона в течение одного года. Рассматриваемый регион представляется как совокупность участков или зон, в каждой из которых удельная мощность ветровой энергии является однородной по всей площади зоны. Определяется по формуле

$$W_{\text{в}} = W_{\text{ув}} S\,, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год},$$

где $T = 8760$ ч/год; S – площадь зоны, м^2; $W_{\text{ув}} = < P > \dfrac{T}{20}$ – удельный валовый потенциал ветровой энергии зоны; $< P >$ – средняя удельная мощность ветрового потока, кВт/м^2.

Технический потенциал ветровой энергии региона – это суммарная электрическая энергия, которая может быть получена в регионе от использования валового потенциала ветровой энергии при современном уровне развития технических средств и соблюдении экологических норм.

$$W_T = W_{\text{в}} \varepsilon(v) \eta_{\text{г}} \eta_{\text{р}} S_T\,,$$

где $\varepsilon(v)$ – коэффициент использования энергии ветра, принимается равным 0,2; $\eta_{\text{г}}$, $\eta_{\text{р}}$ – КПД генератора и редуктора ВЭУ, принимается равным 0,2; S_T – площадь зоны, принимается равной 12 % от общей площади зоны.

Экономический потенциал ветровой энергии региона – это величина годового поступления электрической энергии в регионе от использования ВЭУ, получение которой экономически оправдано при существующем уровне цен на строительно-монтажные работы, оборудование, производство, транспортировку и распределение энергии и топлива и соблюдение экологических норм.

$$W_T = W_{\text{в}} = 0{,}02\,.$$

Валовый, технический и экономический потенциалы региона представляют собой сумму экономических потенциалов составляющих их зон.

На основе анализа данных по отводу площадей для размещения ветроэнергетических установок и технических характеристик ВЭУ технический потенциал региона составляет 2 % от валового, а экономический потенциал – 0,5 % от технического.

Валовый потенциал ветровой энергии Самарской области составляет 3537,6 млрд кВт/ч, технический потенциал – 8,844 млрд кВт/ч, экономический – 0,0442 млрд кВт/ч.

Следует отметить, что в застроенной местности значения скоростей ветра будут значительно ниже, чем на аэродромах. Известно, что лучшее место установки ВЭУ – вершина холма или середина поля. При установке в застроенной местности, например рядом с домом, ВЭУ необходимо устанавливать на мачте высотой на 3…5 м выше дома или на расстоянии не менее трехкратной высоты дома. Не рекомендуется устанавливать ВЭУ на крышах зданий, так как установки создают шум и вибрации.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что в Самарской области перспективно использование свойств вихревых эффектов в конструкции ветрогенераторов, так как это позволяет вырабатывать электроэнергию при скорости ветра 2,5…3,5 м/с, также возможна работа ветрогенератора от восходящих тепловых потоков и низкопотенциальных воздушных потоков. При этом снижаются низкочастотные шумы, присущие любой лопастной ВЭУ.

Работа ВВЭУ основана на получении в специальных генераторах закрученного потока, свойства которого подобны природному смерчу, обладающему значительным запасом кинетической энергии. Возникающие при этом в приосевой зоне генератора вращение воздуха, разрежение и большие угловые скорости вызывают подсос дополнительных масс воздуха из окружающей среды, которые, закручиваясь вместе с основным потоком воздуха, с высокой скоростью устремляются к выходной части ВВЭУ [2].

Одним из недостатков стационарных лопастных ВЭУ является отражение телесигнала, вызывающее помехи, и обнаружение ВЭУ радарами. Вихревая ветроэнергетическая установка конструктивно выполнена таким образом, что ротор находится внутри корпуса установки, позволяя экранировать низкочастотные акустические шумы ротора.

В настоящее время вихревые ветроэнергетические установки могут найти широчайшее применение в промышленности и частном хозяйстве. ВВЭУ может служить источником энергии для обеспечения соб-

ственных нужд газоперекачивающих станций, устанавливаться над шахтами лифтов для энергоснабжения подъездов жилых домов, использоваться в системах автономного энергоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Безруких П.П.* Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.

2. Вихревая ветроэнергетика / Р.А. Серебряков, В.В. Бирюк, А.П. Толстоногов и др. // РК техника: научно-технический сборник. – 1999. – Серия 12. – С. 41–61.

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

В.З. Манусов, К.Н. Бойко

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, bkn08@rambler.ru

Прогнозирование электропотребления на основе теории нечетких множеств получило широкое распространение в наше время. В данной работе рассмотрен алгоритм построения функций принадлежности для нескольких нечетких множеств, основанный на методе экспертных оценок.

Prediction of energy consumption based on the theory of fuzzy sets are widely used nowadays. In this paper, the algorithm of constructing the functions of belonging to several fuzzy sets based on the method of expert estimations.

Прогнозы нагрузки можно разделить на три категории: краткосрочные прогнозы, которые, как правило, имеют интервал от одного часа до одной недели; среднесрочные прогнозы, которые, как правило, имеют интервал от одной недели до одного года, и долгосрочные прогнозы, которые делаются больше, чем на год. Прогнозы на различных временных интервалах важны для различных операций в рамках работы энергетической компании. По сути эти прогнозы тоже различны. Например, для конкретного региона можно предсказать следующий день по нагрузке с точностью около 1…3 %. Тем не менее невозможно предсказать в следующем году пиковую нагрузку с аналогичной точностью, поскольку точные долгосрочные прогнозы погоды не доступны. Для пико-

вого прогноза на следующий год можно обеспечить распределение вероятностей нагрузки на основе исторических наблюдений за погодой. Основной проблемой при решении задачи прогнозирования – и не важно, какой метод или математический аппарат используется – является проблема обработки статистической информации. Анализ исходной информации является важной частью системы идентификации, точность любых прогнозов технически зависит от последовательности загрузки данных. Комплексное изучение предшествующих данных дает уменьшение человеческой ошибки при прогнозировании.

На сегодняшний день основной проблемой, ограничивающей применение нечеткой логики для анализа сложных стохастических систем, является сложность в обработке исходных данных.

В данной работе рассмотрен алгоритм построения функций принадлежности для нескольких нечетких множеств, основанный на методе экспертных оценок с последующей линейной аппроксимацией полученных функций принадлежности (ФП).

В качестве исходных данных возьмем статистические выборки за 12 месяцев, предоставленные Новосибирским ЦГМС-РСМЦ (рис. 1).

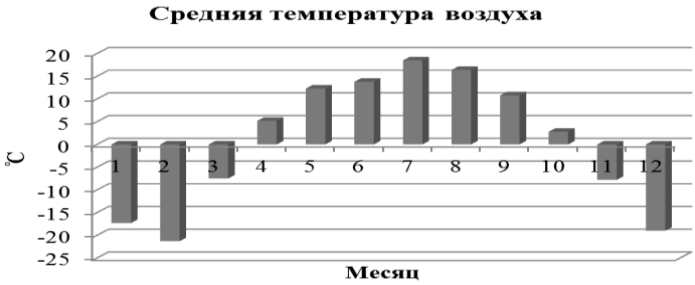


Рис. 1. Изменение средней температуры воздуха на годовом интервале

Проанализировав исходные данные, можно перейти к построению функции принадлежности. Для этого воспользуемся методом экспертных оценок. Основные шаги метода: выбор объекта для экспертной оценки; выбор параметров сравнения; определение веса каждого параметра; задание сравнительной шкалы; сравнение.

В качестве примера приведено построение ФП для средней температуры воздуха. Температурная шкала разбивается на следующие зна-

чения лингвистической переменной: большая температура (*B*); средняя температура (*M*); маленькая температура (*S*).

Затем эксперты в количестве пяти человек представляют каждому значению температуры по оценке 0 или 1 – в зависимости от того, относится это значение к заданному значению лингвистической переменной или нет [2]. На основе полученных данных строятся функции принадлежности.

Функция принадлежности, представленная на рис. 2, будет применена для решения задачи долгосрочного прогнозирования электрической нагрузки в качестве исходных данных для нечеткой модели прогнозирования. Это позволит существенно повысить точность нечеткой модели прогнозирования, а также позволит более оперативно подстраивать модель под текущие изменения.

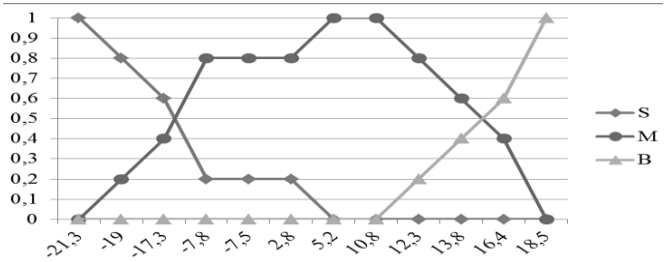


Рис. 2. Функции принадлежности для лингвистической переменной «Средняя температура воздуха»

Для построения функций принадлежности полученных метеофакторов использован метод экспертных оценок. Данный метод был выбран, так как изменение температуры, так же как и зависимость электропотребления от метеофакторов, носит характер, который не подается описанию с помощью каких-либо уравнений. Резюмируя вышенаписанное в целом по методу, можно сделать вывод, что предложенный вариант построения функций принадлежности является удобным и практичным способом для практической реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Четыркин Е.М.* Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.

2. *Данилов Е.* Методика прогнозирования российского электротехнического рынка [Электронный ресурс] // Электротехнический рынок. – 2008. – № 3 (21), май-июнь. – URL: www.market.elec.ru/nomer/20/forecasting-technique/ (дата обращения: 11.11.2014).

ПРИМЕНЕНИЕ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВИЭ В РОССИИ

А.А. Отрощенко, С.С. Чернов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, alena.otroshchenko@gmail.com; chss@ngs.ru

Уровень развития возобновляемой энергетики России значительно ниже уровня ведущих стран мира. Ряд европейских государств обеспечивает более 10 % своего спроса с помощью ветроэнергетики. Политика государства, развитие нормативно-правовой базы, экономическое стимулирование и другие меры поддержки возобновляемой энергетики могут стать примером для продвижения ветроэнергетических технологий в нашей стране.

The level of renewable energy development in Russia is much lower than level of leading countries. Several European countries provide more than 10% of their power demand through wind energy. Governmental policy, normative regulation, economic incentives and other measures that support renewable energy can become a model for the promotion of wind energy technologies in our country.

Правительством РФ в последние шесть лет был принят ряд нормативно-правовых актов, направленных на развитие возобновляемой энергетики. Согласно Распоряжению Правительства РФ № 2048-р, в регионах к 2030 году планируется построить 16 ВЭС. Однако, до сих пор не проработаны механизмы господдержки технологии ВИЭ, существует целый ряд барьеров для внедрения ветроэнергетических технологий. Политика государства направлена на ВЭС, подключаемые к ЕНЭС, в то время как география страны предполагает широкое использование ВЭС в децентрализованных зонах. Кроме того, затраты на технологическое присоединение ВЭС к сети составляют порядка 30 % стоимости строительства. В Европе этот барьер преодолевается путем разнесения капитальных затрат [1].

Развитие ветроэнергетики определяется не только наличием ветропарков, но и технологической базой для их создания. Например, результат достижений оффшорной ветроэнергетики Германии носит производственно-технологический характер – страна является лидером в производстве ветротурбин большой мощности. Датская компания Vestas полностью обеспечивает потребности страны в ветрогенераторах и экспортирует свое оборудование по всему миру. Россия, в свою

очередь, вынуждена использовать зарубежные технологии, пытаясь адаптировать характеристики европейского оборудования под климатические особенности. Данный фактор нередко является причиной отказов и простоя оборудования.

При разработке проектов строительства ветростанций следует руководствоваться экономическим потенциалом выбранной территории. Необходимо учитывать валовый потенциал ветроресурса, возможность снятия ветропотока с помощью имеющихся технологий, потребность региона в энергии. Эти факторы прямо пропорционально влияют на стоимость получаемой на ВЭС энергии. Однако выбор месторасположения ВЭС России не всегда соответствует данному критерию.

Еще одним европейским показателем успешного развития отрасли является сформированное общественное мнение и сознательность населения в вопросах строительства и эксплуатации ветроустановок [2]. Гражданское участие в возобновляемой энергетике позволяет активно развивать как малые проекты, так и крупные ВЭС Европы.

Несмотря на зависимость нашей страны от ископаемых видов топлива, развитие ВИЭ необходимо, поскольку они являются порой единственной возможностью безопасного и эффективного энергоснабжения потребителей. Около 22–25 млн российских граждан проживают в районах автономного или ненадежного централизованного энергоснабжения. Имеются обширные территории, где целесообразно приоритетное развитие ВИЭ. К ним относятся зоны децентрализованного энергоснабжения с низкой плотностью населения, в первую очередь районы Крайнего Севера и приравненные к ним; зоны централизованного энергоснабжения с дефицитом мощности; города и местности со сложной экологической обстановкой; зоны с проблемами обеспечения энергией индивидуального жилья, фермерских хозяйств, мест сезонной работы. Развитие ВИЭ позволит не только обеспечить бесперебойность энергоснабжения, но и создать условия для развития сельского хозяйства, промышленного производства, бизнеса [3].

Учитывая распределение ветроресурсов на территории страны, можно выделить ряд регионов, где энергия ветра может обеспечить наиболее устойчивое и эффективное энергоснабжение: Камчатка, Магаданская область, Чукотка, Сахалин, Якутия, Бурятия, Таймыр и др. [4]. Основными мерами для успешной реализации ветроэнергетических проектов на этих территориях являются следующие:

1) политика государства, направленная на активное развитие ветроэнергетических технологий и использование данного вида ресурсов;

2) совершенствование нормативно-правовой базы РФ в части ВИЭ, разработка регламентов функционирования ВЭС не только в единой сети, но и в автономном режиме;

3) создание условий для формирования конкурентного рынка технологий ветроэнергетики, а также мощной машиностроительной базы на территории страны;

4) разработка обоснованных ветроэнергетических проектов с использованием имеющихся научных разработок и исследований в части размещения ветроэнергетических объектов (см., например, [5]);

5) формирование общественного мнения, основанного на достоверных данных о функционировании ВЭС; пропаганда использования ветроустановок малой мощности для обеспечения нужно малых фермерских хозяйств и др. [6].

Ветроэнергетика в мире является не только источником эффективного энергоснабжения, но и прибыльным для инвесторов бизнесом. Примеры европейских государств уже в скором времени должны дать толчок для развития ветроэнергетики и в нашей стране.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шмидт Г.* Мировой прорыв оффшорной ветроэнергетики: обзор по материалам Renewable Energy World, New Energy, 2007 [Электронный ресурс] // Зеленая энергетика. – 2007. – № 4. – URL: http://www.uwea.com.ua/proriv.php (дата обращения: 11.11.2014).

2. *Фёникс Х., Вишневец Ю.* Шлезвиг-Гольштейн – чемпион Германии по ветроэнергетике [Электронный ресурс]. – URL: http://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-kommentarii/shlezvig-golshtein-chempion-germanii-po-vetroyenergetike.html (дата обращения: 11.11.2014).

3. *Отрощенко А.А., Чернов С.С.* Перспективы развития ветроэнергетики России: региональный аспект: монография. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 112 с.

4. *Отрощенко А.А.* Перспективы обновления основных производственных фондов российской энергетики: ДПМ и ВИЭ // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития: сб. материалов 2 междунар. науч.-практ. конф., 18 окт. 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 134–140.

5. *Харитонов В.П.* Основы ветроэнергетики. – М.: ВИЭСХ, 2010. – 338 с.

6. *Отрощенко А.А.* Потенциал возобновляемой энергетики удаленных территорий в рамках стратегии развития арктической зоны России // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы 11 междунар. науч.-практ. интернет-конф., Орел, 1 марта – 30 июня 2013 г. – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. – С. 92–94.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ДВУХЗВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

А.А. Радионов, А.С. Маклаков, Е.А. Карякина

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, maklakov.work@gmail.com

В статье рассмотрены возможности электропривода, построенного на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения, с точки зрения энергосбережения. Были показаны перспективны интеграции электроприводов на базе двухзвенных преобразователей частоты в промышленные «умные» сети.

This paper addresses the issue of possibilities of electric drive based on active rectifier and voltage source inverter from the point of view of energy saving. The prospects of energy-saving electric drive integration to the Smart Grid have been determined as it is able to provide high power and capabilities of the controlling reactive power flow by means of active rectifier.

Двухзвенный преобразователь частоты с активным выпрямителем напряжения и автономным инвертором напряжения (ДПЧ с АВН и АИН), получивший в зарубежной литературе название «back to back converter», представляет собой два управляемых источника напряжения, один из которых (АВН) присоединяется к сети переменного тока, а второй (АИН) – непосредственно к нагрузке [1]. Оба источника напряжения имеют идентичную структуру и состоят из преобразователей на полностью управляемых полупроводниковых ключах и общего промежуточного звена постоянного тока (DC). АВН и АИН работают по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и для улучшения гармонического состава тока и напряжения могут дополнительно комплектоваться фильтрами на стороне переменного тока. АВН дополнительно комплектуется реактором с большим показателем добротности и высоким напряжением короткого замыкания (10…15 %), поэтому активным сопротивлением на входе АВН пренебрегают [2].

Пренебрегая активным сопротивлением в точке подключения к сети и внутренними потерями в АВН и АИН, выражения активной, реактивной и полной мощности определятся так [3, 4]:

$$P_{\text{сети}} = \frac{E_c E_{\text{АВН}}}{X_L} \sin(\alpha)\,, \qquad (1)$$

$$Q_{\text{сети}} = \frac{E_c \;\; E_c - E_{\text{АВН}} \cos(\alpha)}{X_L}, \qquad (2)$$

$$S_{\text{сети}} = \frac{E_c}{X_L} \sqrt{E_c^{\;2} - 2E_c E_{\text{АВН}} \cos(\alpha) + E_{\text{АВН}}^{\;2}}, \qquad (3)$$

где $P_{\text{сети}}$, $Q_{\text{сети}}$, $S_{\text{сети}}$ – активная, реактивная и полная мощности, потребляемые или генерируемые ДПЧ; X_L – эквивалентное индуктивное сопротивление на входе ДПЧ; $E_c \approx \text{const}$ – амплитуда фазного напряжение питающей сети; $E_{\text{АВН}}$ – амплитуда гладкой составляющей основной гармоники выходного напряжения АВН; α – угол сдвига между E_c и $E_{\text{АВН}}$.

Используя зависимость (3), можно построить систему управления ДПЧ таким образом, чтобы при определенных значениях α и $E_{\text{АВН}}$ сохранялось постоянство максимальной потребляемой полной мощности преобразователя, т. е. обеспечивалось максимальное использование преобразователя по потребляемому току. Перспективно использовать данный метод управления ДПЧ в составе «умной» промышленной сети, так как он соответствует одному из значимых требований к «умной» сети, такому как обеспечение активного участия потребителей в работе сети.

На основании проведенных теоретических исследований было определено, что благодаря возможности осуществлять контролируемую генерацию или потребление реактивной мощности электропривод, построенный на базе ДПЧ с АВН и АИН, имеет значительные перспективы для интеграции в «умные» промышленные сети [5, 6]. Для наибольшей эффективности участия в работе сети для ДПЧ с АВН предлагается применить в управлении принцип максимального использования по потребляемому фазному току при параллельной работе с нелинейной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.* Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 48–52. – URL: http://www.indust-engineering.ru/issues/2013/2013-2.pdf (дата обращения: 11.11.2014).

2. *Маклаков А.С., Радионов А.А.* Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 40–47. – URL: http://www.indust-engineering.ru/issues/2013/2013-2.pdf (дата обращения: 11.11.2014).

3. *Маклаков А.С.* Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 43–50. – URL: http://www.indust-engineering.ru/issues/2013/2013-1.pdf (дата обращения: 11.11.2014).

4. *Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.* Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 3–7. – URL: http://electrical-engineering.ru/issues/2014/2014-1.pdf (дата обращения: 11.11.2014).

5. *Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В.* Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30. – URL: http://electrical-engineering.ru/issues/2014/2014-1.pdf (дата обращения: 11.11.2014).

6. *Маклаков А.С.* Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 2, № 3. – С. 16–25. – URL: http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3.pdf (дата обращения: 11.11.2014).

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.Г. Русина, Г.Л. Русин, Е.С. Горевая

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, gelerusin@gmail.com

Предложена имитационная модель портфеля проектов, основанная на модели диффузии Басса. Модель дает возможность манипулировать регулируемыми рыночными и производственными параметрами, что позволяет формировать портфель инновационных проектов с привлекательной доходностью и приемлемым риском.

Simulation model based on a Bass diffusion model is offered. This model allows to manipulate regulated market and production variables in such a way that allows to achieve an innovation projects portfolio with attractive profitability and acceptable risk.

Проблема исследования. Инновационный путь развития экономики страны, в том числе и в энергетике, декларируется на государственном уровне. В энергетике изменение технологии производства в обозримом будущем не произойдет. Но инновационные решения возмож-

ны в создании систем диагностики, повышения надежности, энергосбережения, альтернативных производств. Такие проекты характеризуются повышенными рисками, особенно в условиях роста неопределенности и неустойчивости рынка. При традиционном индивидуальном подходе они классифицируются как непривлекательные и зачастую отвергаются, что может приводить к значительной упущенной выгоде, особенно в стратегическом масштабе. Это основная проблема, которая рассматривается в данной работе.

Объектом исследования в работе является портфель инновационных проектов. В портфеле проекты подбираются таким образом, чтобы их риски, пусть и высокие, были в противофазе и компенсировали друг друга. Новизна результатов обусловлена применением современных методов и средств имитационного моделирования: системной динамики и агентных [1]. Область применения результатов – стратегическое планирование инновационных проектов для альтернативных производств предприятий энергетики.

Падение риска портфеля из двух проектов почти до нуля при корреляции *NPV* этих проектов, равной –1, демонстрирует таблица. Это свойство портфеля делает его особенно привлекательным для инновационных проектов.

Риск портфеля

Проект	Среднее *NPV*, млрд руб.	СКО *NPV*, млрд руб.	Риск, %
Проект 1	10	10	15,9
Проект 2	20	20	15,9
Портфель	30	10	0,001

В последнее время наблюдается рост интереса предприятий энергетики к запуску альтернативных производств. Например, в [2] описаны инновационные проекты по переработке золошлаковых отходов в строительные материалы. Это исключительно актуально для ряда ОГК, поскольку решает не только дорогостоящие проблемы растущих территорий золоотвалов, но и позволяет производить продукты, востребованные на новых растущих альтернативных рынках. На рис. 1 приведен фрагмент стейтчарта авторской агентной имитационной модели, которая может использоваться для инвестиционного планирования производства по переработке золошлаковых отходов в строительные материалы. В правой части рис. 1 представлен фрагмент процесса ани-

мированной имитации одного из нескольких рынков, где покупатели переходят из состояния потенциальных (серые квадраты) в состояние купивших (черные ромбы).

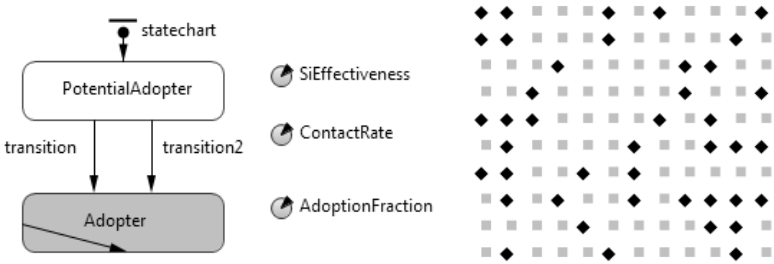


Рис. 1. Фрагмент агентной имитационной модели

Процесс построения таких моделей для различных рынков, в том числе энергетических, подробно рассмотрен авторами в [3, 4]. Основная задача, которая возникает при прогнозировании денежных потоков, максимально точно оценить динамику будущих продаж. В условиях отсутствия статистики продаж это можно сделать на основе модели Басса [5].

На рис. 2 показан один из приемлемых результатов имитации распространения строительных материалов, произведенных на основе золошлаковых отходов на двух разных рынках: строительном и дорожном. Колебания покупок идут в противофазе. В результате риск проектов компенсируются в портфеле.

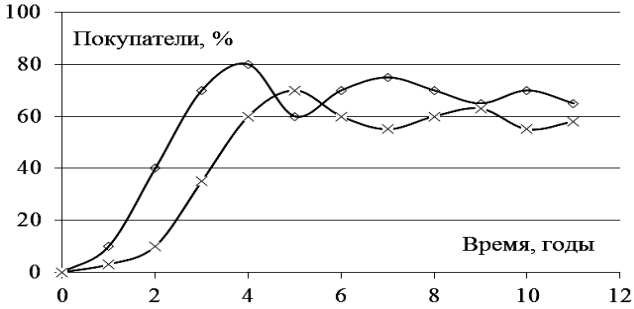


Рис. 2. Результаты имитации

Таким образом, портфельный подход позволяет получать положительный эффект от ряда высокорисковых инновационных проектов, которые ранее считались неэффективными, убыточными и отвергались. Использование традиционных статистических моделей для формирования портфеля ограничивается проблемами измерения показателей эффективности инвестиций. Полезными инструментами для формирования портфеля являются современные средства имитационного моделирования. Имитационные модели дают возможность манипулировать регулируемыми рыночными и производственными параметрами и позволяют формировать портфель инновационных проектов в энергетике с привлекательной доходностью и приемлемым риском.

ЛИТЕРАТУРА

1. AnyLogic. Multimethod Simulation Software: website [Electronic resource]. – Available at: http://www.anylogic.com/ (accessed: 11.11.2014).
2. *Колмогоров В.В.* Инновационная составляющая повышения эффективности энергетики // ЭКО. – 2011. – № 4. – С. 17–26.
3. *Русин Г.Л., Гаранина М.В., Горевая Е.С.* Маркетинг инновационного продукта // Бренд-менеджмент. – 2012. – № 3 (64). – С. 154–171.
4. *Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Rusin G.L.* Aspects of evaluating the efficiency of introducing innovative method and technology demand side management in smart grid system // 48 th International Universities Power Engineering Conference – UPEC 2013, Dublin, Ireland, 2–5 September 2013: [Proceedings]. – Dublin, Ireland: IEEE, 2013. – P. 1–6.
5. *Bass F.M.* A new product growth for model consumer durables // Management Science. – 1969. – Vol. 15, N 5. – P. 215–227.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАМЕНЫ МЕДНЫХ ВТЫЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ

Н.М. Сатдарова, М.В. Ненашев, П.В. Рогожин

Самарский государственный технический университет, г. Самара, ttxb@inbox.ru

В работе рассмотрена технология получения комбинированных слоев алюминиевая подложка – медный подслой – серебряное покрытие, для замены медных электрических контактных элементов, ис-

пользующихся в комплектно-распределительных устройствах, на алюминиевые.

The paper discusses some aspects of the technology of combined layers of aluminum substrate – copper underlayer – silver coating performed to replace the copper electrical contact elements used in the complete-distribution devices on aluminum.

Введение. Замена медных электрических контактных элементов (ЭКЭ), использующихся в комплектно-распределительных устройствах (КРУ), на алюминиевые при сохранении функциональности имеет значительный технико-экономический эффект (удешевление себестоимости изготовления ЭКЭ в 6,8 раз). При этом актуальной является разработка технологии, получения ЭКЭ из алюминия с медным подслоем и износостойким серебряным покрытием. Нанесение покрытий на алюминий осложнено наличием на его поверхности прочной оксидной пленки, препятствующей получению покрытия, а также высокое отрицательное значение потенциала алюминия и его стремление к переходу в ионное состояние, что вызывает контактное вытеснение из растворов электролитов более электроположительных металлов, в частности меди и серебра [1]. Проблемы с покрытиями могут возникать как на этапе сборки, например при нагреве сваркой, так и в ходе эксплуатации готовых изделий. Для решения указанной проблемы используется подслой меди на алюминии, получаемый методами порошкового напыления.

Получение подслоя. Для формирования порошковых покрытий с высокой адгезией применяют газотермические способы, в том числе газопламенный, плазменный и детонационный методы напыления. При этом, как показано в работах [2–7], наилучшие технические характеристики покрытий (максимальные прочность и адгезия, минимальные пористость и газопроницаемость) обеспечивает детонационный способ.

В разработанной технологии используются операции: увеличение шероховатости поверхности алюминия перед нанесением покрытия – пескоструйной обработкой или химическим способом (травлением); формирование медного подслоя газотермическим методом; подготовка медного подслоя с операцией шлифования; термообработка подслоя; контактный метод осаждения промежуточных пленок вспомогательного металла; электрохимическое осаждение покрытий на алюминий.

Получены экспериментальные образцы алюминиевого ЭКЭ типа «Тюльпан». Для нанесения детонационного покрытия использовалась

управляющая программа, обеспечивающая требуемую равномерность покрытия при нанесении нескольких последовательных слоев по спирали. Необходимая толщина слоя (60…70 мкм) наращивалась серией выстрелов, во время которых происходит перемещение заготовки и самой детонационной пушки с помощью манипулятора.

Технология серебрения. Одним из требований к поверхности ЭКЭ с серебряным покрытием является стойкость к изнашиванию. В качестве технологии нанесения серебряного слоя использовался электрохимический метод серебрения на бесцианистом электролите с применением асимметричного тока синусоидальной формы [8]. Это позволяет получать покрытия с градиентом прочности и обеспечивает требуемые показатели износостойкости [9, 10]. Ранее для получения асимметричного переменного тока промышленной частоты использовалась трансформаторная схема с выделением верхней и нижней полуволн встречными диодами. Для реализации используемого метода был разработан импульсный источник тока, позволяющий задавать требуемую форму тока, в частности, простейшую форму тока – гармоническое колебание с ненулевой постоянной составляющей. Для перехода от трансформаторных схем формирования асимметричного тока к современным импульсным источникам без изменений технологии приведен расчет эквивалентной по заряду формы тока. Получены соотношения амплитуд и постоянной составляющей для асимметричного гармонического колебания.

Результаты испытаний экспериментальных образцов. ЭКЭ с медным покрытием после серебрения гальваническим способом подвергались совместным испытаниям со штатными медными аналогами КРУ СЭЩ®-70-10-1000/20 У3 с номинальным напряжением 10 кВ, номинальным током 1000 А, номинальным током отключения 20 кА. Целью испытаний являлось соответствие комбинированных и штатных образцов ЭКЭ требованиям ГОСТ 8024-90 Р.1 Испытания проводились по ГОСТ 8024-90 Р2. В результате испытаний на нагрев КРУ СЭЩ®-70-10-1000 У3 с контактной деталью током I = 1000 А установлено, что все виды полученных соединений соответствуют требованиям ГОСТ 8024-90.

Таким образом, комбинированные ЭКЭ из алюминия с медно-серебряным слоем удовлетворяют требованиям к ЭКЭ, изготовленным полностью из меди с серебряным покрытием рабочей части. Результаты выполненной работы можно использовать для разработки оптимальной технологии формирования электропроводящих покрытий; снижения себестоимости изготовления одного контакта в 6,8 раз за счет замены материала ЭКЭ с меди на алюминий с медным слоем

толщиной 40…60 мкм; для научно-технических рекомендаций по использованию результатов исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ на основании соглашения о предоставлении субсидий № 14.574.21.0010 от 17.06.2014.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лукомский Ю.Я., Горшков В.К.* Гальванические и лакокрасочные покрытия на алюминии и его сплавах. – Л.: Химия, 1985. – 182 с.

2. *Хасуй А.*Техника напыления. – М.: Металлургия, 1975. – 286 с.

3. Comparison of cold spray and detonation coatings properties / A. Sova, D. Pervushin, S. Zlobin, I. Smurov, V. Ulianitsky // ITSC-2010 Proceedings, Singapore, May 3–5. – Singapore, 2010. – P. 132–138.

4. *Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И.* Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. – 1982. – 215 с.

5. *Nikolaev Yu.A., Vasiliev A.A., Ulianitsky V.Yu.* Gas detonation and its application in engineering and technologies (review) // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2003. – Vol 39, iss. 4. – P. 382–410.

6. Автоматизированный детонационный комплекс «Обь» для нанесения порошковых покрытий / Т.П. Гавриленко, А.Л. Кирякин, Ю.А. Николаев, В.Ю. Ульяницкий // СТА: Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 46–50.

7. Опыт исследования и применения нанесения детонационных покрытий / В.Ю. Ульяницкий, М.В. Ненашев, В.В. Калашников, И.Д. Ибатуллин, С.Ю. Ганигин, К.П. Якунин, П.В. Рогожин, А.А. Штерцер // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12 (33), № 1 (2). – С. 569–575.

8. *Шульгин Л.П.* Электрохимические процессы на переменном токе / АН СССР, Ин-т химии и технологии редких элементов и минерального сырья. – Л.: Наука, 1974. – 70 с.

9. Применение наноструктурированных покрытий в опорах скольжения буровых долот / И.Д. Ибатуллин, М.В. Ненашев, С.Ю. Ганигин, А.С. Чеботаев, К.П. Якунин, Т.А. Шашкина, А.Р. Галлямов, С.А. Белокоровкин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 1 (2). – С. 357–361.

10. Перспективные технологии, свойства и применение наносруктурированных электрохимических покрытий / С.Ю. Ганигин, И.Д. Ибтуллин, М.В. Ненашев, А.Р. Галлямов, Р.Р. Неяглова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2011. – № 3–1 (27). – С. 189–196.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ MICROGRID ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

К.А. Скурихина, А.Ю. Арестова, Д.В. Армеев

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, kseniya.skurikhina@ieee.org

Статья посвящена вопросам развития концепции MicroGrid в рамках российской модели интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). Развитие ИЭС предполагает тесное взаимодействие между централизованными и распределенными генерирующими мощностями, которое, в свою очередь, требует исследования динамических свойств MicroGrid как в изолированном режиме, так и при параллельной работе с энергосистемой.

The paper is devoted to the development of the MicroGrid concept within the Russian model of Smart Grid. The idea of Smart Grid involves close interaction between centralized and distributed power generation capacity. The active role of distributed generation requires an examination of the dynamic properties of MicroGrid in both isolated mode and synchronous operation with power system.

Идея ИЭС ААС предполагает объединение на технологическом уровне электрических сетей, потребителей и производителей электроэнергии, в том числе и объектов распределенной генерации, в единую автоматизированную систему, позволяющую в реальном времени отслеживать и контролировать все режимы работы [1]. Реализация идеологии ИЭС ААС направлена на достижение качественно нового уровня эффективности ее функционирования и развития, а также на повышение системной надежности и пропускной способности, повышение качества и надежности электроснабжения потребителей.

Одним из направлений развития ИЭС ААС может стать радикально новая концепция MicroGrid. Система MicroGrid чаще всего включает в себя источники распределенной генерации, накопители энергии и локальных потребителей [2].

Важным свойством MicroGrid можно назвать то, что, несмотря на функционирование в рамках распределительной системы, они могут автоматически переходить в изолированный режим работы в случае аварий в сети и восстанавливать синхронную работу с сетью после устранения аварии с поддержанием требуемого качества электрической энергии. Будучи автономной или подключенной к национальной

энергетической сети, система MicroGrid может быть расположена в непосредственной близости от потребителя и производить электроэнергию «на месте», существенно снижая потери при передаче по проводам и повышая, таким образом, КПД.

В качестве объекта исследования выступает локальный источник энергоснабжения микрорайона (энергоблок) (рис. 1). Энергоблок включает в себя девять газопоршневых электрогенерирующих установок (ГПУ) мощностью по 1,98 МВт (одна из установок в резерве).

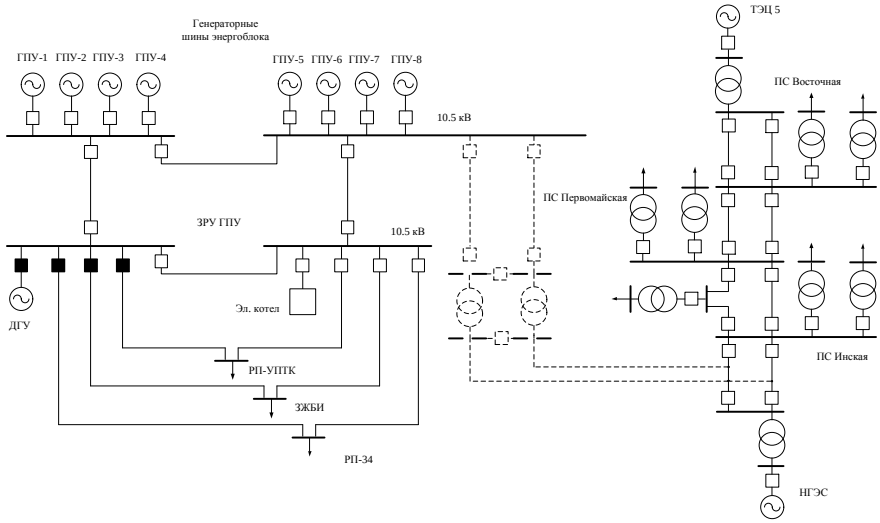


Рис. 1. Схема электроснабжения микрорайона

Потребителями электроэнергии выступают преимущественно жилые дома, величина нагрузки которых составляет 5,75 МВт, а также завод железобетонных изделий мощностью 4,9 МВт.

Для исследования динамических свойств MicroGrid как при изолированной работе, так и при работе параллельно с внешней сетью был проведен ряд нормативных возмущений, которые позволяют судить об устойчивости системы. На рис. 2 изображены графики переходных процессов при внезапном отключении двух генераторов в изолированной работе MicroGrid, на которых видно, что при снижении частоты до 48,8 Гц происходит отключение части нагрузки (ОН) для предотвращения дальнейшего развития аварии, что может неблагоприятно повлиять на работу потребителей.

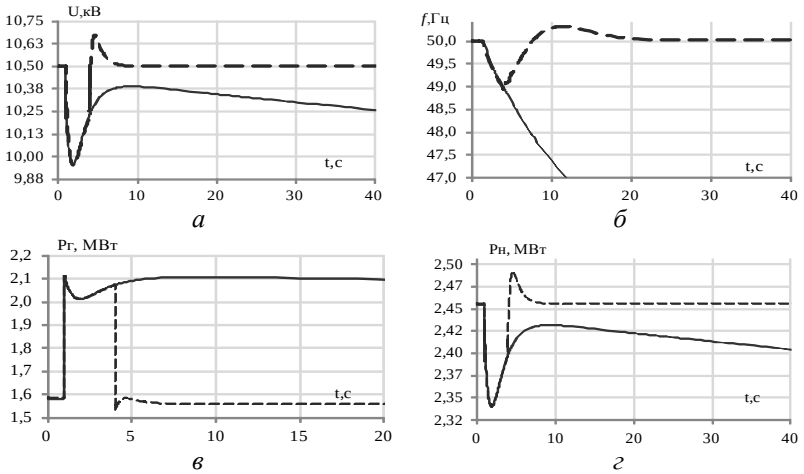


Рис. 2. Изменение напряжения на генераторной шине энергоблока, кВ (*а*); частота MicroGrid, Гц (*б*); изменение мощности генератора ГПУ, МВт (*в*); изменение мощности нагрузки при отключении генератора, МВт (*г*):

—— без противоаварийного управления; - - - с применением ОН

Для сравнения был проведен похожий опыт, но уже с отключением трех генераторов ГПУ и при параллельной работе MicroGrid с сетью. Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что после окончания переходного процесса все режимные параметры лежат в области допустимых значений, причем отклонения весьма незначительные и нет необходимости в ОН.

Рассмотрим вариант перехода MicroGrid в автономный режим работы вследствие короткого замыкания (КЗ) на кабельной линии (вторая кабельная линия отключена), соединяющей MicroGrid с сетью. КЗ происходит в момент времени $t = 1$ с, отключение линии с обеих сторон происходит после действия релейной защиты и отключения выключателей в $t = 1{,}065$ с (55 мс – время срабатывания вакуумного выключателя и 0,01 с – релейной защиты) (см. рис. 4).

Из графиков видно, что после нарушения связи с энергосистемой MicroGrid переходит в изолированный режим и находится на «самобалансе», наступает установившийся режим и все рассматриваемые параметры режима приходят в область допустимых значений, что свидетельствует об устойчивости системы.

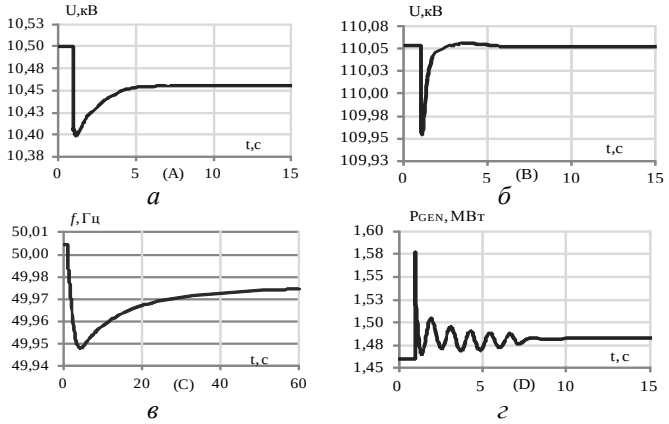


Рис. 3. Изменение напряжения на генераторной шине энергоблока, кВ (*а*); изменение напряжения на ПС Восточная, кВ (*б*); частота сети, Гц (*в*); изменение мощности генератора ГПУ, МВт (*г*)

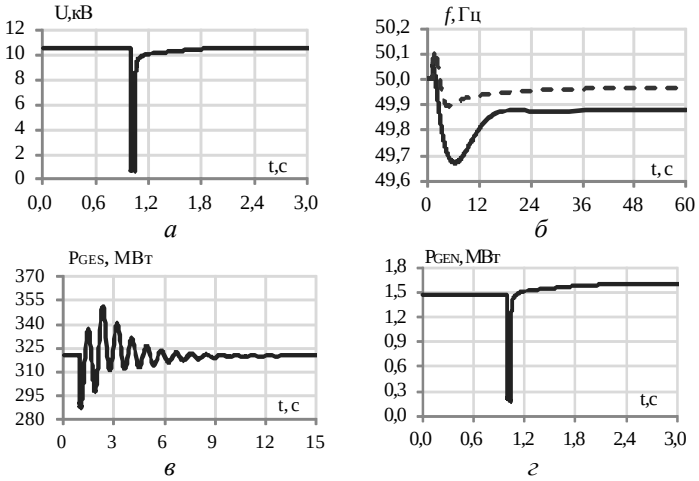


Рис. 4. Изменение напряжения на генераторной шине энергоблока, кВ (*а*); частота в MicroGrid (сплошная линия) и в сети (пунктирная), Гц (*б*); изменение мощности на НГЭС, МВт (*в*); изменения мощности генератора ГПУ, МВт (*г*)

При работе MicroGrid в составе энергосистемы необходимо соблюдать ряд требований [3] для обеспечения нормальных режимов работы сети, должна быть проработана система автоматического противоаварийного управления в конкретном случае, что включает в себя построение структуры, выбор необходимых средств, принципов, алгоритмов и устройств управления с применением FACTS-устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (дата обращения: 10.11.2014).
2. Проект реализации технологической платформы «Интеллектуальная энергетическая система России» / М-во энергетики Рос. Федерации, Рос. энерг. агентство. – М., 2010. – 169 с.
3. *Фишов А.Г.* Электрические сети с распределенной генерацией – Новые энергосистемы // Материалы XI форума «Современные технологии промышленной автоматизации», 7 мая 2014 г. – Новосибирск, 2014.

ТРОЙНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ОКОН

Н.Н. Смирнов, В.М. Захаров, Е.С. Румянцев

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, г. Иваново, colia@rambler.ru

В статье приводятся результаты натурных испытаний окон с теплоотражающими экранами в сертифицированной климатической камере. Разработана методика определения минимальной температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления в случае их использования. Разработана автоматизированная система регулирования теплоснабжения зданий с применением теплоотражающих экранов.

The study was based on the results of field tests of windows with heat-reflective shields in a certified climate chamber. A method of determining the required minimum indoor air temperature in the standby mode has been developed. An automated control system for heat supply of buildings with using of heat-reflective shields has been developed.

Согласно российским законам, с 1 января 2020 года годовая удельная величина расхода энергетических ресурсов в зданиях, строениях и сооружениях должна уменьшиться на 40 % по отношению к базовому уровню. Законодательные органы Европейского союза устанавливают коэффициент сопротивления теплопередаче окон к 2020 году на уровне 1,67…2,0 м^2 · °С/Вт, а Российские органы власти к 2016 году – на уровне 1,0…1,05 м^2 · °С/Вт.

Авторами были разработаны и запатентованы конструкции окон с теплоотражающими экранами панельного, рулонного и жалюзийного типа, выполненные из металла, которые значительно снижают тепловые потери. Применение экранов целесообразно в темное время суток или в отсутствие людей. Экраны могут располагаться внутри помещения, снаружи или в межстекольном пространстве. Применение экранов не только снижает тепловые трансмиссионные потери, но и позволяет понизить температуру воздуха при дежурном режиме отопления.

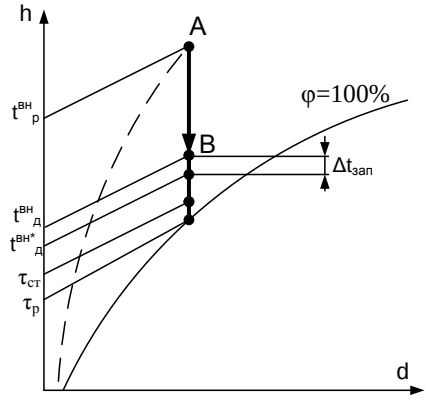
В сертифицированной климатической камере АНО «Ивановостройиспытания» были проведены исследования по изучению влияния применения теплоотражающих экранов в окнах на повышение сопротивления теплопередаче окон и снижения тепловых потерь. В качестве контроля использовался двухкамерный стеклопакет с формулой 4М1×10×4М1×10×4М1, а также стеклопакет с формулой 4М1×10×4М1×10×4И с нанесением на стекло низкоэмиссионного покрытия.

Данные испытаний теплоотражающих экранов в окнах с низкоэмиссионным покрытием

Вариант	Температура на внутреннем стекле t_w, °С	Приведенное сопротивление теплопередаче R, м^2 · °С/Вт	$R/R_{контроль2}$
Контроль 1 4М1×10×4М1×10×4М1	12,5	0,47	–
Контроль 2 4М1×10×4М1×10×4И	14,15	0,61	–
Два экрана с холодной стороны	18,65	1,757	2,89

Исходя из полученных данных (таблица) применение И-стекла (с низкоэмиссионным покрытием) дало увеличение сопротивления теплопередаче с 0,47 м^2 · °С/Вт до 0,61 м^2 · °С/Вт (на 29 %), а применение со стороны холодного отделения камеры дополнительно панели из

двух металлических экранов, размещенных на расстоянии 10 мм друг от друга, повысило сопротивление до 1,76 м^2 · °С/Вт (на 274 % к контролю 1 или на 189 % к контролю 2). При применении в окнах теплоотражающих экранов, установленных снаружи, также значительно повышается температура на внутреннем стекле. Следовательно, система автоматизации сможет дополнительно понизить температуру воздуха (рисунок) внутри помещения при дежурном режиме отопления (в отсутствие людей) при условии недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности стекла окна с повышенными теплозащитными свойствами (с применением теплоотражающих экранов).



К определению минимальной температуры воздуха при дежурном режиме отопления

Было выведено, что минимальную температуру внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления можно рассчитать как

$$t_{д}^{вн} = \frac{\tau_p \alpha_{вн} R_{окна} - t_{н}}{\alpha_{вн} R_{окна} - 1} + \Delta t_{зап}. \qquad (1)$$

Температуру точки росы воздуха, находящегося в помещении в рабочее время, можно определить по формуле Магнуса-Тетенса [1] с погрешностью ±0,2 °С (в диапазоне температур от 5 до 25 °С и в диапазоне относительных влажностей от 10 до 70 %):

$$\tau_{р} = \frac{b\gamma(t_{р}^{вн},\ \phi_{р}^{вн})}{a - \gamma(t_{р}^{вн},\ \phi_{р}^{вн})}. \qquad (2)$$

Авторами также была разработана и запатентована конструкция панели из теплоотражающих экранов с применением с наружной стороны солнечной батареи, состоящей, например, из тонкопленочных фотоэлементов. Использование солнечной батареи позволяет выраба-

тывать электрическую энергию, причем КПД преобразования солнечного света в электроэнергию достигает 20 %.

Получаем, что при применении окон с теплоотражающими экранами и солнечной батареей наблюдается тройной энергетический эффект: в отопительный период уменьшаются теплопотери за счет увеличения сопротивления окна, снижаются затраты теплоты на нагрев помещения за счет понижения температуры воздуха внутри помещения, а также происходит выработка электрической энергии.

Авторами также была разработана и запатентована автоматизированная система регулирования теплоснабжения зданий с применением теплоотражающих экранов, которая поддерживает оптимальную (заданную или рассчитываемую) температуру в жилых или производственных помещениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Barenburg A.W.T.* Psychrometry and psychrometric charts. – 3rd ed. – Cape Town, South Africa: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУЙНОГО ПРИВОДА НА ВЕЛИЧИНУ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ ЛОПАСТИ ВЕТРОУСТАНОВКИ

С.Н. Удалов, А.А. Ачитаев, Н.В. Зубова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, zubna85@gmail.com

Переменная генерируемая мощность ветряных электростанций – проблема, которую приходится решать при подключении ветрогенератора к сети. Поиск и разработка средств регулирования мощности турбины ветроэнергетических установок (ВЭУ) делает их конкурентоспособными традиционным энергоустановкам. Новым направлением в обеспечении энергоэффективного регулирования мощности турбины является применение форсуночного привода на сжатом газе и плазменных устройств, расположенных по поверхности лопасти.

Variable power generated by wind power plant – a problem that must be solved by connecting the wind turbine to the network. Search and development of management tools the power of wind turbines makes them competitive with traditional power plants. A new direction in providing en-

ergy-efficient power control is the use of a turbine nozzle drive on compressed gas and plasma devices located on the surface of the blade.

Анализ исследований этой проблемы

Турбина SmartGen, разработанная компанией Hybrid Turbines, является хорошо масштабируемой системой и может быть установлена как на небольшие мощности, от 3 до 100 кВт, так и на гигантские морские ветряки мощностью до 4 МВт [1].

Кроме стабилизации выходной мощности ветряной турбины подаваемый сжатый воздух будет поддерживать постоянную температуру, охлаждая компоненты генератора. Эта система позволяет сохранить избыточную энергию, производимую ВЭУ, в виде сжатого воздуха и использовать ее в часы пиковых нагрузок для раскрутки турбины.

Целью данной работы является разработка математической модели струйного привода форсуночного действия и оценка его влияния на подъемную силу лопасти ВЭУ.

Математическое моделирование

Уравнение Навье-Стокса, описывающее процессы аэродинамического взаимодействия [2]:

$$\rho\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}-\nabla\left[\eta\ \nabla\vec{u}+\ \nabla\vec{u}^{\ \mathrm{T}}\right]+\rho\ \vec{u}\cdot\nabla\ \vec{u}+\nabla p=\vec{F}\ , \qquad (1)$$

где $\vec{u}$ – скорость ветра, м/с; p – давление, Па; η – кинематическая вязкость, Па·с; $\vec{F}$ – сила давления, Н; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; ∇ – оператор набла; Т – оператор транспозиции.

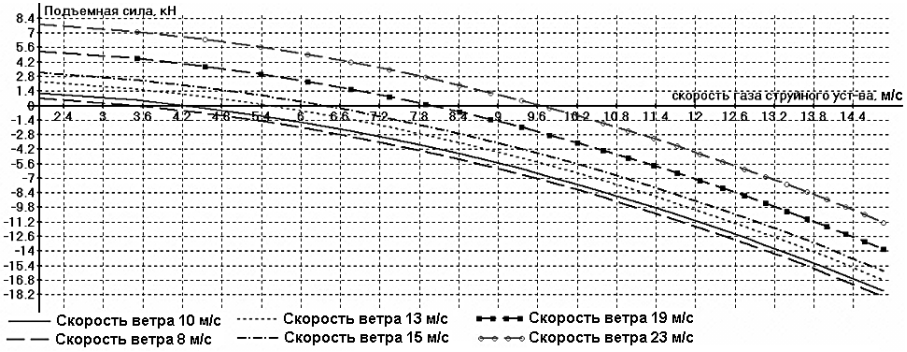
Расчет подъемной силы в условии реактивного истечения газа следует вести на основании динамики реактивного движения Мещерского. Подъемная сила, развиваемая лопастью при воздействии ветрового потока со скоростью υ, представлена формулой (2):

$$M\frac{d\upsilon}{dt}=\frac{1}{2}\pi R^2\rho\vartheta^2c_L+u\frac{dm}{dt}, \qquad (2)$$

где $u\dfrac{dm}{dt}$ – реактивная сила, Н; R – радиус лопасти, м; ϑ – скорость ветра, м/с; υ – линейная скорость лопасти, м/с; C_L – коэффициент подъемной силы; M – масса лопасти, кг; m – масса воздушной струи форсунки, кг; ρ – плотность воздуха, 1,225 кг/м^3.

Моделирование процессов, происходящих в турбине, проводилось на базе метода конечных элементов и расчета динамики потока computer fluid dynamic (CFD), позволяющего проанализировать физические процессы при влиянии дополнительных устройств на величину подъемной силы. Аэродинамические свойства лопастей с активным аэродинамическими устройствами моделировались с использованием специального алгоритма ARC2D, который применяется для анализа моделирования ламинарного течения [2]. За основу программного средства применялся комплекс ANSYS для анализа CFD. Алгоритмы ARC2D на основании решения двумерных уравнений Навье-Стокса были использованы для расчета аэродинамических коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления. Использование CFD позволяет последовательно определить изменения в аэродинамической производительности при выбранном профиле лопасти и изменения, связанные с активными аэродинамическими устройствами [3].

График, изображенный на рисунке, показывает зависимость подъемной силы от скорости газа в форсунке [4]. В зависимости от скорости ветра с помощью струйного привода возможно создать условия, когда значение подъемной силы будет поддерживаться постоянным даже при достаточно низкой скорости ветра. Учтем, что работа ВЭУ в режиме ограничения мощности осуществляется с помощью балластных сопротивлений, которые являются неэффективными и затратными. Исходя из этого следует, что при использовании компрессора в качестве балласта можно использовать на практике струйный способ управления турбиной.



Результаты моделирования влияния скорости истечения форсуночного привода на подъемную силу при различной величине скорости ветра

Такой подход позволит сократить время выхода ветроустановки на режим номинальной мощности и обеспечить постоянство скорости вращения ветроколеса.

Выводы

Из анализа результатов следует, что подъемная сила зависит от скорости истечения газа из форсунки, которая имеет область положительных и отрицательных значений. При этом возрастает на 40 % регулировочная характеристика ветровой турбины. Это дает возможность управления величиной подъемной силы в режиме ограничения мощности, когда использование традиционных способов управления (изменение угла атаки лопасти и увеличение механического момента генератора) не позволяет достичь цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mahony M.* Hybrid turbine: for when the wind doesn't blow [Electronic resource]. – Available at: http://www.smartplanet.com/blog/intelligent-energy/hybrid-turbine-for-when-the-wind-doesnt-blow/2496 (accessed: 10.11.2014).

2. *Pulliam T.H.* Efficient solution methods for the Navier-Stokes equations // Lecture Notes for the von Kármán Institute for Fluid Dynamics Lecture Series: Numerical Techniques for Viscous Flow Computation in Turbomachinery Bladings. – Brussels, Belgium, Jan. 20-24, 1986.

3. *Johnson S.J., van Dam C.P. "Case", Berg D.E.* Active load control techniques for wind turbines: Sandia report; sand 2008-4809 [Electronic resource] / Sandia National lab Albuquerque. – Albuquerque, New Mexico; Livermore, California, Aug. 2008. – 132 p. – Available at: http://windpower.sandia.gov/other/084809.pdf (accessed: 10.11.2014).

4. ElCut: [программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – URL: http://www.elcut.ru (дата обращения: 10.11.2014).

КОМПРОМИССНОЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И УПРАВЛЯЕМОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.Г. Фишов, И.Л. Клавсуц, Д.А. Клавсуц

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, klavsuts@mail.ru

Представлено решение задачи регулирования напряжения в распределительных электрических сетях при противоречивости интересов по напряжению сетевых компаний, включенных в сеть генерации, и потребителей электроэнергии. В качестве основного организационного принципа регулирования рассматривается децентрализованное регулирование, использующее локальные информацию и управляющие воздействия.

There was offered approaches solution to the problem of distributed voltage regulation in Smart Grid System. It takes into consideration the conflict of interests companies, dispersed generators and consumers of electricity. The decentralized regulation of voltage is supposed to be the basic organization principal, which uses local information and control actions.

Электрические сети развиваются в соответствии с интересами потребителей электроэнергии, присоединяемой генерацией, а также собственно сетевых компаний. Противоречивость этих интересов в части напряжения сети актуализирует разработку новых концепций, инновационных методов и устройств регулирования напряжения в электрических сетях. Представлено решение задачи регулирования напряжения в электрических сетях с учетом многообразия интересов субъектов на основе мультиагентной децентрализованной системы управления с контролем каждым из локальных регуляторов режима прилегающего района сети, а также использования нормализаторов напряжения на шинах потребителей.

Принципы осуществления мультиагентного регулирования напряжения:

- в нормальных режимах сети каждый субъект имеет право преследовать собственные цели регулирования, не препятствуя другим субъектам;

- при нарушениях нормального режима сети поведение субъектов подчиняется цели предотвращения развития и ликвидации возникших нарушений;
- при достижении целей каждый субъект эффективно использует собственные средства регулирования напряжения и доступную локальную информацию о режиме сети.

Принципы реализуются в распределенной системе управления за счет единых правил, образующих искусственный интеллект локальных устройств и подсистем управления.

1. *Управление потреблением электроэнергии и локальная нормализация напряжения на шинах нагрузки 0,4 кВ*

Оптимальным для потребителя является, как правило, стабильное напряжение на питающих шинах величиной несколько ниже номинального (на 0…5 %). Эту задачу в настоящее время потребитель может решать самостоятельно, используя для поддержания желаемого напряжения на питающих шинах нормализаторы напряжения, реализующие предлагаемый метод.

Суть метода состоит в применении коммутируемого вольтодобавочного трансформатора, мощность которого значительно меньше мощности нагрузки, что позволяет желаемым образом менять напряжение на нагрузке, ток и мощность нагрузки. КПД устройства около 99,7 %.

2. *Регулирование напряжения в прилегающих к узлам включения генерации районах*

Включенная в электрические сети генерация и потребители с управляемыми компенсаторами реактивной мощности могут оказывать коммерческие услуги по регулированию напряжения в прилегающем районе сети на соответствующем локальном рынке:

- сетевой компании – по поддержанию напряжения исходя из условия минимума потерь в прилегающем к узлу подключения генерации районе сети или максимума пропуска энергии по району сети;
- потребителям в узлах района сети, прилегающего к узлу подключения генерации, – по стабилизации напряжения на желаемом уровне в некоторых узлах сети, по поддержанию желаемого уровня напряжения в некоторых узлах сети или районе в целом.

3. *Регулирование напряжения сетевой компанией*

Регулирование напряжения сетевой компанией может осуществляться на основе трех концепций:

- централизованно путем заблаговременного планирования уставок локальных средств регулирования;

- централизованно путем управления устройствами регулирования напряжения в реальном времени;
- децентрализованно путем перехода в каждом узле его осуществления к мультиагентному регулированию в реальном времени.

Мультиагентное (децентрализованное) регулирование способно обеспечить компромиссное регулирование напряжения в интересах всех субъектов, участвующих в процессе: сетевой компании, потребителей, распределенной генерации, а также создать технологическую основу локальных рынков услуг по регулированию напряжения в сети.

В основу мультиагентного регулирования напряжения в электрических сетях могут быть положены контроль режима прилегающего района сети и общие (единые) базы правил.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фишов А.Г.* Интеллектуальная электрическая сеть – революция в отношениях субъектов и управлении режимами электроэнергетических систем // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. труды III междунар. науч.-техн. конф.: сборник статей, Екатеринбург, 22–26 окт. 2012 г.: в 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 1. – С. 91–97.
2. Method and apparatus for regulating voltage: U.S. Patent № 7816894 B2 / inventors: L.Z. Feigin, P.L. Kosoy, D.A. Klavsuts, S.V. Levinzon; filed: 20.06.2007; issued: 19.10.2010.
3. Способ регулирования напряжения узла электрической сети: патент 1372465 Российская Федерация / А.Г. Фишов, В.В. Денисов, Б.Б. Кобец. – № 3937357/24-07; заявл. 01.08.85; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5; приоритет 08.07.1993.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. PCT WO 2010/033053. Alternating voltage stabilizer with protection elements (embodiments). Int. CI. G05F 1/30 / L.Z. Feigin, S.V. Levinson, I.L. Klavsuts et al. – 25.03.2010. – [Международная заявка на изобретение № PCT/RU2009/000441, опубликованная в соответствии с законом о патентной кооперации (PCT)].
6. *Джурабаев К.Т., Клавсуц И.Л., Клавсуц Д.А.* Развитие систем интегрированного управления электросбережением предприятий промышленности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2010. – Т. 5, № 107. – С. 78–81.

Подсекция 2. УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПОЛНЫЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, tbf@list.ru

В статье описывается способ получения полных вероятностных характеристик многомерных функциональных зависимостей по методу селекции границ интервалов входных и выходных данных. Приводятся результаты применения метода для определения законов распределения вероятностей параметров режимов в электроэнергетике.

This paper describes a method for producing of full probabilistic characteristics of multidimensional functional dependencies using a method of selection the interval boundaries of the input and output data. The results of the method application on the definition of the distribution law of mode parameters' probability in the power industry are presented.

В различных отраслях, в том числе и в электроэнергетике, возникают задачи оценки рисков перегрузки, аварийной потери и разрушений за счет превосходства фактическими величинами регламентных эксплуатационных пределов либо вследствие снижения ресурсных параметров относительно регламента. Для этого требуется знание полных вероятностных характеристик интересующих параметров в виде законов распределения вероятностей. В электроэнергетике это параметры установившихся режимов и электрические величины при по-

вреждениях – обрывах и коротких замыканиях (КЗ). Те и другие являются функциональными зависимостями (ФЗ) необозримо большого количества аргументов.

Принято рациональным рассматривать параметры режимов, а посредством них – и электрические величины при повреждениях через аргументы активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов и активных мощностей и напряжений генераторных узлов. В таком случае, согласно проведенным исследованиям [1], полные вероятностные характеристики в виде функций распределения вероятностей (ФРВ) и плотностей распределения вероятностей (ПРВ) удовлетворяют нормальным законам распределения вероятностей (ЗРВ). Представительную статистику для параметров режимов и электрических величин при повреждениях получить затруднительно, однако при известных ЗРВ аргументов и известной ФЗ параметров режимов естественным является предложение разработать метод формирования ЗРВ функциональных зависимостей параметров режимов по ЗРВ аргументов ФЗ. Такой метод был разработан и назван селекцией границ интервалов входных и выходных данных (СГИД). Одна из его модификаций представлена в [2].

Суть метода СГИД основывается на логичном предположении, что если все аргументы ФЗ задать как равновероятные, то результат преобразования ФЗ будет иметь ту же вероятность. Реализация данной процедуры может быть осуществлена через ФРВ и ПРВ каждого аргумента и результата преобразования ФЗ. ФРВ при этом, как неубывающая функция случайного объекта, гарантирует однозначность всех задаваемых и получаемого данных, а ПРВ при этих данных обеспечивает сопоставление каждого из указанных данных (аргументов и ФЗ) в виде равенства вероятностей принятия значений из интервалов, пристыкованных, соответственно, одной из своих границ к аргументам неубывающих одномерных ФРВ. Вторыми границами, соответственно, являются также аргументы указанных ФРВ, определяемых, исходя из равенства вероятностей принятия значений, каждым данным (исходным данным-аргументом и выходным данным-ФЗ), вычисляемым по ПРВ каждого из этих данных. Границы интервалов аргументов и получаемого результата преобразования ФЗ жестко зафиксированы квантилями порядков, определяемых одинаковыми значениями своих ФРВ, и одинаковыми вероятностями принятия значений из этих интервалов. При этом порядок квантилей или ФРВ аргументов и на другой (правой) границе интервалов находятся путем прибавления к одинаковым

значениям ФРВ на предыдущей (первой) границе интервалов одинаковых вероятностей принятия значения из этих интервалов, а результата преобразования ФЗ − путем прибавления или вычитания такой же вероятности в зависимости от возрастания или убывания ФЗ.

Проверка правильности предположений и методик расчета метода СГИД велась на примере модели Сибирской энергосистемы в ВРК «Мустанг». Исследуемым объектом была выбрана линия 500 кВ Итат – НА. Предметом исследования являлось получение перетока активной мощности в линии, нахождение функции и плотности распределения вероятностей полученного перетока. В ходе эксперимента были рассчитаны установившиеся режимы для каждого порядка квантиля из заранее сформированного ряда и сняты показания. По окончании эксперимента была получена сводная таблица значений ФРВ и ПРВ, построены соответствующие графики (рис. 1 и 2).

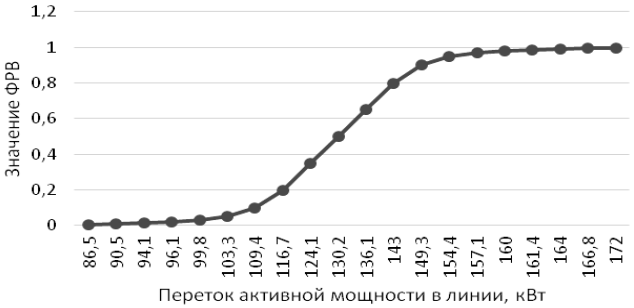


Рис. 1. ФРВ перетока активной мощности в линии

Рис. 2. ПРВ перетока активной мощности в линии

Можно наблюдать, что ПРВ активной мощности имеет достаточно плавную структуру, схожую со структурой нормального закона распределения.

В ходе ряда экспериментов было произведено формирование ЗРВ активной и реактивной мощностей различных линий, напряжения, угла напряжения, получение мгновенных значений ПРВ в узлах Сибирской энергосистемы, на основании которых можно заявить, что использованные положения метода СГИД являются правильными и метод СГИД выполняет свою функцию определения ЗРВ выходных результатов ФЗ по ЗРВ исходных данных. Положительные результаты применения метода СГИД для задачи режимов позволяют поставить задачи применения этого метода для решения разных проблем электроэнергетики и других отраслей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тимченко В.Ф.* Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.

2. Вероятностный метод селекции границ интервалов данных для задач электроэнергетики / А.В. Шмойлов, Л.В. Кривова, Е.И. Стоянов, К.В. Игнатьев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8/1. – С. 146–157.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЕТЕЙ С ЧЕТЫРЕХФАЗНЫМИ ПЕРЕДАЧАМИ

Д.И. Близнюк, П.Ю. Банных, А.И. Хальясмаа

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, d.i.bliznyuk@gmail.com

Статья посвящена задаче адаптации методов расчета и анализа установившихся режимов сетей с четырехфазными передачами на основе разработанных моделей четырехфазных линий электропередач и фазопреобразующих трансформаторов. В основе исследования лежат уравнения узловых напряжений для трех-, четырехфазных и смешанных (комбинированных трех- и четырехфазных) передач. В исследовании авторами разработан и реализован алгоритм автоматизированной адаптации параметров четырехфазной ЛЭП к модели расчета установившегося режима программного комплекса RastrWin.

The paper is devoted to the problem of power flow calculation and steady state analysis methods adaptation for four-phase electrical grids. These methods are based on developed models of four-phase power lines and phase converting transformers. The basis of research is nodal voltages equations for three-phase, four-phase and mixed (combined by three- and four-phase elements) grids. Algorithm of four-phfase elements parameters automized adaptation for power flow calculation model of "RastrWin" software have been developed.

Сегодня в России четырехфазные электрические сети высоких и сверхвысоких классов напряжения практически не используются, так как они недостаточно изучены. Основной проблемой является отсутствие математических моделей оборудования четырехфазных электропередач (ЧЭП) и практических методов расчета как четырехфазных сетей, так и смешанных сетей, включающих в себя и трехфазные, и четырехфазные элементы.

В статье описаны модели основных элементов ЧЭП – линии электропередачи и фазопреобразующего трансформатора (ФПТ). Для расчета установившихся режимов четырехфазной ЛЭП используется распространенная П-образная схема замещения, для которой реактивное сопротивление проводников рассчитывается особым образом. В модель ФПТ включен фазоповоротный элемент, изменяющий число фаз и фазовый угол. Подробнее модели описаны в [2, 3].

В работе выполнен анализ установившихся режимов четырехфазных и смешанных сетей с использованием уравнений узловых напряжений (УУН) согласно [4, 5]. УУН для четырехфазных сетей будет отличаться от УУН трехфазных в связи с различием в расчетах полной мощности для этих систем.

На основе полученных формул расчета четырехфазных сетей был разработан алгоритм для программного комплекса RastrWin, который позволяет выполнять расчет четырехфазных и смешанных сетей, в том числе на основе существующих моделей сетей.

Для оптимального выбора дальней электропередачи следует рассматривать ряд альтернатив [6, 7], одной из которых должна быть ЧЭП. Полученные в ходе данной работы результаты позволяют анализировать режимы работы сетей после подключения к ним четырехфазных элементов, что позволяет выполнять сравнительный анализ и принимать обоснованные проектные решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mazzanti G., Quaia S.* Four-phase AC connections: an alternative possibility for the expansion of transmission grids // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25, iss. 2. – P. 1010–1018.
2. *Guangye L., Yihan Y.* Three-phase-to-four-phase transformer for four-phase power-transmission systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, iss. 4. – P. 1018–1022.
3. *Красильникова Т.Г.* Схема замещения трансформатора для преобразования трехфазной системы переменного тока в четырехфазную // Труды 3 международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт». – Омск, 2007. – Ч. 2. – С. 14–19.
4. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин, В.Г. Неуймин; под ред. П.И. Бартоломея. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 256 с.
5. Программный комплекс «RastrWin3». Руководство пользователя / В.Г. Неуймин, Е.В. Машалов, А.С. Александров, А.А. Багрянцев. – [Б. м.], 2012. – 243 с.
6. Power transmission over long distances: economic comparison between HVDC and half-wavelength line / M. Lima dos Santos, J.A. Jardini, R.P. Casolari, R.L. Vasquez-Arnez, G.Y. Saiki, T. Sousa, G.L.C. Nicola // IEEE Transactions on power delivery. – 2014. – Vol. 29, iss. 2. – C. 502–509.
7. *Бушуев В.В., Красильникова Т.Г., Самородов Г.И.* Дальние электропередачи переменного и постоянного тока и их сравнительный анализ // Электро. – 2012. – № 2. – С. 2–7.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕДИНЕННОГО РЕГУЛЯТОРА ПОТОКА МОЩНОСТИ

Д.И. Гладкий, С.Н. Едемский, М.Л. Ивлев

Институт судостроения и морской арктической техники филиала Северного (арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова в г. Северодвинске, г. Северодвинск, d.gladkiy@narfu.ru

Объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ) представляет собой устройство на основе силовой электроники, имеющее возможность контролировать потоки мощности через линию. Результаты моделирования устройства протестированы на модели электроэнергетической системы Архангельской области, созданной в Matlab Simulink.

Unified Power Flow Controller (UPFC) is a power electronic based device that has capability of controlling the power flow through the line. The simulation results device are tested on the Arkhangelsk region power system model, created by Matlab Simulink.

Решению задач современной электроэнергетики традиционно уделяется значительное внимание как у нас в стране, так и во всем мире. Это, прежде всего, задачи снижения потерь электрической энергии в электроэнергетических системах, повышение пропускной способности линий электропередач, улучшение управляемости режимов системы и качества электроэнергии [1, 2]. Решение этих задач требует применения новых технических подходов, связанных с использованием устройств регулирования, основанных на современных достижениях силовой электроники, таких как ОРПМ (объединенный регулятор потока мощности), способных одновременно воздействовать на несколько параметров энергосистемы [3].

Общая протяженность воздушных и кабельных сетей Архангельской области свыше 26 000 км. С учетом того, что крупнейшие производители электроэнергии находятся на территории Северодвинска и Архангельска, на юге области появляются значительные скачки напряжения. Территориально все электростанции объединены в два энергетических узла: Архангельский – на севере области и Котласский – на юге, расположенных на расстоянии 600 км друг от друга и связанных между собой линиями электропередач с напряжением 220 и 110 кВ.

Однолинейная схема исследуемой электроэнергетической системы представлена на рис. 1.

Предварительный анализ показал, что рациональным местом установки устройства ОРПМ в ЭЭС Архангельской области являются места в районе г. Коноша или в районе г. Вельска.

В статье приведены результаты исследования одного из наиболее характерных режимов работы ЭЭС, который характеризуется подключением дополнительной нагрузки в ЭЭС.

В таблице приведены результаты моделирования установившихся значений напряжений во всех основных точках энергосистемы.

Для примера, на рис. 1 приведено изменение уровня напряжения в районе г. Нямдома при обычной работе энергосистемы (до пяти секунд), а также (с пятой секунды) после подключения дополнительной нагрузки в районе г. Вельска.

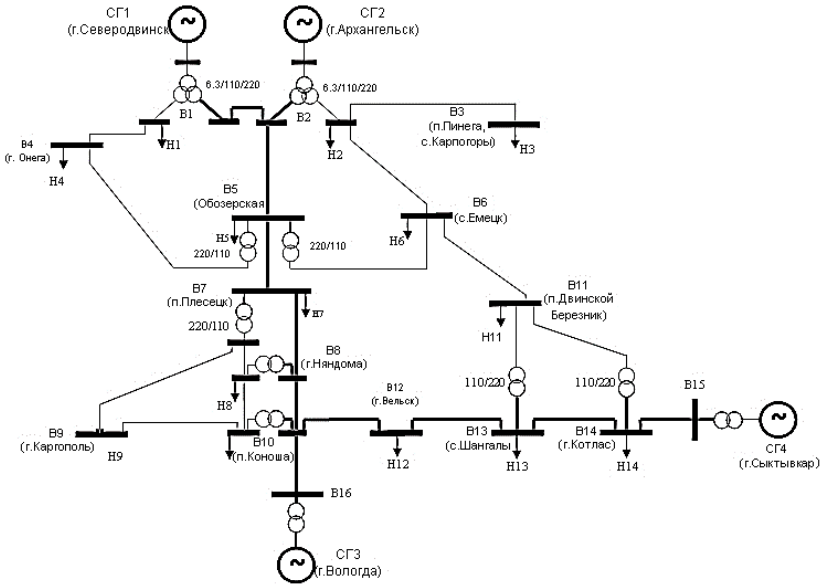


Рис. 1. Схема замещения электроэнергетической системы Архангельской области

Установившееся значение уровня напряжения

Шина	При включении нагрузки, о.е.	При отключении нагрузки, о.е.	При включении нагрузки, о.е.	При отключении нагрузки, о.е.
	без ОРПМ		с ОРПМ	
B1	0,98	0,99	0,98	1,00
B2	0,95	0,97	0,97	0,98
B3	0,94	0,95	0,95	0,97
B4	0,94	0,96	0,96	0,97
B5	0,92	0,95	0,96	0,97
B6	0,90	0,92	0,94	0,95
B7	0,87	0,94	0,91	0,97
B8	0,85	0,94	0,89	0,98

Окончание таблицы

Шина	При включении нагрузки, о.е.	При отключении нагрузки, о.е.	При включении нагрузки, о.е.	При отключении нагрузки, о.е.
	без ОРПМ		с ОРПМ	
B9	0,84	0,92	0,87	0,94
B10	0,86	0,94	0,90	0,97
B11	0,86	0,88	0,93	0,94
B12	0,79	0,83	0,94	0,97
B13	0,81	0,85	0,94	0,97
B14	0,87	0,90	0,96	0,97
B15	0,93	0,95	0,98	0,99
B16	0,87	0,91	0,95	0,98

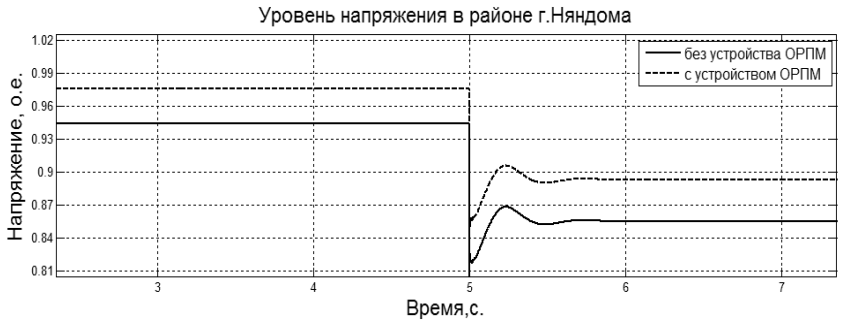


Рис. 2. Изменение уровня напряжения в районе г. Нямдома

Использование устройства ОРПМ в энергосистеме Архангельской области позволит обеспечить следующее:

– улучшить функционирование энергосистемы Архангельской области;

– повысить пропускную способность линий электропередач энергосистемы Архангельской области;

– стабилизировать напряжение в узлах потребления электроэнергии энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андерсон П., Фуад А.* Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980. – 285 с.

2. *Воропай Н.И.* Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы [Электронный ресурс] // Автоматизация и IT в энергетике. – 2011. – № 3 (20). – С. 11–15. – URL: http://www.transform.ru/articles/html/12reforma/ref00090.article (дата обращения: 10.11.2014).

3. *Кочкин В.И., Нечаев О.П.* Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: ЭНАС, 2002. – 248 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНЫХ ГИДРОТУРБИН С УЧЁТОМ ПРОПЕЛЛЕРНЫХ РЕЖИМОВ

Г.В. Глазырин, Ю.В. Казанцев, Н.Н. Твердохлебов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, kazancev.yury@gmail.com

В работе рассматриваются вопросы моделирования основных элементов гидростанции: водовода, турбины и генератора в переходном режиме. Предложен новый способ представления процесса гидравлического удара в водоводе в интегральной форме. Разработана модель поворотно-лопастной турбины, учитывающая пропеллерные режимы и изменение скорости вращения турбины в переходном процессе. Предложенная модель реализована в пакете Simulink и проверена с использованием данных испытаний реальной турбины.

In this paper simulation of basic elements of hydro power plant (penstock, turbine and generator) is considered. New integral method of water hammer effect representation with elastic water column is proposed. The model of Kaplan turbine in propeller modes, considering the change of rotor speed during the transient process is developed in Simulink simulation environment and tested for the case of real experimental data.

Гидростанции, являясь одним из старейших способов получения электроэнергии, все же сталкиваются с рядом проблем, в-частности с необходимостью улучшения качества переходных процессов. С ростом вычислительных мощностей увеличилась точность моделирования процессов, что дало возможность более полно анализировать переходные процессы гидротурбин.

При моделировании переходных процессов гидротурбин любая гидростанция может быть представлена с помощью следующих основных элементов: водовода, турбины, генератора, систем управления турбиной, а также нагрузки [1].

Динамика водовода в основном определяется явлением гидроудара, который может быть определен двумя способами: жесткий гидроудар или упругий.

Упругий гидроудар описывается следующими уравнениями [2]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g\frac{\partial H}{\partial l}, \qquad \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial l}, \tag{1}$$

где v и H – скорость течения воды и напор в произвольной точке, являющиеся функциями времени t и координаты l вдоль трубопровода; a – скорость распространения волны давления; g – ускорение свободного падения.

На большинстве гидростанций мира установлены гидротурбины трех основных типов: радиально-осевые, ковшевые или поворотно-лопастные (ПЛ).

В данной статье рассмотрены наиболее сложные с точки зрения моделирования ПЛ турбины. Главной особенностью этого типа турбин является наличие поворачивающихся лопаток рабочего колеса, способных менять угол наклона, тем самым меняя основные характеристики турбины.

В [1] и [5] модели турбины представлены без учета угла поворота лопастей РК, т. е. не рассматриваются крайне важные пропеллерные режимы, в каждом из которых турбина имеет существенно разные характеристики.

Упругий гидроудар (1) для водовода длиной L_{dr} и поперечным сечением A_{dr} также может быть представлен в интегральной форме:

$$q_{drin} = \frac{1}{T_{wdr}}\int_0^t (h_{drin} - h_{drout} - R_{dr}q_{drin}^2)dt + q_{drini}, \tag{2}$$

$$h_{drout} = \frac{1}{T_{ldr}}\int_0^t (q_{drin} - q_{drout})dt + h_{drouti},$$

где q_{drin}, h_{drin} – расход и напор на входе водовода, а q_{drout}, h_{drout} – на выходе водовода (являются расходом Q_t и напором турбины H_t); q_{drini}, h_{drouti} – начальные значения; T_{wdr} – постоянная времени водовода, T_{ldr} – постоянная водовода.

Мощность гидравлической турбины вычисляется по следующей формуле [2]:

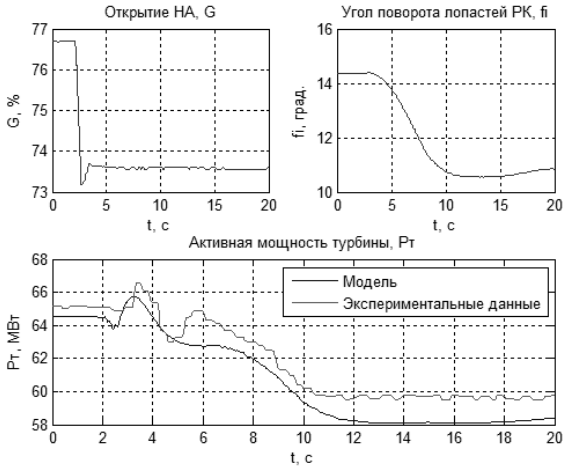
$$P_t = 9{,}81 Q_t H_t \eta_t, \tag{3}$$

где Q_t – расход и η_t – КПД для ПЛ турбины являются нелинейными функциями четырех переменных (H – напор турбины, n – скорость вращения турбины, G – открытие направляющего аппарата, fi – угол поворота лопастей РК).

Q_t и η_t могут быть получены из главной универсальной характеристики модели турбины или натурных испытаний турбины.

В данной работе расход турбины получен с использованием данных испытаний Новосибирской ГЭС.

Выражения (1) – (3) были реализованы в пакете Simulink и применены для моделирования переходного процесса ПЛ турбины Новосибирской ГЭС (рисунок).



Сравнение переходного процесса турбины Новосибирской ГЭС с моделью

Вывод. Предложенная модель позволяет точно описать переходный процесс ПЛ турбины с учетом упругого гидравлического удара и широкого спектра пропеллерных режимов работы турбины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies: IEEE Working Group report // IEEE Transaction on Power Systems. – 1992. – Vol. 7, iss. 1. – P. 167–179.
2. *Пивоваров В.А.* Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. – Л.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
3. *Schniter P., Wozniak L.* Efficiency based optimal control of Kaplan hydrogenerators // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 1995. – Vol. 10, iss. 2. – P. 348–353.
4. Pelton turbine needle control model development, validation, and governor designs / R.M. Johnson, J.H. Chow, M.V. Dillon // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2013. – Vol. 135, iss. 1. – P. 11015–11024.
5. *Глазырин Г.В., Казанцев Ю.В.* Исследование динамических характеристик системы «регулятор–турбина» Новосибирской ГЭС // Электро. – 2013. – № 4. – С. 16–19.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТОДОМ УРАВНИВАНИЯ УДЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ С УЧЕТОМ НАПОРА НЕТТО

Г.В. Глазырин, Н.Н. Твердохлебов, Ю.В. Казанцев

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, nn.tverd@gmail.com

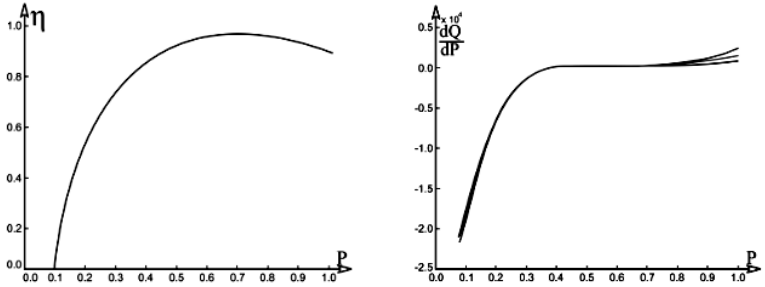
В работе рассматриваются вопросы оптимизации энергетических режимов агрегатов гидроэлектростанций. Предложен новый метод распределения активной нагрузки, принимающий во внимание потери напора на сороудерживающих решетках гидроагрегатов. Определены целевая функция и ее ограничения, отвечающие реалиям производства электроэнергии на ГЭС. Разработан новый алгоритм оптимального распределения мощности путем уравнивания относительных приростов расхода энергоносителя агрегатов.

In this paper optimization of hydropower plant units' regimens is considered. A new method of active power distribution optimization that takes

into account head loss in trash screens is proposed. An objective function and its constraints are defined. A new optimization algorithm equalizing the incremental rate of water consumptionis developed.

На электростанциях с однотипным оборудованием допускается считать, что характеристики гидроагрегатов одинаковы (рис. 1, *а*), а это значит, что при распределении нагрузки между генераторами в равных долях от задания выполняется условие равенства удельных приростов [2].

$$P_1 = ... = P_i = ... = P_n \Rightarrow Q_1 = ... = Q_i = ... = Q_n . \qquad (1)$$



а *б*

Рис. 1. Характеристика КПД гидроагрегата (*а*); функция удельного прироста расхода энергоносителя (*б*)

На самом деле характеристики гидроагрегатов различны, и условие (1) не выполняется. В таком случае можно оптимизировать распределение активной мощности для снижения расхода воды на станции.

В статье предлагается решать задачу оптимизации суммарного расхода не непосредственно, как предложено в [2], а путем уравнивания удельных приростов расхода всех работающих агрегатов.

На рис. 2 представлена блок-схема предлагаемого алгоритма оптимизации, основанного на методе градиентного спуска. Он включает в себя следующие блоки.

1. Загрузка в память данных о составе работающих агрегатов, их рабочих характеристиках и суммарном задании мощности.

2. Определение коэффициента засоренности СУР из условия пропорциональности потерь в водоводе квадрату расхода жидкости [3].

Рис. 2. Блок-схема алгоритма

Этот коэффициент можно найти из текущих параметров режима агрегата по формуле

$$k_{\Delta Hi} = \frac{H_{\text{бр}} - H_{HEi\ \text{тек}}}{Q^2_{Ti\ \text{тек}}}.$$

Следует отметить, что определение $k_{\Delta Hi}$ должно производиться по параметрам установившегося режима [4].

3. Построение рабочих характеристик гидроагрегатов, учитывающих изменения напора нетто, с определенным шагом изменения мощности $P_{\Gamma i}$ путем решения системы уравнений, выведенной в [2]:

$$\begin{cases} Q_{Ti} = \dfrac{P_{\Gamma i}}{9.81\eta_{\Gamma Ai} H_{HEi}}, \\ H_{HEi} = f_{Hi}\ \ Q_{Ti}\ , \\ \eta_{\Gamma Ai} = f_{\eta i}\ \ H_{HEi}, P_{\Gamma i}\ . \end{cases}$$

4. Определение удельных приростов для всего диапазона мощностей через определенный шаг ΔP применением метода кубической интерполяции.

5. Назначение начальных мощностей гидроагрегатам с помощью генератора случайных чисел. Эти мощности должны удовлетворять условиям:

$$P_З = \sum_{i=1}^{n} P_{ГAi} ,$$

$$P_{ГAi}^{min} \le P_{ГAi} \le P_{ГAi}^{max} .$$

6. Определение удельных приростов расхода для текущих индивидуальных заданий мощностей агрегатов методом кубической интерполяции.

7. Определение среднего значения прироста для агрегатов, которое следует считать оптимальным на данном этапе расчета. Данная информация используется для определения направления и величины изменения вырабатываемой мощности генераторов.

8. Определение шага изменения мощности и назначение новых индивидуальных заданий по формулам, представленным ниже:

$$\Delta P_i = \Delta P_{const} (b_{сред} - b_i);$$

$$P_i = P_i + \Delta P_i .$$

Этапы 1–5 представляют собой предварительные расчеты, а 6–8 повторяются в цикле.

Тестирование алгоритма в пакете MATLAB дало следующие результаты:

- Расчет 5000 итераций – 19,7312 секунды.
- Максимальное отклонение от оптимального решения за 100 секунд – 0,009933333 МВт.
- Решение с точностью 1% – 13,07639 секунд.

Вывод. Приведенные результаты говорят о том, что предложенный метод может быть использован в процессе автоматической оптимизации режимов гидроэлектростанций с учетом напора нетто агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дроздов А.Д.* Автоматизация энергетических систем. – М.: Энергия, 1977. – С. 97.

2. *Глазырин Г.В., Твердохлебов Н.Н., Казанцев Ю.В.* Оптимальное распределение мощности между агрегатами гидроэлектростанции с учетом напора нетто // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4 (53). – С. 150–155.

3. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические потери на трение в трубопроводах. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 27–57.

4. *Кривченко Г.И.* Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках. – М.: Энергия, 1975. – С. 298–305.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТЭС

Г.В. Глазырин, С.М. Шаюк

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Serzh_1k@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы группового управления мощности тепловой электрической станции. Предложен алгоритм группового регулирования активной мощности для ТЭС, распределяющий между энергоблоками плановое, вторичное и первичное задания. При расчете задания мощности учитываются первичные и вторичные резервы, размещаемые на блоках. Работа алгоритма проверена на математической модели тепловой станции.

In this paper group control of a thermal power plant units' is considered. A new algorithm of group active power control for a thermal power plant that distributes power between power unit is proposed. The algorithm is tested at the mathematic model.

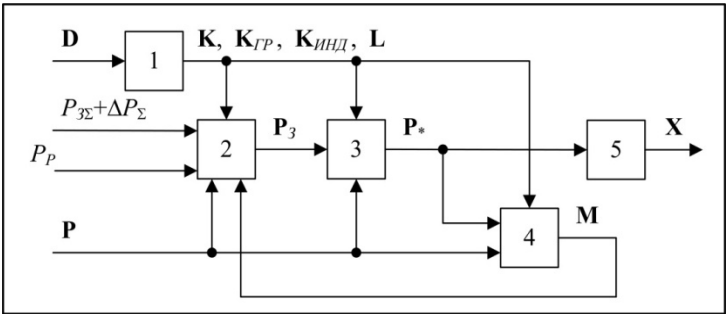
На тепловых электростанциях с однотипным оборудованием допускается считать, что энергетические характеристики энергоблоков одинаковы, а это значит, что распределение активной нагрузки между энергоблоками в равных долях оптимально.

На самом деле энергетические характеристики даже одинаковых энергоблоков могут отличаться вследствие как конструктивных особенностей, так и различным состоянием оборудования, опреде-ляемым в том числе условиями эксплуатации. В этих условиях равномерное распределение мощности не является эффективным.

В энергосистеме России в автоматическом режиме задачи регулирования перетоков мощности и восстановления частоты до номинального значения принято решать изменением мощности ГЭС. ТЭС только ограничивают отклонения частоты при большом небалансе мощно-

сти. С ростом потребления и сложности энергосистемы ГЭС становится недостаточно и встает вопрос о привлечении ТЭС к регулированию перетоков. Актуальной становится задача разработки алгоритмов группового управления мощностью тепловой станции при регулировании энергосистемных параметров.

Процесс группового регулирования активной мощности для группы энергоблоков состоит из пяти этапов, повторяющихся циклически (рисунок).



Алгоритм ГРАМ для ТЭС:

D – вектор дискретных сигналов, характеризующих режимы работы агрегатов; $\mathbf{P}_{З\Sigma}$ – задание активной мощности группы; **P** – вектор измеренных активных мощностей; **К** – множество номеров агрегатов в составе группы, управляемых ГРАМ (групповое или индивидуальное управление); $\mathbf{К}_{ГР}$, $\mathbf{К}_{ИНД}$, **L** – множества номеров агрегатов в составе группы на групповом, индивидуальном и ручном управлении соответственно; **M** – множество номеров агрегатов, для которых выявлены ошибки управления; $\mathbf{P}_З$ и $\mathbf{P}_*$ – векторы статических и динамических заданий активной мощности агрегатов соответственно; $\mathbf{P}_Р$ – вектор вторичных и первичных резервов, размещаемых на энергоблоках; **X** – вектор управляющих сигналов на САУМ энергоблока

На этапе 1 происходит определение состава управляемых агрегатов. Агрегат считается управляемым, если он работает в режиме СГ в составе группы либо на индивидуальном управлении через ГРАМ, а также если отсутствует входной дискретный сигнал «Разгрузка по активной мощности».

На этапе 2 выполняется расчет статических заданий активной мощности энергоблоков. Под статическим заданием здесь понимается требуемая мощность генератора в установившемся режиме. Статическое здание может рассчитываться с учетом оптимального распределения

по критерию расхода топлива, атмосферных выбросов, надежности основного оборудования. По критериям оптимизации распределяется только плановое задание по мощности, внеплановое распределяется между энергоблоками пропорционально размещаемым вторичным резервам. Если мощность станции возрастает, то мощность отдельного энергоблока уменьшаться не должна.

Величина $\mathbf{P}_З$ ограничивается уставками $\mathbf{P}_{Зmin}$ и $\mathbf{P}_{Зmax}$, определяемыми границами регулировочного диапазона. Кроме того, величина $\mathbf{P}_З$ ограничивается величиной первичного и вторичного резерва, размещаемого на блоках, выделенных для автоматического вторичного и первичного регулирования.

Затем, на этапе 3, выполняется расчет динамических заданий активной мощности энергоблоков. Предусматривается разбиение на две зоны регулирования. Это обеспечивает плавное регулирование при небольших отклонениях текущего значения мощности от статического задания. Если отклонение мощности агрегата от задания превышает $\Delta P_{точн}$, то активная мощность находится в зоне грубого регулирования. При этом динамическое задание меняется с максимальной скоростью. Если же отклонение мощности меньше $\Delta P_{точн}$, то мощность изменяется до достижения мощности задания либо пока разность текущей мощности и мощности задания не станет меньше зоны нечувствительности для энергоблока. Зона нечувствительности предусматривается для каждого агрегата, чтобы уменьшить колебания суммарной активной мощности группы в установившемся режиме. Один из агрегатов работает без зоны нечувствительности, а для остальных при $|P - P_З| < \Delta P_{нечувств}$ динамическое задание поддерживается неизменным.

На этапе 4 определяется ошибка управления агрегатом (называемая также ограничением по активной мощности), которая фиксируется при условии $|P - P_*| > \Delta P_{огр.сраб}$, а также при $P_З = P_{Зmin}$ или $P_З = P_{Зmax}$. После обнаружения ошибки для выявления ее отсутствия необходимо одновременное выполнение следующих условий $|P - P_*| > \Delta P_{огр.возвр}$, $P_З \neq P_{Зmin}$, $P_З \neq P_{Зmax}$.

На этапе 5 производится передача управляющих воздействий в САУМ энергоблока. Управляющие сигналы, соответствующие динамическому заданию, передаются в САУМ энергоблока. Предусматривается запись сигнала и последующая его архивация.

Работа данного алгоритма проверена на математической модели станции в пакете Mathlab. Проверка показала работоспособность алгоритма.

Вывод. Приведенные результаты говорят о том, что предложенный алгоритм может быть использован в процессе автоматизации тепловых электрических станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 59012820.27.100.002-2013. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности. – Взамен СТО 59012820.27.100.002-2005 (СТО СО – ЦДУ ЕЭС 001-2005); введ. 25.04.2013. – М., 2013. – 36 с.

2. *Москалев А.Г.* Автоматическое регулирование режима энергетических систем по частоте и активной мощности. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 232 с.

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново, evgeniy1589@mail.ru

В данной работе авторы обосновывают построение тепловой схемы замещения для трехфазной высоковольтной кабельной линии, описывающей переходные тепловые процессы в поперечном сечении линии. На основе предлагаемой схемы, по мнению авторов, можно будет решать задачу по оценке пропускной способности высоковольтных кабельных линий в режиме реального времени и прогнозировать нагрев кабелей с целью предотвращения термического разрушения изоляции.

The authors of this paper justify the construction of the thermal equivalent circuit for a three-phase high voltage cable line that describes the transient thermal processes in the cross section of the line. According to the authors, the proposed scheme, if taken as a basis, allows to solve the task of evaluating the power capacity of high-voltage cable lines in real-time and predict heating of cables with the aim to prevent thermal degradation of the insulation.

Оценка пропускной способности высоковольтных кабельных линий (ВКЛ) в режиме реального времени является актуальной задачей,

направленной на обеспечение надежности электроснабжения. Для ее решения кабели снабжают оптоволоконными системами мониторинга распределенной температуры на их поверхности [1]. В этом случае требуется расчет температуры жилы в реальном времени и прогнозирование нагрева кабелей с целью предотвращения термического разрушения изоляции. В [2] для расчета температуры жилы во времени предлагается составить тепловую схему замещения только для самого коаксиального кабеля.

Учет влияния грунта на нагрев кабеля в [2] производят на основе гипотезы Кеннелли и метода зеркальных изображений [3]. Такой подход нельзя использовать для расчета температуры жилы в режиме реального времени при суточной нагрузке, так как переменная составляющая тепловой волны в грунте не достигает его поверхности. Поэтому в данной работе авторы предлагают построить тепловую схему замещения для трехфазной ВКЛ, состоящей из трех одножильных кабелей.

Для учета влияния грунта и взаимного подогрева кабелей было предложено достроить рассмотренную тепловую схему замещения отдельного коаксиального кабеля так, чтобы тепловой поток не только распространялся в ту часть цепи, которая содержит параметры окружающей среды, но и подогревал соседние кабели. Предлагаемая схема имеет вид, представленный на рис. 1.

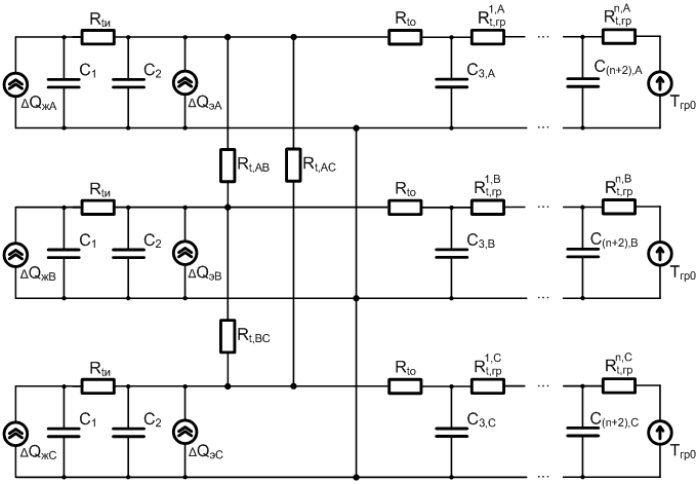


Рис. 1. Тепловая схема замещения трехфазной кабельной линии, проложенной в грунте

При суточном колебании нагрузки вокруг ВКЛ возникает тепловая волна, переменная составляющая которой имеет глубину проникновения значительно меньшую, чем глубина прокладки кабеля. Так как прогнозирование нагрева кабелей достаточно выполнять в пределах суток, было предложено разделить грунт, окружающий ВКЛ, мнимой цилиндрической поверхностью на внутреннюю и внешнюю части с некоторым характеристическим диаметром D_x. При этом внутри D_x температура изменяется в соответствии с переменным значением теплового потока от кабелей, а снаружи D_x температура изменяется в соответствии со средним значением теплового потока за период [3].

Величина D_x была определена эмпирически на основе конечно-элементного метода моделирования для подземных кабельных линий с напряжением 220 кВ, в которых однофазные кабели уложены в плоскости и треугольником.

На основе результатов расчета модели в программе COMSOL Multiphysics величина D_x составила 1,2 м для треугольника и 1,25 м – для плоскости.

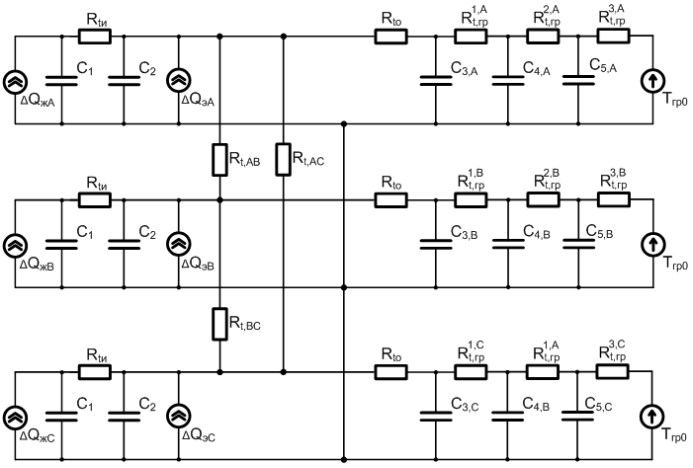


Рис. 2. Уточненная тепловая схема замещения для трехфазной ВКЛ

В приведенной на рис. 1 схеме необходимо было оптимизировать количество RC-звеньев той части цепи, которая моделирует тепловые процессы в грунте. Их количество должно быть таким, чтобы при минимальных вычислительных операциях погрешность вычислений не

превышала 5 %. Для решения поставленной задачи в программе Simulink были построены три тепловые схемы замещения, содержащие две, три и четыре RC-цепочки. для однофазного кабеля, окруженного цилиндрическим грунтовым слоем с внешним диаметром 1,25 м.

Сравнение расчетов на основе метода конечных элементов и с помощью тепловых схем замещения показало, что оптимальное количество RC-цепочек для грунта – три. Тогда тепловая схема заме-щения для трехфазной ВКЛ будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Полученная схема замещения может быть использована при расчете и прогнозировании изменения температуры жил кабелей в режиме реального времени, что позволит оценивать текущую пропускную способность ВКЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малышев А.В., Кривошеев Н.В., Маршнер В.К.* Мониторинг силовых кабельных линий с системой RTTR и его влияние на оптимизацию пропускной способности кабельной сети // Электро. – 2008. – № 2. – С. 22–24.

2. IEC853-1 & 853-2. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables.

3. *Anders G.J.* Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment. – Piscataway, New Jersey USA: IEEE Press, 2005. – 349 p. – (IEEE Press Series on Power Engineering).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЁХФАЗНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

И.И. Литвинов, В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, litvinovii@mail.ru

Рассмотрены принципы моделирования переходных процессов в трехфазных силовых трансформаторах с различным исполнением магнитной системы.

Basic principles of computer modeling of transient processes in power transformers with different magnetic core structures are presented in the paper.

Повсеместный переход устройств релейной защиты (УРЗ) с электромеханической базы на микропроцессорную привел к тому, что особенно-

сти реализации алгоритмов защит стали недоступны конечному пользователю. В связи с этим оценка поведения конкретного УРЗ в различных режимах работы защищаемого объекта затруднительна. Поэтому для ее выполнения предлагается использовать методы имитационного моделирования. Результаты моделирования посредством цифро-аналогового преобразования подаются на входы испытуемого УРЗ. При этом возникает задача в разработке адекватных моделей первичных объектов.

В данной статье рассматриваются принципы построения математических моделей силовых трехфазных трансформаторов с различным выполнением магнитной системы на примере включения со стороны высшего напряжения (ВН) трансформатора, имеющего схему соединения обмок $Y_0/\Delta - 11$. При составлении модели принято следующее: поперечное сечение всех стержней одинаково и равно S; числа витков обмоток на всех стержнях стороны ВН одинаковы и равны W_y, а на стороне низшего напряжения (НН) – W_d, e_A, e_B, e_C – эквивалентные фазные ЭДС; R – эквивалентное активное сопротивление системы, линии и обмоток ВН трансформатора; R_d – активное сопротивление вторичной обмотки, соединенной в «треугольник»; L – эквивалентная индуктивность системы, линии и индуктивности, обусловленной потоком рассеяния обмотки стороны ВН; L_d – индуктивность рассеяния вторичной обмотки; M_C – взаимная индуктивность фаз элементов прилегающей сети; R_N – активное сопротивление заземления нейтрали трансформатора. Электрическая составляющая переходных процессов описывается системой дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{cases} e_a - i_a R - (i_a + i_b + i_c)R_N = L\dfrac{di_a}{dt} + M_c\dfrac{di_b}{dt} + M_c\dfrac{di_c}{dt} + W_y S\dfrac{dB_A}{dt}; \\ e_b - i_в R - (i_a + i_b + i_c)R_N = L\dfrac{di_b}{dt} + M_c\dfrac{di_a}{dt} + M_c\dfrac{di_c}{dt} + W_y S\dfrac{dB_B}{dt}; \\ e_c - i_c R - (i_a + i_b + i_c)R_N = L\dfrac{di_c}{dt} + M_c\dfrac{di_a}{dt} + M_c\dfrac{di_b}{dt} + W_y S\dfrac{dB_C}{dt}; \\ 3i_d R_d = -\left(W_d S\dfrac{dB_A}{dt} + W_d S\dfrac{dB_B}{dt} + W_d S\dfrac{dB_C}{dt} + 3L_d\dfrac{di_d}{dt}\right). \end{cases} \quad (1)$$

При составлении уравнений магнитной цепи принято, что обмотки ВН и НН не создают полей рассеяния, так как эти поля уже учтены в системе (1). Система (2) составлена для группы однофазных транс-

форматоров, система (3) – для трансформатора со стержневым магнитопроводом. При составлении системы (3) использовалась схема замещения магнитной цепи, приведенная на рис. 1, где R_{mA}, R_{mB}, R_{mC} характеризуют магнитное сопротивление сердечника, а R_{m0} – магнитное сопротивление нулевой последовательности; l_A, l_B, l_C – длина магнитопровода одноименной фазы; $\mu_д^A$, $\mu_д^B$, $\mu_д^C$ – дифференциальная магнитная проницаемость магнитопроводов фаз *A*, *B* и *C*.

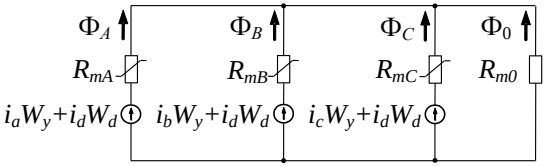


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи трёхстержневого трансформатора

$$\begin{cases} W_y \dfrac{di_a}{dt} + W_d \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{l_A}{\mu_д^A} \dfrac{dB_A}{dt}; \\ W_y \dfrac{di_b}{dt} + W_d \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{l_B}{\mu_д^B} \dfrac{dB_B}{dt}; \\ W_y \dfrac{di_c}{dt} + W_d \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{l_C}{\mu_д^C} \dfrac{dB_C}{dt}. \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} W_y \dfrac{di_a}{dt} + W_d \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{l_A}{\mu_д^A} \dfrac{dB_A}{dt} - R_{m0} \dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \dfrac{di_b}{dt} + W_d \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{l_B}{\mu_д^B} \dfrac{dB_B}{dt} - R_{m0} \dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \dfrac{di_c}{dt} + W_d \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{l_C}{\mu_д^C} \dfrac{dB_C}{dt} - R_{m0} \dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ S \dfrac{dB_A}{dt} + S \dfrac{dB_B}{dt} + S \dfrac{dB_C}{dt} + \dfrac{d\Phi_0}{dt} = 0. \end{cases} \tag{3}$$

Для ввода информации в ЭВМ о характеристике намагничивания $B = f(H)$ трансформаторной стали использовались справочные данные; для получения значений B и H в каждой точке, принадлежащей характеристике, применялась сплайновая интерполяция. На каждом шаге расчета значение дифференциальной магнитной проницаемости в каждом стержне определяется путем численного определения производной магнитной индукции по напряженности магнитного поля. Оценка адекватности моделей проведена сравнением осциллограмм токов включения, полученных в результате натурного эксперимента и путем моделирования (рис. 2).

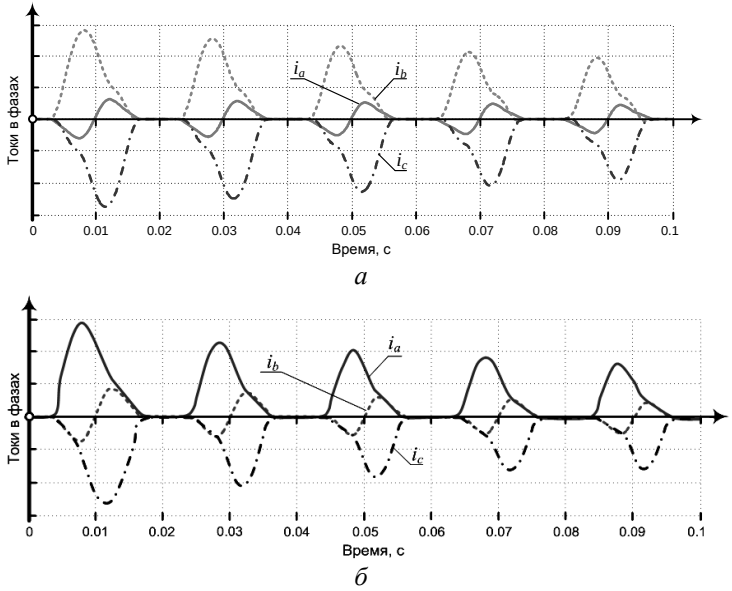


Рис. 2. Осциллограммы токов включения трансформатора, полученные в результате моделирования (*а*) и опытным путем (*б*)

Выводы

1. Разработанная модель адекватно воспроизводит характер переходных процессов в силовом трансформаторе.

2. Анализ токов включения трансформатора со стороны ВН с заземленной нейтралью показал, что отличия в характере переходных процессов в трансформаторах с различным типом магнитной системы

практически отсутствуют, если в трансформаторе имеется обмотка, соединенная в «треугольник». Некоторое различие в характере осциллограмм наблюдается при отсутствии этой обмотки: в трёхстержневом трансформаторе длительность бестоковых пауз уменьшилась, кроме того, обнаружены некоторые отличия в форме токов.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРОУСТАНОВКИ С МАКСИМАЛЬНЫМ ИЗВЛЕЧЕНИЕМ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В.З. Манусов, Ш.К. Халдаров

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, haldaroff@mail.ru

В статье предложена схема адаптивного регулирования скорости турбины на базе нечеткой логики для определения точек максимальной мощности. Данная схема способствует непрерывному регулированию скорости ветровых турбин, подстраиваясь под изменчивый характер скорости ветра.

In this paper an adapted control scheme based on fuzzy logic approach for adjusting the turbine speed so as to track the maximum power point. This scheme can help to control wind turbine speed for maximum power extracting for a given wind velocity.

Введение

Известно, что в условиях изменчивого поведения скорости ветра ветроэнергетические установки (ВЭУ) характеризуются нестабильностью по скорости вращения. При нарушении баланса между аэродинамической мощностью ротора и электрической мощностью электрогенератора скорость вращения либо увеличивается, либо уменьшается, отклоняясь от своего оптимального значения и снижая производительность ВЭУ. Для решения данной проблемы в ВЭУ может быть использована автоматизированная система управления, которая позволит работать с переменной скоростью вращения ротора, что дает значительную эффективность по сравнению с работой при фиксированной скорости [1].

Постановка задачи

В данном исследовании ставится задача анализа и использования схем систем генерирования мощности на основе ветроэнергетической турбины с переменной скоростью. Решение поставленной задачи позволит выявить основные отличия установки от традиционных с позиции систем генерирования мощности и используемого энергоресурса, обеспечения надлежащего качества электрической энергии, оценки различных методик выработки мощности с требуемыми параметрами.

Система нечеткого управления

Ветровая турбина (ВТ) соединена с валом асинхронного генератора через повышающую трансмиссию для преобразования низкой скорости ротора ветровой турбины в высокую скорость асинхронного генератора.

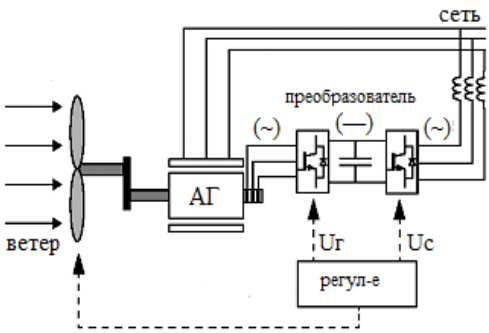


Рис. 1. Ветроэнергетическая система

Далее АГ соединяется с сетью с помощью биполярного транзистора с изолированным затвором на широтно-импульсном модуляторе (БТИЗ ШИМ). Сгенерированная мощность передается электросети через системы преобразования.

Выходная мощность оценивается уравнением крутящего момента генератора:

$$P_{\text{г}} = T_{\text{г}} x \omega_n .$$

Блок-схема системы преобразования энергии ветра с нечетким контроллером показана на рис. 1 [1].

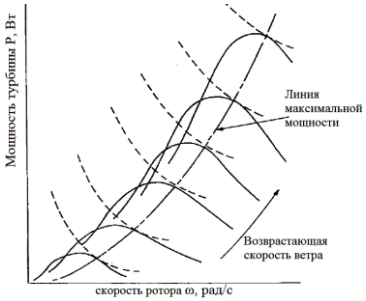


Рис. 2. Генерируемая механическая мощность при разных скоростях ветра

На рис. 2 приведена рабочая кривая оптимальной мощности с учетом того, что лопасти турбины имеют фиксированный угол наклона, а мощность на выходе РТ не линейна угловой скорости турбины (ω) и скорости ветра (∇).

Результаты экспериментов

Математическая модель предлагаемой системы управления ВЭУ была разработана с помощью программы MathLab Simulink [2]. Результаты моделирования помогают исследовать такие характеристики системы, как производительность поиска максимальной мощности.

На рис. 3 видно, что при помощи нечеткого контроллера значение заданной угловой скорости ротора достаточно точно корректируется до значения действующей скорости.

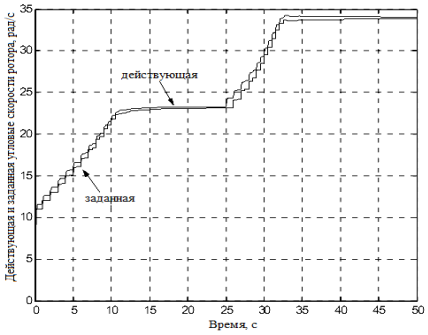


Рис. 3. Заданная и действующая угловые скорости ротора при активации контроллера

Выводы и заключение

В статье представлено моделирование системы управления ветровой установки малой мощности. Предложенная схема нечеткого управления позволяет регулировать угловую скорость ротора и скорректировать под оптимальное значение так, чтобы коэффициент мощности турбины совпадал с его максимальным значением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Удалов С.Н.* Возобновляемые источники энергии: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 432 с.

2. *Дьяконов В.П.* VisSim + Mathcad + MATHLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ РАБОТЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ACS 550 НА РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Т.В. Мятеж

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, tatianachekalina@ngs.ru

В данной статье приводится анализ особенностей режимов работы асинхронного двигателя с частотным преобразователем ACS 550. Наибольшее внимание уделяется вопросам поведения высших гармоник при изменении скорости вращения и момента управления асинхронного двигателя. Детально рассматриваются преимущества и недостатки применения частотных преобразователей. Определяются основные тенденции поведения высших гармоник и пути их погашения.

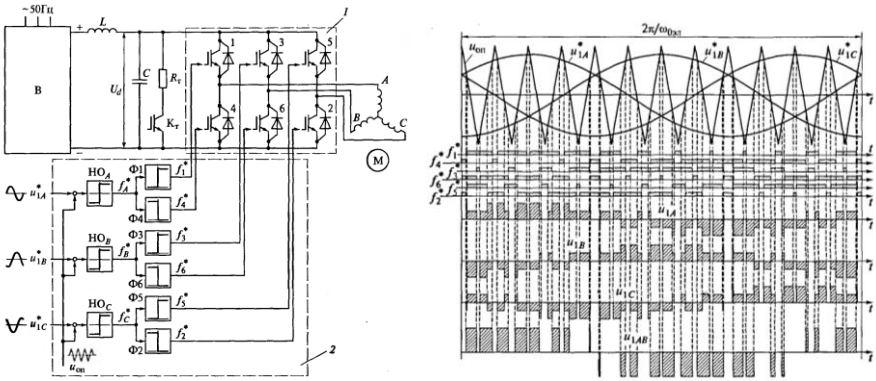
This paper deals with analyzing the operating modes peculiarities of induction motor equipped with ACS 550 frequency converter. More attention will be paid to the study of higher current harmonics behavior at changing rotation velocity and momentum of the induction motor. Advantages and disadvantages of frequency converter application will be discussed in detail. We'll try to define the main trends of higher harmonics and give general recommendations to quench such higher harmonics.

Согласно современной модели развития общества, основное внимание уделено вопросам ресурсо- и энергосбережения. Наибольший экономический эффект дает применение частотно-регулируемого привода (ЧРП) в системах вентиляции, кондиционирования и водоснабжения.

Среди преимуществ от применения ЧРП можно выделить экономию электроэнергии в случае переменной нагрузки, высокую точность регулирования скорости вращения, равный максимальному пусковой момент, повышенный ресурс оборудования, уменьшение гидравлического сопротивления трубопровода, плавный пуск двигателя, управляемое торможение и автоматический перезапуск при пропадании сетевого напряжения, стабилизацию скорости вращения при изменении нагрузки, дополнительную экономию электроэнергии от оптимизации возбуждения электродвигателя [3].

Схема трехфазного мостового инвертора (рис. 1) включает в себя три плеча с транзисторными ключами. На рисунке заштрихованными

горизонтальными линиями отмечены состояния сигналов $f_1^* - f_6^*$, а следовательно, и замкнутые состояния ключей 1–6 [1, 2].



а *б*

Рис. 1. Преобразователь частоты с трехфазным инвертором и широтно-импульсной модуляцией:

а – структура преобразователя: *1* – автономный инвертор напряжения, *2* – система управления АИН; *б* – формирование напряжения на выходе

Важной характеристикой АД, как потребителя электроэнергии, является статическая характеристика по напряжению. Особенностью потребления асинхронным двигателем с частотным преобразователем реактивной мощности является исчезновение регулирующего эффекта нагрузки, что способствует стабилизации напряжения в сети.

Однако надо учитывать и ряд отрицательных эффектов, связанных с повышением частоты ШИМ, а именно появление высших гармоник тока, сравнительно высокую стоимость для ЧРП большой мощности (окупаемость минимум 1-2 года), наличие электромагнитных помех, возникновение перенапряжений в цепи нагрузки, что опасно для изоляции обмоток двигателя. Поэтому особенно важным моментом является анализ значений высших гармоник при работе электрической сети.

Важной особенностью ЧРП являются создаваемые ими помехи. Помехи в сети электропитания ЧРП обусловлены тем, что ток, потребляемый ЧРП из сети, является несинусоидальным из-за того, что входным звеном ЧРП является неуправляемый выпрямитель.

На рис. 2 пунктирной линией показана величина гармоник тока для идеального выпрямителя при $m = 6$ и сплошной линией – для ЧРП

ACS550 для конкретного нагрузочного режима (номинальная скорость вращения и номинальная нагрузка).

В настоящей работе проводится анализ значений амплитуд высших гармоник при изменении числа оборотов и вращающего момента устройства ACS 550 на базе программного комплекса управления – программ MasterScada и GridVis. Исследования проводились при количестве оборотов асинхронного двигателя 200, 300, 400, 500 и 695 об/мин и моменте управления двигателем постоянного тока 2, 6, 10, 15 и 20 НМ. На рис. 3 приведены результаты по определению амплитуд гармоник для 695 об/мин.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод о наибольшем значении гармоник в начале спектра (преобладающая роль первой гармоники), среднем значении амплитуд в середине диапазона (5, 7 и 11-я гармоники) и наименьшем значении амплитуд при увеличении порядкового номера гармоники независимо от количества оборотов и управляющего момента двигателя. Более того, можно отметить тенденцию уменьшения значений амплитуд высших гармоник с ростом момента управления двигателем постоянного тока независимо от числа оборотов вращения асинхронного двигателя (см. рис. 3). Необходимо отметить, что двигатель постоянного тока выступает в данном случае в роли нагрузки.

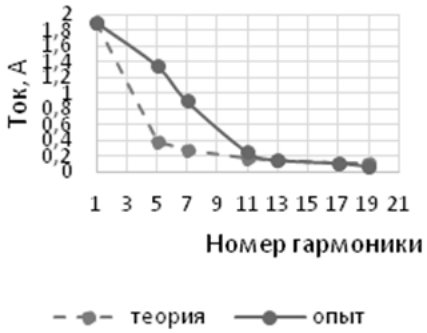


Рис. 2. Спектр тока, потребляемого ЧРП для режима номинальной скорости вращения и номинальной нагрузки АД

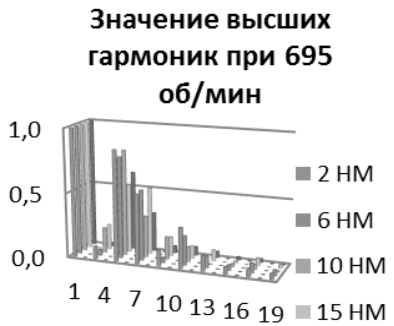


Рис. 3. Значения высших гармоник при 695 об/ мин

Данные значения высших гармоник можно объяснить особенностями устройства частотного преобразователя, а именно регулировочной характеристики инвертора $U = f(u^*)$.

Подобные результаты по анализу значений высших гармоник тока справедливы и для асинхронных двигателей, оснащенных частотным преобразователем большей мощности, поскольку соотношение индуктивного и активного сопротивления для машин мощностью от 2,5 кВт остается практически неизменным и переходные процессы протекают абсолютно одинаково.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сабинин. Ю.А., Грузов В.Л.* Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 128 с.
2. *Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А.* Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с.
3. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе: (краткий аналитический обзор) / Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой, Б.И. Абрамов, Б.И. Моцохейн, С.П. Жижин // Электротехника. – 1996. – № 10. – С. 18–28.

ВЫРАВНИВАНИЕ СУТОЧНОГО ГРАФИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ВВЕДЕНИЯ ДВУХТАРИФНОЙ ОПЛАТЫ МОЩНОСТИ

И.Д. Поляков, С.А. Дмитриев, П.В. Чусовитин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, ilyapol92@gmail.com

В статье рассматривается возможность введения двухтарифной оплаты мощности на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) при росте промышленной генерации. Особое внимание уделено исследованию на основе моделирования электроэнергетической системы.

The article suggests the two-rate capacity payment implementation on the wholesale power energy and capacity market (WPECM) in case of industrial generation growth. Special attention is given to the real power system model research. As follows from results of economic effect calculation, it is profitable for consumers to regulate their consumption.

В настоящий момент постоянные затраты (мощность) оплачиваются ежемесячно и зависят от максимального фактического значения часового потребления за месяц. При такой системе постоянные затраты склоняют потребителей выравнивать свой график для минимизации цены.

В рамках работы было предложено осуществлять фиксирование мощности в ночные часы минимума потребления и в дневные часы максимума, оплачивая её по двум тарифам. По результатам расчета экономического эффекта, выполненного в ходе исследования, можно сделать вывод, что потребителям стало выгоднее регулировать свое потребление.

Данный анализ не может показать в полной мере достоверный результат, как изменится цена в случае введения двухтарифной оплаты мощности. При таком разделении стоимость мощности должна возрасти, чтобы оплата услуг организациям, получающим денежные средства за мощность, осуществлялась эквивалентно существующим тарифам. Но определенного стимула для выравнивания суточного графика потребления достичь можно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воропай Н.И.* Распределенная генерация в электроэнергетических системах // Малая энергетика–2005: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2005. – С. 13–21.

2. *Дьяков А.Ф.* Малая энергетика в России. Проблемы и перспективы. – М.: Энергопрогресс: Энергетик, 2003. – 128 с.

3. *Ackermann Th., Andersson G., Soder L.* Distributed generation: a definition // Electric Power System Research. – 2001. – Vol. 57, iss. 3. – P. 195–204.

4. Научно-техническое направление «Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации при параллельной работе с ЕЭС России» / П.М. Ерохин, А.В. Паздерин, Л.А. Кеткин, С.А. Ерошенко, В.О. Самойленко // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. труды IV междунар. науч.-техн. конф. 14–18 окт. 2013 г. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 26–33.

5. Научные проблемы распределённой генерации / С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, С.Е. Кокин, А.В. Паздерин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 11–12. – С. 126–133.

6. *Кирпиков А.В.* Стратегии загрузки установок распределенной генерации в течение суток / А.В. Кирпиков, И.Л. Кирпикова, В.П. Обоскалов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 12–15.

7. Сайт Балансирующего рынка [Электронный ресурс]. – URL: http://br.soups.ru/Public/MainPageData/BR/IndicatorBR.aspx (дата обращения: 10.11.2014).

8. Приложение № 2 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент внесения изменений в расчетную модель электро-

энергетической системы [Электронный ресурс]. – URL: http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm (дата обращения: 10.11.2014).

9. Приложение № 3 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент актуализации расчетной модели [Электронный ресурс]. – URL: http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm (дата обращения: 10.11.2014).

10. *Kokin S.E., Pazderin A.V., Adarichev E.N.* Ways of decreasing maximum and equalizing curve of big cities' power demand // The First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply SUPERGEN '09, April 6–7, 2009. – Nanjing, China: Power Network Technology Press, 2009. – P. 315–319.

11. *Glushkov* D.*A., Khalyasmaa A.I.* Discharge criterion along the surface of solid dielectric in SF6 under high pressure // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 548–549. – P. 21–24.

12. *Eroshenko S.A., Vinokurov K.V., Smolina A.Y.* Electrical load forecasting // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – Vol. 190, N 1. – P. 299–305.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.Г. Русина, П.А. Акульшина

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, polina.akulshina@gmail.com

Эквивалентирование дает возможность добиться доступных форм анализа результатов расчетов, позволяющих планировать решения. Рациональное эквивалентирование энергетических характеристик существенно упростит оптимизацию режима, превратив ее из последовательной в одновременную.

Equivalenting gives an opportunity to archive available forms of the analysis results which allow to plan solutions. Rational equivalenting energy characteristics greatly simply optimization mode turned it from sequential to simultaneous.

Наиболее естественной оценкой эффективности работы ЭЭС является связь трех критериев: максимума КПД, минимума издержек и максимума прибыли. Чтобы производить расчеты нормальных режимов ЭЭС, необходимо решать особые вопросы: создание схемы системы в заданных границах; определение принципов формирования зон электроснабжения; эквивалентирование узлов генерации и нагрузки в зонах электроснабжения; определение архитектуры связей между эквивалентными

узлами; разработка схемы расчетов для потоков мощности и электроэнергии; определение связей между энергетическими балансами и сетевыми расчетами; учет информационных требований и возможностей.

Каждый элемент энергосистемы есть элемент, в котором происходит преобразование (потеря) энергии и изменение ее стоимости. Следовательно, объекту ЭЭС можно поставить в соответствие некоторые сопротивления (аналог электрического сопротивления), отражающие экономическое состояние системы (экономическое сопротивление) и энергетические преобразования на станциях (энергетическое сопротивление). Единообразное представление электрических, энергетических и экономических процессов позволяет модифицировать уравнения состояния ЭЭС и адаптировать существующие алгоритмы оптимизации режима к учету его стоимости [1]. Общий способ моделирования технико-экономического состояния ЭЭС с помощью электрического эквивалента сводит два критерия минимума затрат по системе (минимум потерь мощности и энергии в сетях и минимум расхода топлива на станциях) в единый критерий – минимум потерь, позволяя найти оптимальный режим системы при соблюдении баланса спроса и предложений в денежном выражении.

Для проведения серии экспериментов, определяющих вид зависимости $R_{экв}(P_{пол})$, выбрана простейшая модель «генератор–трансформатор–линия–ШБМ». В эксперименте «электрический эквивалент» замоделирован тремя электрическими лампами накаливания мощностью 500 Вт каждая, имеющими нелинейную характеристику. В схему они подключаются параллельно.

В результате авторами статьи получен диапазон подводимых ($P_{подв}$) и полезных мощностей ($P_{полезн}$), при использовании которого можно получить величину «электрического эквивалента» (рис. 1).

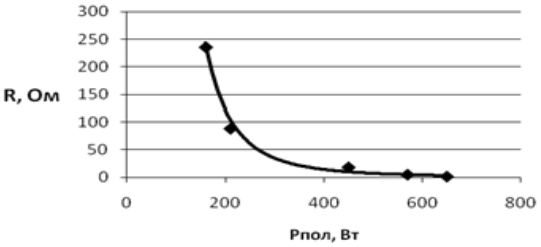


Рис. 1. Зависимость «эквивалента» от полезной мощности

Как известно, тепловые станции работают на различном типе топлива, а значит, имеют различные расходные характеристики. Для того чтобы это учесть, авторами статьи было предложено поменять мощность и количество лампочек.

В опытах в фазе осветительной нагрузки находятся по восемь, шесть, четыре и две лампы накаливания мощностью 95 Вт каждая (рис. 2) [2].

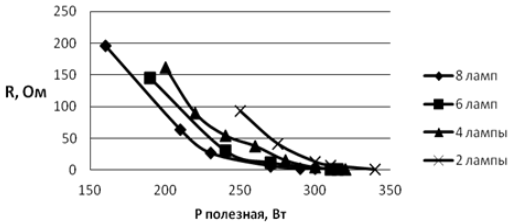


Рис. 2. График зависимости «эквивалента» от полезной мощности

Для моделирования электрической сети как элемента ЭЭС была составлена гипотетическая балансовая сеть – искусственная электрическая сеть, связывающая энергетические балансы мощности и выработки электроэнергии с расчетами режимов сети по принципу «черного ящика». Для того чтобы определить потери электроэнергии, необходимо иметь эквивалентную схему замещения объекта и определенную модель расчета потерь. Одним из наиболее возможных путей определения потерь является модель регрессионного вида. Уравнение регрессии можно построить на основе серии расчетов нормального режима всей сети. Возникла задача электрического моделирования региона (зоны энергоснабжения), которая была решена для ФСК ЕЭС МЭС Центра и для ОЭС Сибири. Полученные характеристики потерь мощности и электроэнергии в различных координатах, применяющиеся при планировании для всего предприятия, генераторных узлов, нагрузочных узлов, зон электроснабжения, позволяют решить задачи по потерям, которые на основе прямых расчетов практически решить невозможно [1].

Вывод. Выполнены исследования по возможности применения нового метода расчетов режима энергосистемы – «электрического эквивалента». Дается теоретический аппарат его реализации, приведены расчеты применения по тестовым схемам. Математическая модель

расчета отражает многопараметрические свойства систем, развивающихся во времени.

Разработаны принципы моделирования сетевых систем различного целевого содержания. Основными являются: определение структуры системы, концентрация узлов по их интегральным характеристикам во времени, конструирование параметров схемы замещения сетей для расчета их режимов.

Разработана методика проведения вычислительного эксперимента для получения информации, конструирующей электрическую сеть и ее параметры. Границы системы определяются точками потокораздела, которые зависят от хозяйственного, коммерческого или технического содержания рассматриваемой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Русина А.Г.* Развитие теории и методологии анализа электроэнергетических систем для управления установившимися режимами: дис. … д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2013. – 297 с.

2. *Акульшина П.А., Васильева О.А.* Разработка методики проверки работоспособности метода «электрического эквивалента» для электродинамической модели // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всерос. науч.-техн.конференции, Томск, 4–6 дек. 2013 г.: в 2 т. – Томск: Скан, 2013. – Т. 1. – С. 16–18.

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ ВНУТРИСТАНЦИОННОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА АГРЕГАТОВ ГЭС

Ю.А. Секретарёв, С.В. Митрофанов, Ш.М. Султонов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Mitrofan_Serg@mail.ru

В данной статье представлена методика выбора состава гидроагрегатов на основе двух критериев (целей управления). Рассмотрен математический аппарат формализации стратегий управления оперативного персонала станции на основе эксплуатационной надежности и экономичности гидроагрегатов. Произведен анализ приоритетности данных критериев по отношению друг к другу в определенных ситуациях на станции.

In this paper presented methodology of hydro unit's selection on the basis of two criteria (targets of control). A mathematical apparatus of formalization strategies control of the plant operational staff on the basis of operational condition and efficiency criteria is consider. Performed an analysis of priority this criteria in certain situations.

Процесс управления составом работающего оборудования на станции можно представить как

$$h_k = DE(V_{ki}, U_{kj}),$$

где V_{ki}, U_{kj} – критерии текущей ситуации, определяющие эксплуатационную надежность и экономичность режима работы станции; DE – свертка, описывающая двухцелевое управление составом гидроагрегатов (ГА) на станционном уровне.

Частные критерии (U и V) и обобщенный критерий (h) можно охарактеризовать следующим образом:

цель 1 (U) характеризует степень текущей эксплуатационной надежности гидроагрегата, которая определяется его вибрационным состоянием, температурным режимом и т. д.;

цель 2 (V) характеризует уровень экономичности режима работы гидроагрегата, т. е. его КПД.

Методика расчета критериев эксплуатационной надежности и экономичности описана в работах [1, 2].

Под обобщенной целью (h) понимается оценка в целом текущей функциональной работоспособности гидроагрегата с учетом экономичности и эксплуатационной надежности его режима.

Всю процедуру идентификации целей можно представить в виде простейшей таблицы-анкеты, которая заполняется индивидуально лицом, принимающим решение (ЛПР) (табл. 1).

Таблица 1

Типовые ситуации оцениваемые ЛПР

Цели	Ситуация 1	Ситуация 2	Ситуация 3
Цель U Цель V	Е А	С С	С А
Обобщенная цель	Оценка эксперта	Оценка эксперта	Оценка эксперта

Для оценки состояния ГА используются следующие лингвистические переменные: A – отлично, B – хорошо, C – средне, D – удовлетворительно, E – плохо.

На основе результатов процедуры идентификации могут быть сформированы 17 сверток, которые покрывают более 3/4 всех стратегий ЛПР.

Более детально процедура идентификации стратегий управления описана в работе [3].

Для анализа приоритетности целей рассмотрим ситуацию, когда оценка критерия надежности $U = 0{,}18$; оценка критерия экономичности $V = 0{,}9$.

При использовании сверток, таких как $\min(U, V)$ и $\max(U, V)$, будет наблюдаться доминирование одного критерия над другим.

Когда обобщенная оценка находится на некотором уровне, промежуточном между частными оценками, можно определить приоритет оценок надежности и экономичности в полученной обобщенной оценке функциональной работоспособности гидроагрегата, другими словами – в какой степени каждая из частных оценок влияет на обобщенную оценку.

$$\Pr(U) = \left(1 - \frac{|h - U|}{|U - V|}\right) 100\ \%,$$

$$\Pr(V) = \left(1 - \frac{|h - V|}{|U - V|}\right) 100\ \%.$$

Результаты расчета на основе данных выражений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние частных критериев на обобщенную оценку (U = 0,18; V = 0,9)

Свертка	h	Приоритет U, %	Приоритет V, %
$\max(0,U+V-1)$	0,08	100	0
UV	0,16	100	0
$\min(U,V)$	0,18	100	0
$\mathrm{med}(U;V;0{,}25)$	0,25	90	10
$2UV/(U+V)$	0,32	80	20

Окончание табл. 2

Свертка	*h*	Приоритет *U*, %	Приоритет *V*, %
sqrt(*UV*)	0,4	69	31
(*U*+*V*)/2	0,54	50	50
(*U*+*V*-*UV*)/(1+*U*+*V*-2*UV*)	0,52	53	47
max(*U*,*V*)/(1+ABS(*U*-*V*))	0,52	53	47
med(*U*;*V*;0,5)	0,5	56	44
min(*U*,*V*)/(1-ABS(*U*-*V*))	0,64	36	64
(*UV*)/(1-*U*-*V*+2*UV*)	0,67	32	68
1 - sqrt((1-*U*)*(1-*V*))	0,71	26	74
med(*U*;*V*;0,75)	0,75	21	79
max(*U*,*V*)	0,9	0	100
U+*V*-*UV*	0,92	0	100
min(1;*U*+*V*)	1	0	100

Заключение

Полученная таблица демонстрирует приоритет различных критериев при применении каждой из сверток в одной и той же ситуации.

Данное многообразие стратегий управления составом агрегатов ГЭС значительно расширяет возможности ЛПР по поиску наилучших решений при различных ситуациях на станции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы / Ю.А. Секретарёв, С.А. Диденко, А.А. Караваев, Б.Н. Мошкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 308 с. – (Монографии НГТУ).

2. *Sekretarev Y.A., Mitrofanov S.V.* Preventive control taking into account of an operational condition power equipment and flowing path of hydropower plant // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2013. – Vol. 6, N 1. – P. 3–14.

3. *Секретарев Ю.А., Митрофанов С.В.* Методика формирования обобщенного критерия состояния гидроагрегатов ГЭС на основе критериев эксплуатационной надежности и экономичности // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 204–213.

НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА

Ш.М. Султонов, Ю.А. Секретарев, С.В. Митрофанов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, lion_1001@mail.ru

В работе предлагается решение задачи оптимального распределения нагрузки между электростанциями энергосистемы Таджикистана соответствующего минимуму расхода воды, методом равенства относительных приростов.

In the article deals the optimal distribution of load between the electrical stations of the energy system, corresponding to the minimum water flow rate taking into account active power losses in the networks, by method of the equality of relative gains.

Введение

Таджикистан обладает огромными потенциальными запасами гидроэнергоресурсов, из которых реализовано лишь 5 %. По общим потенциальным запасам гидроэнергоресурсов Таджикистан занимает восьмое место в мире после Китая, России, США, Бразилии, Заира, Индии и Канады, его гидроэнергетические запасы оцениваются в 527 млрд кВт · ч в год.

Отличительная особенность электроэнергетической системы заключается в том, что из 5350 МВт установленной мощности электрических станций 94 % приходится на долю гидроэлектростанций, которые производят около 98 % электроэнергии по всей стране.

На ГЭС выработка электроэнергии зависит от стока реки и погодных условий. В зимнем периоде в стране ощущается нехватка электроэнергии в связи с изолированной работой системы и погодными условиями, которые влияют на выработку и потребление электроэнергии. Отсутствие связей с энергосистемами соседних стран и резкое уменьшение внутреннего спроса в летний период вынуждает систему работать с избыточным резервом мощности.

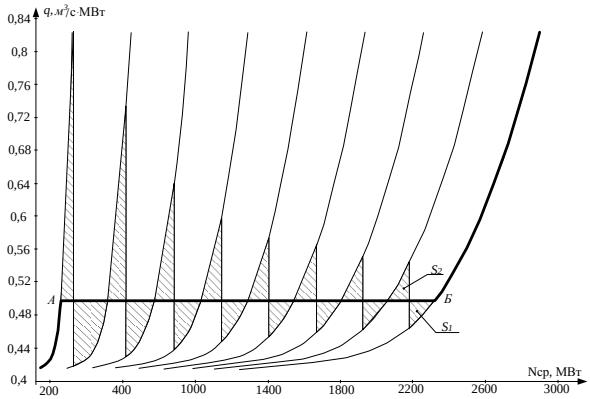
Зимний дефицит электроэнергии составляет от 2,2 до 2,5 млрд кВт · ч., что вынуждает энергосистему вводить официальные ограничения на поставку электроэнергии.

Существующий дефицит мощности и энергии в энергосистеме Таджикистана заставляет задуматься о путях его снижения.

Постановка задачи

Одним из путей решения проблемы дефицита электроэнергии является оптимальное использование воды на водохранилищах ГЭС. На сегодняшней день в республике не используют никаких методов оптимизации и современных программ. Используя оптимизационные методы, можно минимизировать расходы воды и увеличивать выработку электроэнергии на ГЭС. Одной из оптимизационных задач, которые необходимо решить для оптимального режима работы станций в энергосистеме Таджикистана, является оптимальное распределение нагрузки между гидроэлектростанциями энергосистемы, соответствующее минимуму суммарного расхода воды, с учетом потерь активной мощности в сетях. Для решения задачи оптимального распределения нагрузки между станциями для энергосистемы Таджикистана можно использовать широко распространенный метод равенства относительных приростов.

Для расчета оптимального режима методом относительных приростов основная сложность заключается в построении характеристик относительных приростов (ХОП) для каждой ГЭС [1]. ХОП станции являются основным исходным материалом для определения оптимального режима работы системы. Характеристики относительных приростов были построены для Нурекской, Байпазинской, Сангтудинской-1, Сангтудинской-2, Головной и Кайракумской ГЭС [2]. Эти ГЭС имеют водохранилища и могут участвовать в процессе оптимизации. На рисунке показано построение характеристики относительного прироста для Нурекской ГЭС.



Построение характеристики относительного прироста Нурекской ГЭС

Критерием оптимального распределения нагрузки между станциями энергосистемы является равенство относительных приростов станций [3]:

$$\frac{q_1}{1-\sigma_1} = \frac{q_2}{1-\sigma_2} = ... = \frac{q_i}{1-\sigma_i} = idem, \qquad (1)$$

где, $q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}$ – относительный прирост расхода воды; $\sigma_i = \frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial P_i}$ – относительный прирост потерь активной мощности в электрических сетях.

Заключение

Таким образом, используя метод равенства относительных приростов для оптимизации режимов работы ГЭС энергосистемы Таджикистана, можно решить вопрос снижения дефицита электроэнергии в стране путем повышения выработки электроэнергии в энергосистеме. Работа является актуальной, и внедрение этого метода в энергосистеме Таджикистана является своевременным и поможет решить ряд проблем, которые до сих пор не нашли своего решения при управлении энергосистемой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Горнштейн В.М.* Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 248 с.

2. Выбор параметров ГЭС: учеб.-метод. пособие к курсовому и диплом. проектированию гидротехн. объектов / сост.: А.Ю. Александровский, Е.Ю. Затеева, Б.И. Силаев. – Саяногорск: СНФ КГТУ, 2005. – 176 с.

3. Гидроэнергетика: учеб. пособие / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. – 2-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 620 с.

МЕТОДЫ И ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЭС В ЭСС

Т.А. Филиппова, Е.А. Совбан

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, ta_filippova@ngs.ru, sovban_ekaterina@mail.ru

В данной статье рассмотрены основные методы и задачи краткосрочной оптимизации режимов работы гидроэлектростанций Сибири с учетом особенностей систем различного вида и уровня, а также функций, выполняемых в этих системах.

This article describes the basic methods and objectives of the HPS short-term optimization operation in Siberia, taking into account the features of various types systems and level, as well as the functions performed by these systems.

В настоящее время задачи и методы оптимального использования ГЭС достаточно хорошо изучены, но изменение условий режимов работы и роли станций в энергосистемах требует их анализа и некоторых изменений. Современные электроэнергетические системы значительно изменили свои свойства. Главные изменения связаны с новыми хозяйственными формами предприятий энергетики. Гидроэлектростанции приобрели статус генерирующих компаний ГК, и появилась необходимость изменения методики решения режимных задач, возникли и адресные методы.

Системы и их свойства. Гидростанции имеют связи с электроэнергетическими системами (ЭЭС) трех видов, которые отличаются структурой генерирующих мощностей, целями и возможностями: местная система (МЭС), региональная система (РЭС), объединенная система (ОЭС). В общем случае все эти системы гидротепловые.

Для этих энергетических балансов характерны различные критерии и модели оптимизации. Соответственно, для МЭС – это критерий минимального расхода топлива; для РЭС – это минимальные эксплуатационные издержки, когда в гидротепловой системе имеются несколько ГЭС, ТЭЦ, КЭС; в ОЭС – минимальные эксплуатационные издержки или цены для субъектов электроэнергетического рынка, которые взаимодействуют в коммерческих или технических вопросах.

Два вида оптимизационных задач. Имеются два вида оптимизационных задач – краткосрочная оптимизация при составлении баланса

мощностей и долгосрочная оптимизация использования водных ресурсов ГЭС [1].

Разберем содержание краткосрочной оптимизации для систем различного вида. Для МЭС – это оптимальное распределение нагрузки между ГЭС и эквивалентной ТЭС. Электрическая сеть – распределительная, кольцевая с напряжением до 110 кВ. При этом ТЭС представляются энергетическими характеристиками их конденсационного цикла. Для региональных систем эта задача отражает также структуру и параметры мощностей гидростанций, которые характеризуются степенью регулирования стока водохранилищ (годовое, многолетнее) и функциями в системе (покрытие полупиковых, пиковых нагрузок, вторичное регулирование частоты и мощности).

Для ГЭС имеются водохозяйственные ограничения по расходам воды в нижний бьеф, которые задаются как безусловные ограничения. Для нескольких ГЭС алгоритм оптимизации режимов очень сложный и практически не реализуется. Но реальные условия позволяют использовать более простые алгоритмы. Таких возможностей много, но часто они сводятся к использованию принципа максимального вытеснения ТЭС из баланса мощностей [1].

Рассматривая в дальнейшем задачи оптимизации, будем исходить из следующих положений.

- Первое – получение адресных оценок для потоков мощности и электроэнергии в ЭЭС [2]. Если представить систему из узлов i, j – нагрузочных и генераторных, то адресные расчеты должны дать трассы, связывающие узлы и потоки мощности или другие величины по этим трассам [2].
- Второе – использование методов нелинейного программирования, если рассматриваются технические системы и их предприятия.
- Третье – для учета режимов электрических сетей необходимо использовать специальную электрическую схему, которая позволяет определить потери мощности и электроэнергии для транспорта.

Затраты на передачу электроэнергии по электрической сети

Затраты на транспорт электроэнергии требуют учета сетевых тарифов. Сетевые тарифы разработаны, но во многих позициях они не отвечают требованиям адресных расчетов. Структура издержек электрических сетей отражает транспорт энергетической продукции; обеспечение качества электроснабжения по напряжению; обеспечение схемной и аппаратной надежности; обеспечение управления технологическими процессами передачи энергетической продукции.

В питающей сети разделить издержки пропорционально длинам ЛЭП невозможно, поскольку эти сети в основном выполнены кольцевыми. Здесь можно применить деление условно-постоянных издержек пропорционально значениям мощностей подстанций в режиме максимальных нагрузок или, еще более упрощенно, пропорционально мощности трансформаторов подстанции питающей сети. Переменные издержки в основном определяются издержками на возмещение потерь мощности в сети, которые должны распределяться по адресному принципу. Если использовать такой принцип формирования, то возникают задачи создания специальной расчетной схемы режимов.

Дифференциация цен поможет создать благоприятные условия для конкуренции на рынке ОЭС Сибири.

Цены передачи электроэнергии

Ценообразование в области передачи электроэнергии также основано на принципе осреднения цен транспортных услуг. Расчет цен на рынке ОЭС Сибири должен осуществляться в соответствии с моделью ценовых сигналов, отражающей точки, где происходит изменение цены на электроэнергию. Методика расчета адресных тарифов на электроэнергию учитывает все особенности производителя и удаленность от него потребителя, что создает условия для развития конкуренции на рынке ОЭС Сибири.

Заключение. Эффективное использование гидроэнергетических ресурсов ГЭС для современных ЭЭС изучено недостаточно полно. Свойства гидротепловых электроэнергетических систем существенно изменились, и это отражается на принципах и методах решения многих задач гидроэнергетики. Фрагментарные исследования, выполненные авторами данной статьи, показывают, что от этого зависит эффективность использования ГЭС, и необходимо привлечь внимание к разработке этих задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидроэнергетика / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 640 с.

2. *Русина А.Г.* Задачи адресного распределения потоков и потерь электроэнергии и методы их решения // Вестник УГТУ–УПИ. – 2004. – № 12 (42): Энергосистема: управление, качество, конкуренция: сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 22–24 сент. 2004 г. – С. 210–214.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

А.Г. Фишов, М.Ю. Фролов

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, north_cs@bk.ru

В работе представлен новый метод идентификации параметров синхронных машин для использования в технологических и противоаварийных автоматиках.

In this paper new method of parameter identification of synchronous machines for using in technological automatic and emergency control automatic has been present.

Современная энергетика должна не только удовлетворять растущие потребности в электроэнергии, но и обеспечивать легкость доступа нового генерирующего оборудования в сеть для снабжения новых потребителей и предоставления современных услуг.

В настоящее время развивается альтернатива централизованной генерации – распределенная малая генерация, при которой генераторы, производящие энергию, включены непосредственно в распределительную сеть. С таким электроснабжением становится экономически не выгодно производить централизованное диспетчерское управление режимом, поэтому выход видится в полностью автоматическом управлении. Для этих целей на кафедре АЭЭС НГТУ разрабатываются методы управления для соответствующих автоматик.

Отличительной особенностью методов является то, что для управления режимами нет необходимости знать топологию сети и элементов, включенных в нее. Это позволяет производить управление режимом даже при хаотичном включении новых генераторов в сеть. Сама концепция подразумевает практически полную свободу при подключении, что значительно упрощает включение в сеть нового генерирующего оборудования.

В работе представлен разработанный метод идентификации синхронного индуктивного сопротивления x_d синхронной машины (СМ), который может использоваться в условиях реальной эксплуатации благодаря следующим преимуществам:

– отсутствует необходимость в создании опасных режимов работы СМ, например режим короткого замыкания;

– отсутствует необходимость в привлечении дополнительного оборудования и испытательных установок.

Рассмотрим следующее выражение:

$$E_q = \sqrt{\left(U + \frac{Qx_d}{U}\right)^2 + \left(\frac{Px_d}{U}\right)^2}. \qquad (1)$$

Данное выражение описывает связь параметров режима, таких как напряжение U, активная P и реактивная Q мощности на выводах СМ, с параметрами синхронной машины, такими как внутреннее синхронное сопротивление x_d и синхронное ЭДС E_q [1].

Режимные параметры (U,P,Q) обычно известны, так как их измерение не представляет труда. ЭДС E_q является внутренним параметром, поэтому измерить ее в условиях эксплуатации невозможно. Для его непосредственного измерения существуют методы, но все они лабораторные, т. е. требуют дополнительного оборудования и испытательных установок. Сопротивление x_d, собственно, и является целью идентификации. В итоге получается, что в уравнении (1) имеются две неизвестные величины, а именно E_q и x_d.

Для того чтобы определить неизвестные, необходимо чтобы количество неизвестных совпадало с количеством уравнений. Для этого составим систему из двух одинаковых уравнений, но с коэффициентами, принадлежащими к различным режимам:

$$\begin{cases} E_{q1} = \sqrt{\left(U_1 + \dfrac{Q_1 x_d}{U_1}\right)^2 + \left(\dfrac{P_1 x_d}{U_1}\right)^2}, \\ E_{q2} = \sqrt{\left(U_2 + \dfrac{Q_2 x_d}{U_2}\right)^2 + \left(\dfrac{P_2 x_d}{U_2}\right)^2}, \end{cases} \qquad (2)$$

где U_1, P_1, Q_1 – режимные параметры первого режима; U_2, P_2, Q_2 – режимные параметры второго режима, а E_{q1} и E_{q2} – синхронные ЭДС машины в первом и во втором режиме соответственно.

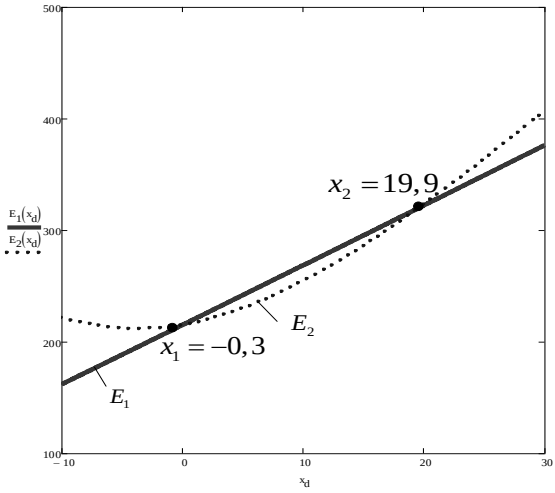
Для того чтобы количество неизвестных в системе (2) совпадало с количеством уравнений, необходимо чтобы $E_{q1} = E_{q2} = E_q$. Такое возможно только в том случае, если в обоих режимах у СМ будет одинаковый ток возбуждения, поэтому при переходе от одного режима к другому необходимо отключить автоматическое регулирование воз-

буждения и производить изменение режима только за счет изменения механического момента на валу ротора машины. Для синхронного генератора это изменение происходит за счет приводного механизма, а для синхронного двигателя – за счет изменения нагрузки. При выполнении вышеописанных условий можно решить систему уравнений (2). Приравняв правые части и выразив x_d, получим

$$x_{d1,2} = \frac{-(Q_1 - Q_2) \pm \sqrt{(Q_1 - Q_2)^2 - \left(\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} - \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \right) U_1^2 - U_2^2}}{\left(\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} - \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \right)}.$$

Положительный корень будет являться синхронным индуктивным сопротивлением x_d.

Главным достоинством предлагаемого метода является простота его использования. По сути, необходимо зафиксировать три режимных параметра нескольких режимов, созданных специальным образом, и рассчитать сопротивление по заданным выражениям. Такая простота делает метод привлекательным для его использования в эксплуатационных условиях [2].



Графическое решение системы уравнений

Предлагаемый метод был исследован на электродинамической модели кафедры АЭЭС НГТУ. На рисунке представлено графическое решение системы уравнений (2), параметры для которых были измерены при двух различных режимах работы модельного генератора МК3-1500 номинальной мощностью 3 кВА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Куликов Ю.А.* Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 284 с.

2. ГОСТ 10169. Машины электрические трёхфазные синхронные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 85 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ СТАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В.М. Чебан, Р.А. Толкацкий

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, romantolkatsky@outlook.com

В статье приведено описание результатов исследования использования вращения статора электрических машин переменного тока, особенно асинхронных с короткозамкнутым ротором в генераторном и двигательном режимах работы, а также использования вращения статора для уменьшения пусковых токов двигателей переменного тока.

The article describes the results of studies in the area of applying electrical AC machine stator rotation in generator and traction mode. Especially it is concerning squirrel-cage motors. Also the article describes the results of studies in the area of applying stator rotation to decrease inrush currents of AC motors.

Как известно, наиболее распространенными электрическими машинами являются асинхронные двигатели, необходимые практически в каждой отрасли промышленности. К преимуществам асинхронных двигателей следует отнести простоту конструкции, надежность в эксплуатации, достаточно высокие энергетические показатели и невысокую стоимость. Асинхронные машины работают также в режиме генератора. Для этого необходимо обеспечить их подмагничивание из пи-

тающей сети или подключить к выводам статора батарею конденсаторов необходимой емкости.

Наиболее часто асинхронные генераторы используются в автономных электрических системах, а в некоторых случаях их использование является предпочтительным, например, для мини-ГЭС, ветроэнергетических установок или для систем электроснабжения летательных аппаратов. При использовании асинхронных генераторов в автономных электрических системах к вышеуказанным преимуществам асинхронных двигателей можно добавить следующее:

– легкое включение на параллельную работу;

– не требуют защиты при коротких замыканиях, так как в таком режиме немедленно теряют возбуждение.

К недостаткам асинхронных машин можно отнести следующее:

– сложность регулирования частоты и напряжения автономных асинхронных генераторов;

– сложность регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей;

– большие значения пусковых токов короткозамкнутого двигателя, продолжительность которых особенно увеличивается при пуске под нагрузкой.

Аналогичные проблемы присущи и синхронным двигателям.

Одним из альтернативных новых способов регулирования может быть применение электрических машин переменного тока с вращающимся статором, так называемых машин двойного вращения.

Способ основывается на управлении смещением магнитных потоков ротора и статора машины переменного тока друг относительно друга за счет вращения статора. Данный способ был запатентован В.М. Чебаном и А.В. Коноваловым. Также была создана физическая модель асинхронной короткозамкнутой машины двойного вращения [1].

В настоящее время на кафедре АЭЭС НГТУ ведется исследование работы асинхронной машины двойного вращения как в генераторном режиме, так и в двигательном.

Теоретически и экспериментально исследовался автономный режим работы асинхронного генератора двойного вращения на постоянное активное сопротивление.

Также предложено использование вращения статора генератора для повышения надежности ветроэнергетических установок при резких изменениях силы ветра (порывов ветра) [2]. Предполагается, что по-

вышение надежности ветроэнергетической установки будет обеспечиваться за счет расхода части энергии ветра на разгон статора и перехода в кинетическую энергию вращения статора генератора. Реализация этого предложения осуществляется специальным тормозом-стопором статора генератора, который отключается при порыве ветра [2].

Для изучения автономного режима работы асинхронного генератора двойного вращения были предложены математические модели, на основе которых были получены статические характеристики автономного асинхронного генератора двойного вращения, а также исследованы электромеханические переходные процессы при резком увеличении мощности турбины (моделирование порыва ветра) [3]. Полученные теоретические результаты исследования сравнивались с экспериментальными данными. В ходе исследования, в частности, подтвердилось, что при освобождении статора от связи с опорой и при его свободном вращении во время резкого увеличения мощности турбины снижается электромагнитный момент машины, а также ток статора – это уменьшает электрические и механические перегрузки и повышает надежность ветроэнергетической установки.

Необходимо отметить, что предлагаемый способ поддержания частоты и напряжения автономных генераторов не приводит к искажению кривой напряжения.

Экспериментальные исследования двигателей двойного вращения подтвердили возможности регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых и синхронных двигателей в широком пределе при сохранении необходимых моментно-скоростных характеристик [4].

Вращение статора позволяет также минимизировать пусковые токи, не снижая момент двигателя, т. е. осуществлять пуск под нагрузкой (получено положительное решение на патент с приоритетом от 10.06.2014, авторы Чебан В.М., Бобрик В.И., Марков М.Ю.). Вначале пуска разгонным двигателем статор разгоняется до синхронной скорости против принятого направления вращения ротора, а затем при скольжении, близком к нулю, статор подключается к сети и фиксируется к опоре тормозным устройством.

В заключение следует сказать, что по предварительным расчетам такие машины, особенно при серийном производстве, по стоимости сопоставимы и даже эффективнее других способов управления машинами переменного тока. Они могут быть использованы во многих системах генерирования и потребления электрической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на полезную модель 66636 Российская Федерация, МПК^7 H 02 P 9/04. Ветроэнергетическая установка / В.М. Чебан, А.В. Коновалов. – № 2007113832/22; заявл. 12.04.07; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25.
2. Патент на полезную модель 89912 Российская Федерация, МПК^7 H 02 P 9/04. Ветроэнергетическая установка / В.М. Чебан, Р.А. Толкацкий. – № 2009128450/22; заявл. 22.07.09; опубл. 20.12.09, Бюл. № 35.
3. *Чебан В.М., Толкацкий Р.А.* Автономный асинхронный генератор двойного вращения // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 02/2 (120). – С. 57–62.
4. Патент на полезную модель 107009 Российская Федерация, МПК^7 H 02 P 21/00. Регулируемый электропривод переменного тока / В.М. Чебан. – № 2011105384/07; заявл. 14.02.2011; опубл. 27.07.11, Бюл. № 21.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННОГО ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Д.Е. Шевцов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, dmitriy_shevtsov@mail.ru

Рассмотрены основные принципы синхронной коммутации. Показан опыт применения вакуумного коммутационного аппарата, реализующего принципы синхронной коммутации, как эффективного средства снижения коммутационных перенапряжений в городских электрических сетях 6 (10) кВ.

The main principles of synchronous switching are considered. The experience of using the vacuum switch device realizing principles of synchronous switching, as effective means to reduce switching over voltages, in urban electric networks 6 (10) kV is presented.

В электрических сетях среднего напряжения при проведении переключений могут возникать перенапряжения, негативно сказывающиеся на изоляции электрооборудования. Новым эффективным способом снижения такого вида коммутационных перенапряжений является применение устройств синхронной (управляемой) коммутации.

Известны разработки устройств синхронной коммутации, среди которых можно выделить следующие: устройство синхронизации Switchsync компании ABB [1], устройство Point on Wave Control ком-

пании Joslin Hi-Voltage [2] и т. д. В России во Всероссийском электротехническом институте им. В.И. Ленина ведется разработка вакуумного выключателя, совмещенного с вакуумным управляемым разрядником и способного подключать конденсаторные батареи к сети без бросков тока [3]. Однако приведенные примеры средств, реализующих принципы синхронной коммутации, имеют ряд недостатков, что затрудняет, а иногда и не позволяет использовать их в электрических сетях 6 (10) кВ.

Синхронный вакуумный выключатель типа EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000 У3 [4] позволяет полностью реализовать принципы управляемой коммутации в сетях 6 (10) кВ.

Сущность синхронизированной коммутации заключается в коммутации электрической сети в строго определенные моменты времени без бросков тока и перенапряжений. Далее представлены основные принципы синхронной коммутации [5].

Синхронное отключение осуществляется путем размыкания контактов выключателя в строго определенный момент времени с опережением момента перехода отключаемого тока через ноль.

Синхронное включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя в строго определенный момент времени с опережением момента перехода напряжения источника через ноль.

Моменты времени отключения и включения могут быть определены по следующему выражению:

$$T_{\text{total}} = T_w + T_{\text{cont}},$$

где T_{total} – время задержки команды на коммутацию; T_w – время реакции контроллера; T_{cont} – время задержки синхронизации, зависит при отключении от собственного времени отключения выключателя, времени расхождения контактов, при включении – от времени включения выключателя, времени предразрядов.

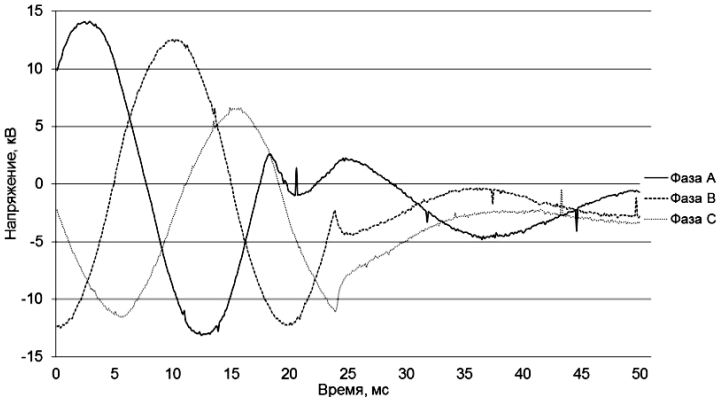
Для апробации и оценки надежности и эффективности синхронного вакуумного выключателя выключатель типа EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000 У3 был поставлен на опытно-промышленную эксплуатацию в «Новосибирские городские электрические сети» филиала ОАО «Региональные электрические сети» [6].

Синхронный вакуумный выключатель установлен в ячейке 13 РП-3 (выполнен ретрофит камеры типа КСО-2). Участок электрической сети, выбранный для защиты синхронным вакуумным выключателем,

выполнен на напряжение 10 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Данный участок характеризуется большой протяженностью и разветвленностью. В составе защищаемого участка электрической сети находятся кабельные и воздушные линии различного сечения. По магистральной схеме получают питание трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ преимущественно коммунально-бытового сектора. Место размещения выключателя является типовым для городских электрических сетей и характеризуется относительно низким уровнем перенапряжений вследствие характера коммутируемой нагрузки и значительной протяженности защищаемого присоединения. В данном случае отсутствуют условия для возникновения критических перенапряжений и бросков тока, однако даже это позволяет оценить надежность работы аппарата и его эффективность

В процессе опытно-промышленной эксплуатации производились плановые и аварийные коммутации аппарата. Выключатель показал себя эффективным и надежным средством как с точки зрения отключения токов короткого замыкания, так и коммутаций при оперативных переключениях. При этом наблюдается полное отсутствие перенапряжений и бросков тока.

На рисунке показана осциллограмма напряжений при плановом отключении аппарата, полученная с встроенного регистратора выключателя. Как видно из рисунка, в моменты коммутации не возникают скачки напряжений на фазах, а следовательно, и перенапряжения.



Осциллограмма напряжений планового отключения

ЛИТЕРАТУРА

1. Controlled switching. Buyer's and application guide. – 3rd ed. – Ludvika, Sweden: ABB High Voltage Products, April 2009. – 54 p. – ABB ID 1HSM9543 22-01 en.

2. Transmaster: Electric ARC furnace switches [Electronic resource]: brochure. – Cleveland: Joslin Hi-Voltage, January 2007. – 8 p. – ID DB 750-205.

3. Патент на полезную модель 55222 Российская Федерация, МПК[7] H 02 J 3/18. Устройство управления конденсаторным регулятором напряжения / Д.Ф. Алферов, Г.С. Белкин, Ю.А. Горюшин, В.Н. Ивакин, В.П. Иванов, В.Г. Киракосов, В.И. Кочкин, А.А. Маслов, О.П. Нечаев, В.А. Сидоров. – № 2006105728/22; заявл. 26.02.2006; опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21.

4. Патент на изобретение 2432635 Российская Федерация, МПК[8] H 01 H 33/666, H 01 H 83/00. Синхронный вакуумный коммутационный аппарат / Е.В. Прохоренко, С.И. Одокиенко, И.А. Лебедев. – № 2010121938/07; заявл. 28.05.2010; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. – 7 с.

5. Применение синхронной коммутации для ограничения коммутационных перенапряжений в электросетях / А.А. Ачитаев, Д.А. Павлюченко, Е.В. Прохоренко, Д.Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2014. – № 3. – С. 42–49.

6. Применение синхронного вакуумного выключателя в городских электрических сетях / А.А. Ачитаев, Д.А. Павлюченко, Е.В. Прохоренко, Д.Е. Шевцов // Главный энергетик. – 2014. – № 7. – С. 46–52.

Подсекция 3. ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

АНАЛИЗ СПОСОБОВ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЕДНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ НА ЛЭП

О.О. Ахмедова, А.Г. Сошинов

Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Камышин, Ahmedova-olga@mail.ru

Проблема предотвращения гололедных аварий в электрических сетях энергосистем актуальна для многих регионов России. Нарушения в работе воздушных линий, вызванные интенсивными гололедными и гололедно-ветровыми нагрузками, являются наиболее тяжелыми по своим последствиям. Однако разрушительное влияние гололедообразования не является фатальным. Это подтверждает опыт энергосистем, систематически ведущих борьбу с гололедом. Предотвращение гололедных аварий базируется на использовании комплексной системы мероприятий, на основе системного подхода.

The problem of preventing icing accidents in electric networks of power systems is relevant in many regions of Russia. Disruptions of overhead lines, caused by intensive icing and icing and wind loads are most severe in their effects. However, the devastating effect of icing is not fatal. This is confirmed by the experience of power systems, systematically carrying on a struggle against ice. Prevention of icing accidents is based on the use of an integrated system of activities in a systematic manner.

Вопросы борьбы с гололедными явлениями на ЛЭП приобретают особую значимость в районах с резко континентальным климатом.

Плавка переменным током промышленной частоты получила широкое распространение на ЛЭП 6…35 кВ, реже 110 кВ. На линиях более высоких ступеней напряжений плавка гололеда производится постоянным током. Это связано с рядом специфических причин присущих ЛЭП высших напряжений (протяженность ЛЭП, параметры линий, сечения проводов, индукционная составляющая).

Схемы и методы плавки гололеда

Плавка гололеда может производиться как с отключением ВЛ на время плавки, так и без отключения.

Плавка с отключением ВЛ производится:

1) токами короткого замыкания, искусственно создаваемого в сети;
2) встречным включением фаз трансформаторов;
3) комбинированным использованием указанных выше способов;
4) постоянным током от отдельного источника.

Плавка без отключения ВЛ производится:

1) увеличением токов нагрузки ВЛ путем изменения схемы коммутации сети;
2) пофазной плавкой при работе ВЛ по схеме два провода–земля.

Наиболее простым способом плавки гололеда является увеличение токов нагрузки ВЛ, но использование его часто ограничено режимом работы энергосистемы. Этот способ следует применять не только для плавки гололеда, но и для предупреждения его образования при возникновении неблагоприятных атмосферных условий.

Для плавки гололеда может применяться как переменный, так и постоянный ток.

Постоянный ток должен применяться в тех случаях, когда применение переменного тока невозможно или сопряжено с большими трудностями. Особенно эффективно применение постоянного тока при плавке гололеда на ВЛ с большими сечениями проводов (300 мм^2 и выше). Для плавки гололеда постоянным током используются специальные выпрямительные установки.

Плавка гололеда переменным током

Плавка гололеда переменным током на проводах может производиться по одному из способов:

1) коротким замыканием;
2) встречным включением фаз трансформаторов;
3) перераспределением нагрузок в сети путем повышения токовой нагрузки обогреваемой линии;
4) наложением дополнительных токов на рабочий ток обогреваемой ВЛ.

Учитывая чрезвычайно тяжелые последствия гололедных аварий, необходимо принимать следующие решительные меры по их предотвращению:

1) внедрение при строительстве или реконструкции ВЛ новых технологий и конструктивных решений, предотвращающих образование опасных ГИО;

2) своевременное выполнение режимных мероприятий, позволяющих поддерживать температуру провода на уровне, не допускающем налипание гололеда;

3) строительство ВЛ с механической прочностью, выдерживающей возможные гололедно-ветровые нагрузки с повторяемостью один раз в 50 лет для ВЛ 330 кВ и выше, 30 лет для остальных ВЛ;

4) своевременное обнаружение характера гололедообразования и направления его распространения для организации работ по его механической обивке или плавке электрическим током (постоянным или переменным).

Интенсивность образования гололедно-изморозевых отложений зависит от скорости ветра, температуры окружающего воздуха, от рельефа местности и расположения проводов к направлению ветра. Наибольшие отложения отмечаются на возвышенных участках трассы линий – там, где выше скорость ветра, ниже температура. Определение расчетных условий по ветру и гололеду должно производиться на основании соответствующих карт климатического районирования территории РФ с уточнением при необходимости их параметров. При неблагоприятных погодных условиях проведение плавок является единственным действенным способом борьбы с образованием гололеда на воздушных линиях передач. При этом эффективность данного способа напрямую зависит от своевременного обнаружения обледенения и принятия оптимального решения по параметрам плавки и выбора ЛЭП. Для этого наряду с традиционными способами обнаружения гололедообразования необходимо применять автоматизированные системы управления плавкой гололеда, позволяющие по совокупности принятых данных определять не только силу тока, необходимую для рациональной плавки, но и последовательность линий электропередач в соответствии со степенью обледенения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по плавке гололеда на ВЛ. – Москва, 1982.

2. Инструкция «Управляемый выпрямитель для плавки гололеда постоянным током напряжением 14 кВ на проводах ВЛ (ВУГП-14»), Волгоград, 2011.

3. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. – М.: МЭЙ, 2007. – 448 с.

4. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях [Электронный ресурс] / Н.Ю. Шевченко, Ю.В. Лебедева, Н.П. Хромов, А.Г. Сошинов // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 127–132. – URL: www.science-education.ru/33-1246 (дата обращения: 23.04.2014).

5. Повышение эффективности воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ в гололедных районах: монография / Г. Угаров, Н. Шевченко, Ю. Лебедева, А. Сошинов. – М.: Перо, 2013. – 187 с.

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГЕНЕРАТОРА И ТУРБИНЫ В АСУ ТП ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А.В. Белоглазов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, beloglazov_a_v@inbox.ru

В работе рассмотрена интеграция системы вибрационного контроля генератора и турбины гидроэлектростанции в АСУ ТП. Показана структурная схема АСУ ТП, включающая систему вибрационного контроля.

An integration of vibration control of the generator and turbine hydropower plant in APCS is considered in this paper. A block diagram of APCS, including a system of vibration control, is shown.

Определение вибрационного состояния генератора и турбины на гидроэлектростанции (ГЭС) осуществляется путем измерения вибрации его опорных конструкций, биения вала и вибрации стальных конструкций и лобовых частей обмоток статора генератора. Для контроля вибрационных параметров может быть использована автоматическая система вибрационного контроля, представленная в [1]. Она позволяет получать, преобразовывать и выводить в удобном виде информацию о состоянии оборудования. Однако наличие автономной системы вибрационного контроля не позволяет персоналу оперативно получать данные о вибрационном состоянии.

Для обеспечения оперативной обработки информации о вибрации подвижных и неподвижных частей гидроагрегата персоналом гидроэлектростанции необходимо реализовать интеграцию системы вибрационного контроля в автоматизированную систему управления технологическими процессами гидроэлектростанции (АСУ ТП ГЭС).

АСУ ТП ГЭС обеспечивает выработку и реализацию управляющих воздействий на соответствующий объект управления в соответствии с принятым критерием управления.

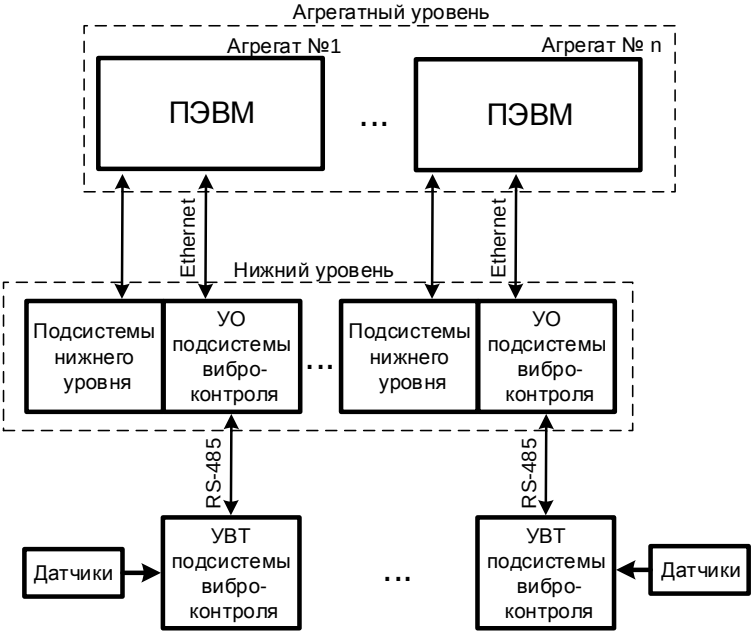
АСУ ТП ГЭС представляет собой сложную структуру, в которой можно выделить четыре уровня: нижний, агрегатный, диспетчерский и инженерный. Выполнение функций вибрационного контроля возможно на нижнем и агрегатном уровнях. На нижнем уровне размещаются устройство выборки и тестирования (УВТ) и устройство опроса (УО). На агрегатном уровне устанавливается промышленная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) для вычисления биений и вибрации. На агрегатном уровне также можно реализовать все защитные функции системы непрерывного вибрационного контроля.

Для взаимодействия всех устройств системы вибрационного контроля и оперативной передачи информации в АСУ ТП необходимо обеспечить каналы обмена.

Связь между устройствами выборки и преобразования и устройством опроса можно осуществить по каналу последовательного обмена RS-485 или RS-232. Канал RS-485 имеет ряд преимуществ. При передаче сигнала по каналу RS-485 используется однополярный источник питания +5В, который используется для питания большинства электронных приборов и микросхем. Это упрощает конструкцию и облегчает согласование устройств. Мощность сигнала передатчика RS-485 в 10 раз превосходит мощность сигнала передатчика RS-232. Отсутствуют помехи в RS-485, передающиеся по нулевому проводу питания (как в RS-232). Таким образом, в качестве канала обмена между устройствами выборки и преобразования и устройством опроса эффективнее применить канал последовательного обмена RS-485.

Устройство опроса и ЭВМ необходимо связать по такому каналу обмена, который обеспечивает высокое быстродействие и возможность подключения к современным ПЭВМ. В качестве такого канала обмена подходит ETHERNET.

На рисунке представлена структурная схема АСУ ТП ГЭС, в которую интегрирована система вибрационного контроля.



Структурная схема АСУ ТП ГЭС с подсистемой вибрационного контроля

Выводы

Интеграция системы контроля вибрационных параметров в АСУ ТП ГЭС повышает оперативность получения данных персоналом станции о вибрационном состоянии. Используя разработанную схему интеграции, можно подключить систему вибрационного контроля к уже существующей АСУ ТП ГЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белоглазов А.В., Сергеев А.С.* Контроль вибрации подвижных и неподвижных частей гидроагрегатов // Теоретические и практические вопросы развития научной мысли в современном мире: 2 междунар. науч.-практ. конф.: сб. статей. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. – Ч. 4. – С. 43–47.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДОВ «ОСТРИЕ–ПЛОСКОСТЬ»

А.Л. Бычков, С.М. Коробейников, А.Г. Овсянников

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, b_aleksandr@ngs.ru

В статье представлены результаты экспериментальных исследований частичных разрядов в резконеоднородном электрическом поле в трансформаторном масле ГК. Выявлено, что при отрицательной полярности острия возникают два типа импульсов, отличающиеся по форме и длительности. Проведены исследования различных типов импульсов с применением электрических и оптико-электронных методов регистрации частичных разрядов.

The results of the experimental studies of partial discharges in GK transformer oil with electrode system “point-plane” that provide sharp inhomogeneous electric field are presented. It was found out that two types of partial discharge pulses which differ in form and time duration appeared at the negative point polarity of the needle. The study of different types of pulses was conducted by electric and electro-optical methods of partial discharge registration.

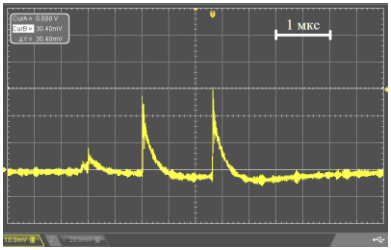
Известно, что частичные разряды (ЧР) опасны тем, что приводят к постепенному разрушению изоляции и являются предпосылками к возникновению электрического пробоя. С другой стороны, измерение частичных разрядов позволяет сегодня энергетическим компаниям заблаговременно выявлять электрооборудование с развивающимися дефектами. Механизмы развития и протекания частичных разрядов в газовых включениях твердой изоляции неоднократно исследовались [1] и широко известны, в то время как механизмы образования ЧР в жидких диэлектриках до сих пор основаны лишь на предположениях. Поэтому целью настоящей работы является исследование характеристик ЧР в трансформаторном масле.

Исследование разрядов в жидких диэлектриках с целью определения коэффициентов газообразования проводилось ранее [2]. При этом, как правило, конструкция экспериментальных ячеек авторов была таковой, что они имели дело со скользящим разрядом. В таком случае возникают несколько вопросов: была ли электрическая связь питающего электрода

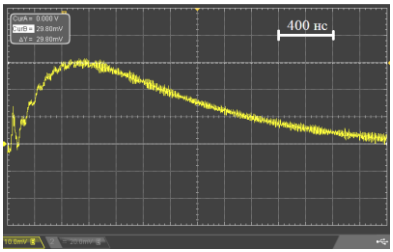
с разрядным каналом; насколько точно было определено значение «кажущегося заряда», а соответственно, и вложенной энергии?

Целью настоящей работы является регистрация характеристик частичных разрядов в системе электродов «острие–плоскость».

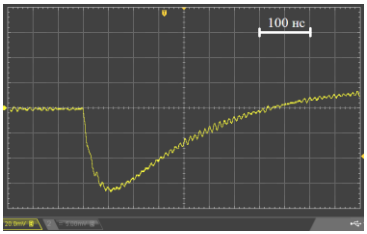
Изучение ЧР в жидкости проводилось при помощи экспериментальной установки с системой электродов «острие–плоскость». При включении установки с ячейкой было отмечено следующее: действующее значение напряжения появления ЧР вблизи острия катод и анод составило 16 и 18 кВ соответственно; частичные разряды как на катоде, так и на аноде, как правило, были зарегистрированы при значениях фазовых углов 50…60°.



а



б



в

ЧР на катоде и аноде (напряжение $U_п$ + 3 кВ):

а, *б* – на острие катод; *в* – на острие анод

Наряду с электрическим методом регистрации был применен фотоэлектронный при помощи фотоэлектронного умножителя ФЭУ-97. Стоит отметить, что на фильтрованном трансформаторном масле ГК, при комнатной температуре на положительной и отрицательной полярности острия импульсы свечения, зарегистрированные при помощи ФЭУ, практически повторяли форму импульсов тока (рисунок). Ча-

стичные разряды (ЧР), возникающие вблизи острийного катода и анода, отличаются между собой по длительности как переднего, так и заднего фронтов. На катоде зарегистрировано два типа импульсов; «короткие» – со временем переднего фронта порядка 2…3 нс, заднего фронта 350…380 нс; «длинные» – со временем переднего фронта порядка 200…250 нс, заднего фронта 2…2,5 мкс. На аноде зарегистрированы импульсы с передним фронтом порядка 45…55 нс, с задним – около 350 нс. Характерные значения кажущегося заряда длинных катодных импульсов 15…40 пКл, коротких катодных 1,5…5 пКл, анодных 1,5…5 пКл.

Выводы

1. Таким образом, экспериментально обнаружено, что частичные разряды в системе электродов «острие–плоскость» при положительной и отрицательной полярности острия имеют разные длительности. На катоде зарегистрировано два типа импульсов: «короткие» – со временем переднего фронта порядка 2…3 нс, заднего фронта 350…380 нс; «длинные» – со временем переднего фронта порядка 200…250 нс, заднего фронта 2…2,5 мкс. На аноде зарегистрированы импульсы с передним фронтом порядка 45…55 нс, с задним – около 350 нс.

2. Экспериментальные данные позволяют оценить, что пороговая напряженность ударной ионизации в трансформаторном масле составляет 15…20 МВ/см.

3. Наиболее правдоподобным объяснением возникновения ЧР является образование дозвуковых стримеров, развитие которых поддерживается многолавинным разрядом в них.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Van Brunt R.J.* Physics and chemistry of partial discharge and corona: recent advances and future challenges // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 23-26 Oct. 1994. – New York, 1994. – P. 29–70. – (IEEE Catalog Number 94 CH 3456-1).

2. *Darian L.A., Arakelyan V.G.* Gassing resistance of insulating liquids // Electrotehnika. – 1997. – N 2. – P. 45–49 (in Russian).

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДРЕСНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

М.В. Васильева

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, vas-mv@yandex.ru

В статье представлен механизм реализации клиентоориентированного подхода к обеспечению надежности электроснабжения. Надежность электроснабжения разделяется на общесистемную и адресную. Обеспечивать адресную надежность предлагается на основе свободных двусторонних договоров.

The realization mechanism of customer-oriented approach to power supply reliability ensuring is presented in the article. Reliability of power supply is decomposed on system and address. It is offered to provide address reliability on the basis of free bilateral contracts.

Анализ действующей нормативной базы [1, 2] позволяет заключить, что действующий на протяжении длительного времени механизм присвоения потребителю электроэнергии одной из трех категорий надежности утратил свое первоначальное содержание, и в России в настоящее время отсутствуют организационно-экономические механизмы, учитывающие уровень надежности электроснабжения конкретного конечного потребителя. В связи с этим естественным образом возникает задача их разработки.

На государственном уровне эта идея отражена в Стратегии развития электросетевого комплекса РФ в области надежности электроснабжения. В документе предлагается «обеспечить диалог с потребителями об их приоритетах – надежности энергоснабжения или цены за соответствующий уровень надежности», т. е. фактически речь идет о реализации клиентоориентированного подхода.

Наиболее распространенной идеей решения поставленной задачи является разработка системы скидок-надбавок к тарифу на передачу электроэнергии. Такой подход, по мнению авторов, достаточно сложен для практического воплощения по следующим причинам.

Во-первых, он потребует пересмотра правил розничного рынка электроэнергии.

Во-вторых, усложнится процедура расчета тарифа на передачу электроэнергии. Если принять во внимание действующую на текущий

момент Методику по расчету и применению понижающих (повышающих) коэффициентов, позволяющих скорректировать тариф на передачу электроэнергии с учетом общего по зоне деятельности сетевой компании уровня надежности, становится очевидно, что введение дополнительных надбавок или скидок сделает тариф непрозрачным для конечного потребителя. Сетевая компания, в свою очередь, не получит ценовых сигналов для обеспечения оптимального уровня надежности электроснабжения.

Чтобы избежать означенных проблем, авторами предлагается разделить надежность электроснабжения на общесистемную и адресную. Вопросы, связанные с первой составляющей, решаются в соответствии со сложившимися правилами розничного рынка. Обеспечение адресной надежности предлагается осуществлять в виде отдельной услуги, предоставляемой на основе свободных двусторонних договоров между сетевыми компаниями и конечными потребителями электроэнергии.

Контрактная система реализована за рубежом [3], однако действующие там механизмы не могут быть перенесены в российскую энергетику ввиду различия условий функционирования отраслей.

Предлагаемая авторами схема отношений между сторонами договора и методы расчета их финансовых обязательств изложены в [4–6].

За счет предоставления дополнительной услуги по обеспечению адресной надежности электроснабжения сетевые компании смогут:

- сформировать дополнительный целевой источник денежных средств, на размер и порядок образования которого не распространяется влияние регулятора розничного рынка электроэнергии;
- получить ценовые сигналы, позволяющие искать технические средства эффективного обеспечения требуемого конкретным потребителям уровня надежности;
- извлекать экономические эффекты, оптимизируя уровни надежности электроснабжения конечных потребителей.

С другой стороны, потребителю контракт по обеспечению индивидуальной надежности позволит:

- во внесудебном порядке получать компенсацию за прерывания электроснабжения сверх нормативов, установленных в договоре, т. е. возмещать понесенные убытки;
- снизить размер собственных единовременных капиталовложений на реализацию технических мероприятий по повышению уровня надежности электроснабжения;
- переложить часть рисков, связанных с ненадежностью электроснабжения, на сетевую компанию.

Свободный характер договоров на обеспечение индивидуального уровня надежности позволит избежать негативных реакций со стороны конечных потребителей электроэнергии, которых устраивает текущий уровень надежности, а также потребителей, не готовых повышать затраты на электроснабжение.

Отделение адресной надежности от общесистемной создает условия для формирования модели ценообразования на рассматриваемую услугу, понятной конечному потребителю. Разделение соответствующих денежных поступлений исключит возможность их нецелевого расходования сетевой компанией.

Кроме того, вынесение обеспечения адресной надежности электроснабжения за рамки существующих на розничном рынке электроэнергии отношений делает разрабатываемую модель удобной для реализации, так как ее внедрение фактически не требует внесения изменений в действующие нормативы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бык Ф.Л., Васильева М.В., Китушин В.Г.* Механизмы обеспечения надёжности электроснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: междунар. науч. семинар им. Ю.Н. Руденко. – Баку: АзНИиПИИЭ, 2013. – Вып. 63. Проблемы надёжности систем энергетики в рыночных условиях. – С. 234–248.

2. *Бык Ф.Л., Васильева М.В., Китушин В.Г.* Надежность электроснабжения клиентов электросетевых предприятий // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. – 2012. – № 3 (20) – С. 73–77.

3. *Васильева М.В.* Зарубежный опыт обеспечения надежности электроснабжения // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. – 2013. – № 4 (25). – С. 144–149.

4. *Бык Ф.Л., Васильева М.В., Китушин В.Г.* Экономический механизм обеспечения технического индекса надежности электроснабжения конечных потребителей энергии // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. – 2014. – № 2 (27). – С. 81–86.

5. *Васильева М.В.* Обеспечение адресной надежности электроснабжения на розничном рынке энергии // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития: сб. материалов 1 междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 128–137.

6. *Васильева М.В., Китушин В.Г.* Разработка модели для расчета стоимости услуги по обеспечению адресной надежности электроснабжения // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. – 2014. – № 3 (28). – С. 101–104.

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

В.В. Дербенёв, А.А.Жданович, Я.В. Панова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, pjv92@yandex.ru

Статья посвящена принципам формирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) на ГЭС. Ключевой задачей при принятии решений является точное объективное предоставление информации о текущей ситуации. Показано, как можно представлять информацию об объектах в виде функций принадлежности, а также определять приоритет параметров оборудования Новосибирской и Саяно-Шушенской ГЭС.

This article is devoted to the principles of constructing the decision support information system at the hydroelectric power plants. It's assumed that the fuzzy sets theory will be used for the representation of the information about the aggregates operating condition parameters. The calculations were made for the equipment of the low-head (Novosibirsk HPP, Hydro Power Plant) and high-head (Sayano–Shushenskaya HPP) power plants.

Введение

Высокая маневренность ГЭС обеспечивает покрытие пиков нагрузки энергосистемы, что делает эти станции незаменимыми при выполнении графика нагрузки. Однако постоянная смена вырабатываемой мощности в широких пределах осложняет работу ГЭС, так как требует быстроты принятия решений от персонала. СППР – это компьютерные системы, разработанные, чтобы помочь ЛПР в принятии решений в управлении.

Оценка эксплуатационного состояния оборудования

Процесс оценивания параметров проходит в несколько этапов, одним из которых является получение базовых оценок [1]. В качестве математического аппарата используется *теория нечетких множеств*, в частности понятие *нечеткого интервала*. Нечеткий интервал может иметь три различных вида (рис. 1).

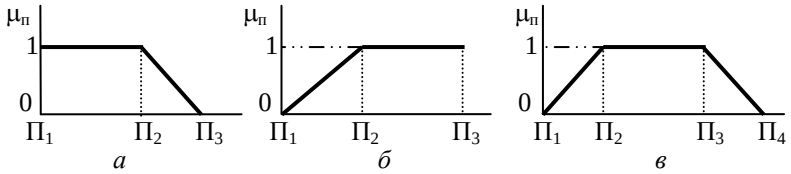


Рис. 1. Виды нечетких интервалов:

а – невозрастающий; *б* – неубывающий; *в* – трапециевидный

Параметрическое описание такого интервала можно представить в виде $N = (\underline{m}^*, \overline{m}^*, \alpha^*, \beta^*)$, где

– для интервалов первого типа (рис. 1, *а*):

$$\underline{m}^* = \frac{П_1}{П_1}100\ \%;\ \ \overline{m}^* = \frac{П_2}{П_1}100\ \%;\ \ \beta^* = \frac{П_3}{П_1}100\ \% - \overline{m}^*; \qquad (1)$$

– для нечетких интервалов второго типа (рис. 1, *б*):

$$\underline{m}^* = \frac{П_2}{П_3}100\ \%;\ \ \overline{m}^* = \frac{П_3}{П_3}100\ \%;\ \ \alpha^* = \underline{m}^* - \frac{П_1}{П_3}100\ \%. \qquad (2)$$

Нечеткий интервал третьего типа (рис. 1, *в*) является совокупностью интервалов первого и второго типа. Полученные данные являются исходными значениям при расчете базовых оценок [1].

Получение базовых оценок эксплуатационного состояния оборудования

Принцип получения базовой оценки основывается на *методе парных сравнений*: для упорядочения множества, состоящего из *n* нечетких интервалов $\{N_1, N_2, \ldots, N_n\}$ используется *способ нечетких отношений*, полученных попарным сравнением интервалов N_i [1]. N_i превосходит наибольший из оставшихся интервалов N_j ($j = 1\ldots n,\ \ j \neq i$), если построить четыре показателя превосходства [1]: $\mathrm{Pos}(\overline{Y_1} \geq \underline{Y_2})$, $\mathrm{Pos}(\overline{Y_1} > \overline{Y_2})$, $\mathrm{Nec}(\underline{Y_1} \geq \underline{Y_2})$ и $\mathrm{Nec}(\underline{Y_1} > \overline{Y_2})$. Тогда $\{N_1, N_2, \ldots, N_n\}$ можно упорядочить. Рассмотрим принцип сравнения двух нечетких интервалов $N_1 = (\underline{m}_1, \overline{m}_1, \alpha_1, \beta_1)$ и $N_2 = (\underline{m}_2, \overline{m}_2, \alpha_2, \beta_2)$ (рис. 2).

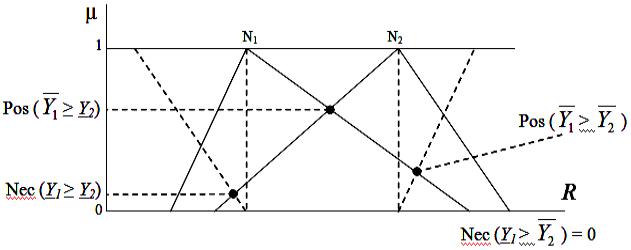


Рис. 2. К сравнению нечетких интервалов

Определение всех мер сравнения – это отыскание всех точек пересечения [1]. Примем:

1) для невозрастающих нечетких интервалов

$$Pos_{1\text{-}2} = \max(0, \min(1, (\overline{m}_1 - \overline{m}_2 + \beta_1)/(\beta_1 + \beta_2)); \quad (3)$$

2) для неубывающих нечетких интервалов

$$Pos(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2) = 1 - Nec(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2), \quad (4)$$

где $Nec(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2) = \max(0, \min(1, (\underline{m}_1 - \underline{m}_2 + \alpha_2)/(\alpha_1 + \alpha_2))$;

3) трапециевидные интервалы разбиваются и рассчитываются по формулам (3) и (4).

Сравнительный анализ был произведен для 10 параметров генераторов обеих станций. Расчет производился по выражениям (1) – (4). Результаты сведены в таблицу.

Базовые оценки параметров генераторов Новосибирской и Саяно-Шушенской ГЭС

№ п/п	Параметр	Мера/ранг	
		НГЭС	СШГЭС
1	Симметричные перегрузки	0,011/7	0,115/6
2	Несимметричные перегрузки	0,091/6	–/–*
3	Температура железа выше нормы	0,432/2	0,786/1
4	Температура меди выше нормы	0,432/2	–/–*
5	Температура горячего воздуха	0,243/4	0,571/2
6	Перегрузка ротора	0,257/5	0,044/7
7	Температура масла в ванне ПП выше нормы	0,5/3	0,214/4
8	Увеличился уровень масла в ванне ПП	0,006/8	0,301/3
9	Температура масла в ванне ПШ выше нормы	0,5/3	0,154/5
10	Увеличение вибрации боя вала	0,526/1	0,214/4

*Значения вышли за пределы допустимых и не влияют на расчет

Анализ результатов. Поскольку Новосибирская ГЭС является низконапорной ($H_{расч}$ =16,5 м), а Саяно-Шушенская ГЭС – высоконапорной ($H_{расч}$ =194 м), то неодинаковость рангов параметров этих станций можно связать со степенью влияния напора, а также с мощностью генератора. Для более объективной оценки ситуации на агрегате необходим учет параметров гидротурбины и блочного трансформатора.

Заключение

Отраженные в статье пояснения и расчеты позволяют говорить о возможности объективного представления информации о текущем состоянии оборудования для этой системы за счет использования данных карт уставвок РЗиА. Метод формирования такой информационной базы для СППР основан на теории нечетких множеств, что позволяет унифицировать разнородные величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Секретарев Ю.А., Жданович А.А., Мосин К.Ю.* Ситуационное управление составом гидроагрегатов на гидроэлектростанциях: монография. – Саяногорск; Черемушки: СФУ, Саяно-Шушенский филиал, 2013. – 152 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, Ю.Н. Кондрашова

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, hvrmgn@gmail.com

Рассматривается методика расчета надежности, основанная на применении логико-вероятностного метода с экспертной оценкой технического состояния объекта. Представлены примеры структурных моделей надежности ответственных механизмов электростанции. Даны рекомендации по обеспечению надежности электроприводов механизмов собственных нужд при внедрении преобразователей частоты.

The paper considers the method for reliability calculation based on the logical-and-probabilistic method with the following expert estimation of the entity technical state. Examples of the developed structural models of

the power station's reliability are provided. The paper also provides recommendations of providing reliability of the essential auxiliaries' electric drives at the introduction of the frequency convertors.

Надежность тепловой электростанции определяется надежностью каждого ее объекта. Проводимая модернизация оборудования, совершенствующиеся технологии приводят к усложнению систем автоматического управления, а следовательно, к снижению их надежности. Так, внедрение преобразователей частоты (ПЧ) при всех своих положительных свойствах отрицательно сказывается на показателях безотказности электроприводов модернизируемых агрегатов [1]. Это не противоречит теории надежности, так как ввод в эксплуатацию дополнительного оборудования вносит свой элемент (вероятность отказа) в общий показатель ненадежности. При внедрении ПЧ основная причина отключений – нарушение электропитания, но имеют место и физические отказы преобразователей [2].

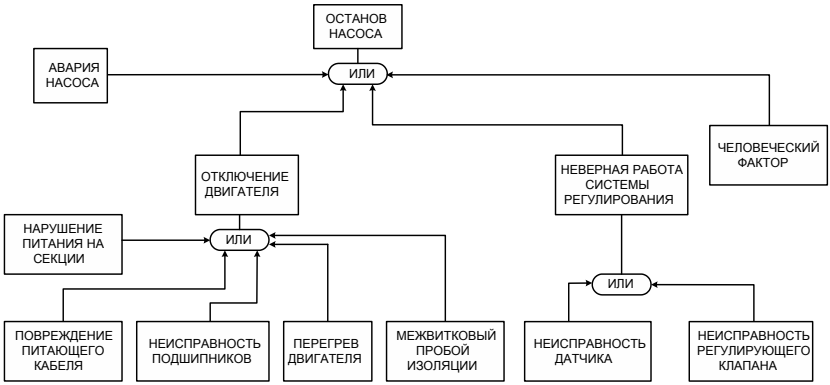
Для оценки надежности электрооборудования необходим большой объем статистических данных, включающих информацию об отказах отдельных элементов и их причинах. В производственных условиях такая информация либо недоступна, либо ее объем недостаточен для получения достоверных результатов. В связи с этим предложена методика, основанная на применении общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) с последующей экспертной оценкой технического состояния объекта [3, 4].

Метод экспертных оценок предполагает проведение опроса группы специалистов. Опрос может проводиться в один или несколько этапов с проверкой степени согласованности мнений экспертов на каждом этапе. Для оценки степени согласованности, как правило, рассчитывается коэффициент конкордации [5].

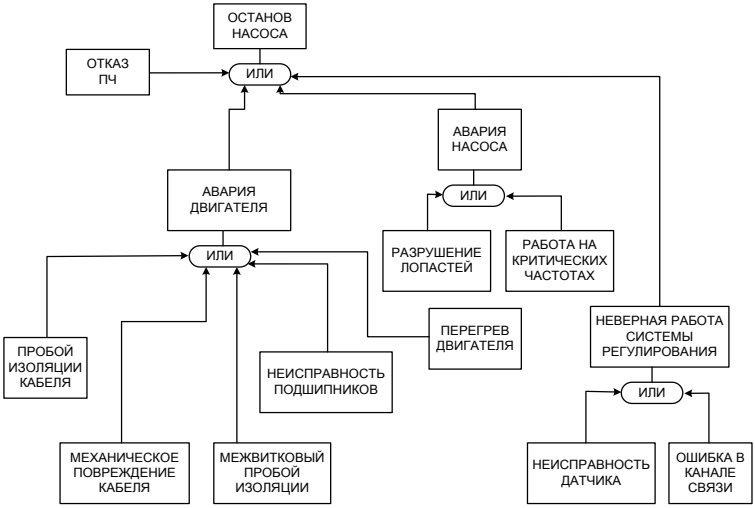
Для оптимизации процесса сбора и обработки информации об отказах оборудования энергоблоков разработаны алгоритмы обработки данных, обеспечивающие классификацию отказов по фактору времени и месту возникновения. Разработаны программы для ЭВМ, осуществляющие формирование архива отказов, статистическую обработку данных, расчет среднего времени наработки на отказ и интенсивности отказов оборудования.

С помощью математического аппарата ОЛВМ построены деревья отказов тепловой электростанции и ее отдельных механизмов, учитывающие как внутренние факторы (остановы агрегатов по различным причинам), так и внешние воздействия (нарушение режимов электро-

снабжения, потеря теплоносителя и др.). В качестве примера на рисунке представлены деревья отказов, характерные для насосов, дымососа и дутьевого вентилятора котла. Структуры построены для нерегулируемых электроприводов (рисунок, *а*) и приводов, выполненных по системе ПЧ-АД (рисунок, *б*).



а



б

Структурные схемы отказов ответственных механизмов
(на примере насоса)

В результате расчета показателей надежности работы агрегатов ТЭЦ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» с использованием разработанной методики показано, что общая надежность тепловой электростанции при оснащении частотно-регулируемыми электроприводами (ЧРП) снижается в 3–4 раза.

В качестве основного мероприятия по обеспечению надежности необходимо совершенствовать автоматический самозапуск ЧРП. В этом направлении выполнены разработки новых алгоритмов и систем управления электроприводами, обеспечивающих минимальное время восстановления технологического режима [6]. В качестве альтернативного решения предлагается исполнение силовой схемы ПЧ со сдвоенным звеном постоянного тока и возможностью электропитания выпрямителей от двух независимых вводов.

Работа выполнена в рамках госзадания № 2014/80 Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12, № 34. – С. 16–22.

2. Проблемы внедрения частотно-регулируемых электроприводов на ответственных механизмах тепловой электростанции / Ю.А. Крылов, И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, А.Р. Губайдуллин, В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 19–25.

3. Расчет надежности электроприводов при внедрении преобразователей частоты / А.С. Карандаев, А.А. Шеметова, О.И. Карандаева, Г.В. Шурыгина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 59–64.

4. *Шеметова А.А., Карандаев А.С., Карандаева О.И.* Методика расчета надежности автоматизированных электроприводов прокатного стана // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 48–54.

5. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие для вузов / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов, В.А. Пучков; под ред. М.И. Фалеева. – М.: Деловой экспресс, 2002. – 367 с.

6. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, Т.Р. Храмшин, В.Р. Храмшин, А.Р. Губайдуллин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 62–69.

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

С.А. Евдокимов, А.А. Николаев, Р.А. Леднов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, hvrmgn@gmail.com

Представлены структурная схема и состав оборудования системы мониторинга, реализованной на силовых трансформаторах цеха электрических сетей и подстанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Отмечены основные технические эффекты от внедрения системы.

The complete circuit diagram and the description of diagnostic system implemented on power transformers plant electrical networks and substations of the OJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” are given in the article. They described the technical advantages offered by the implementation of the developed system.

Энергетическая безопасность промышленных предприятий во многом определяется надежностью работы силовых трансформаторов. Внедрение средств мониторинга и диагностирования технического состояния электрических сетей и установок потребителей, и в первую очередь высоковольтных маслонаполненных трансформаторов, является важнейшей задачей технологии Smart Grid как в энергосистемах, так и в промышленных электрических сетях.

Задача внедрения диагностического оборудования актуальна для ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), трансформаторный парк которого в значительной степени выработал нормативный ресурс [1]. Оснащение основного оборудования средствами технического диагностирования включено в перечень приоритетных направлений комбината. Соответственно, возрастает роль методов диагностирования в режиме реального времени. Однако в настоящее время опыта внедрения и эксплуатации стационарных систем непрерывного контроля и диагностирования технического состояния силовых трансформаторов в ОАО «ММК», как и на большинстве промышленных предприятий, недостаточно. Данные системы должны разрабатываться с учетом назначения и специфики режимов трансформаторов (сетевые, блочные, печные). При этом в обязательном по-

рядке должен быть обеспечен непрерывный контроль следующих диагностических параметров [2]:

– влагосодержание масла;

– состав газов, растворенных в масле;

– состояние изоляции высоковольтных вводов;

– температура верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора;

– частичные разряды на высоковольтных вводах и в баке трансформатора.

Разработана система мониторинга и многопараметрического диагностирования технического состояния, внедренная на силовых трансформаторах цеха электрических сетей и подстанций (ЦЭСиП) ОАО «ММК». Структура системы представлена на рис. 1.

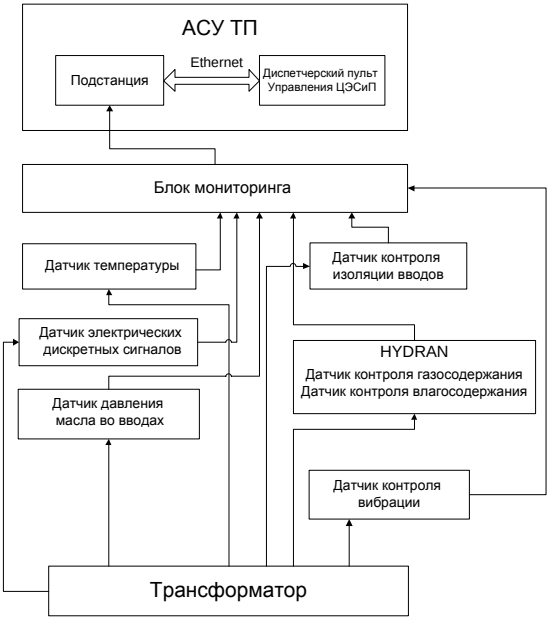


Рис. 1. Структурная схема диагностической системы, реализованной на трансформаторах ЦЭСиП ОАО «ММК»

Диагностический комплекс выполнен на оборудовании, производимом ОАО «Димрус», г. Пермь, которое эксплуатируется на многих

отечественных и зарубежных энергетических объектах. Основными диагностическими приборами являются анализатор газов, растворенных в масле, типа Hydran M2; датчики частичных разрядов, установленные на высоковольтных вводах, и датчики температуры верхних и нижних слоев масла. Сбор и обработка диагностической информации осуществляются с помощью системы TIM-3 либо более совершенной системы TDM P034, фотография которой показана на рис. 2 [3]. В настоящее время аналогичные системы внедряются на нескольких трансформаторах ЦЭСиП и ТЭЦ ОАО «ММК». Ведутся сбор, обработка и накопление статистической информации.

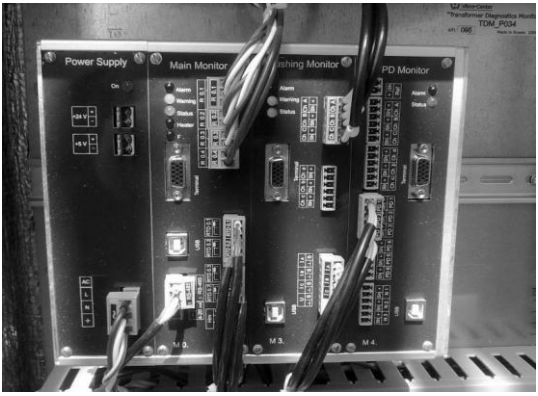


Рис. 2. Системы диагностического мониторинга трансформаторного оборудования TDM P034

Основным недостатком, ограничивающим применение многопараметрических систем диагностирования, является отсутствие апробированных инженерных методик, позволяющих идентифицировать неисправности по совокупности диагностических признаков. Работы по созданию таких методик ведутся многими отечественными и зарубежными учеными, в том числе сотрудниками Магнитогорского государственного технического университета совместно со специалистами ОАО «ММК» и фирмы «Димрус».

Внедрение систем и методик диагностирования позволит добиться следующих результатов:

– продлит ресурс трансформаторов и поможет оперативному персоналу своевременно принимать решения на основе полноты получаемой информации;

– поможет эффективно распределять финансовые ресурсы при ремонте и замене оборудования;

– внедрение интеллектуальных систем контроля будет способствовать росту квалификации эксплуатационного персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карандаева О.И.* Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – № 34 (251). – С. 15–20.

2. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 58–68.

3. Модульная система для мониторинга состояния трансформаторного оборудования TDM (TDMR): руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Пермь: ПВФ «Димрус». – 12 с. – URL: http://dimrus.ru/download/category/23-tdm.html (дата обащения: 12.11.2014).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗРЯДНИКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

С.А. Казакова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, svetik0314@mail.ru

Работы под напряжением (ПРН) осуществляются для обеспечения надежности линий электропередачи (ВЛ). Для систем напряжением более 200 кВ используется метод «голой руки». Производство ремонтных работ под напряжением возможно, если изоляционные промежутки в зоне ПРН превышают минимальные допустимые значения. Это требование обеспечивает безопасность ПРН, исключая перекрытия изоляции в зоне ПРН при возможных перенапряжениях. В некоторых случаях изоляционные промежутки оказываются меньше допустимых. Чтобы защитить их от перекрытия, были разработаны специальные ограничители перенапряжений. Эффект от их установки проверен расчетами коммутационных перенапряжений.

Live working (LW) is performed to provide the reliability of transmission lines (TL). Only bare hand method of LLW is used at voltage system

more than 200 kV. Live working (LW) is possible if the minimum approaching distances are in working place. This requirement provides the safety of LW excluding flashover of insulating gaps under the switching overvoltage impact. In some cases it is impossible to provide required gaps in LW zone. In order to protect it against possible flashover the special arresters were designed. Their effect on overvoltage magnitude was checked in calculations.

В настоящее время распространены работы по ремонту и обслуживанию воздушных линий (ВЛ) без отключения напряжения на них. Причинами этого стали возросшие требования к надежности межсистемных ВЛ и экономические потери при плановых и случайных отключениях. Главной проблемой при проведении работ под напряжением (ПРН) является обеспечение безопасности персонала.

В России ПРН на линиях напряжением выше 220 кВ (о которых пойдет речь в этой статье) осуществляется по схеме «провод – человек – изоляция – земля», которая предназначена для выполнения работ с непосредственным касанием провода или других элементов ВЛ, находящихся под напряжением.

При проведении работ под напряжением важным фактором является соблюдение изоляционных расстояний между монтером и элементами ВЛ.

В настоящее время минимальные расстояния приближения при ПРН составляют [2]:

Минимальные расстояния при ПРН

Класс напряжения, кВ	220	330	500	750
Минимальные расстояния приближения при ПРН, м	2,1	2,5	3,5	4,9

Но сейчас широко разрабатываются так называемые «компактные ВЛ», их использование позволит сократить затраты на строительство линий, а также уменьшить занимаемую ВЛ площадь.

Также в настоящее время в эксплуатации находятся ВЛ на опорах, на которых соблюдение данных промежутков невозможно из-за их конструктивных особенностей [2].

Для соблюдения требований безопасности персонала при проведении работ под напряжением на подобных ВЛ предлагается использовать специально разработанные линейные разрядники. В России линейные разрядники получили название «подвесные ОПН».

Основным отличием подобных ОПН (ОПН–ПРН) от уже используемых является более низкое напряжение срабатывания, а также (в идеале) отсутствие искрового промежутка.

В ходе исследований были сформулированы характеристики ОПН-ПРН [1], а также проведены расчеты для определения возможных уровней перенапряжений, возникающих на ВЛ, в том числе ограниченных с помощью защитных аппаратов ОПН–ПРН были проведены расчеты в программах МАЭС и АТР– ЕМТР.

В расчетах моделировались однофазное короткое замыкание (КЗ) и автоматическое повторное включение ВЛ в циклах трехфазного (ТАПВ) автоматического повторного включения ВЛ 220 кВ и однофазного (ОАПВ) для ВЛ 500 кВ. Выбор классов напряжения диктовался наибольшей распространенностью данных ВЛ в России.

Место замыкания на ВЛ варьировалось с шагом в четверть длины ВЛ. Присоединение линии к энергосистемам через питающую и приемную подстанции моделировалось эквивалентными узлами с некоторыми усредненными параметрами.

Выделим некоторые результаты расчетов.

– Кратность неограниченных перенапряжений при коротких замыканиях не превышает 1,8 и 1,7 для ВЛ 220 и 500 кВ соответственно. Поэтому если на время ПРН устройства автоматического повторного включения линий выводить из работы, то надобности в ограничении перенапряжений не возникнет.

– При ТАПВ ВЛ 220 кВ перенапряжения, возникающие в какой-либо из зон ПНР, не зависят от точки короткого замыкания, вызвавшего отключение ВЛ. Это вполне логичный факт, поскольку за время паузы ТАПВ заряды успевают стечь, и повторное включение линии возникает при нулевых зарядах на всех проводах.

– Максимальные неограниченные перенапряжения возникают в середине ВЛ 500 кВ при ОАПВ, что тоже не противоречит известным представлениям о коммутационных перенапряжениях.

– Работа защитного аппарата приводит к ограничению примерно на одном и том же уровне напряжения, которое соответствует моменту пробоя искрового промежутка.

– Ток, протекающий через ОПН, имеет колоколообразную форму с амплитудой в несколько сотен ампер и длительностью на полувысоте не более 1 мс, что вполне удовлетворяет условию нормальной работы защитного аппарата.

Выводы

– Перенапряжения, возникающие при случайных коротких замыканиях на здоровых фазах линии, не требуют ограничения амплитуды.

– Невысокие перенапряжения имеют место и при ТАПВ ВЛ 220 кВ.

– Наибольшие по величине перенапряжения возникают при коммутации типа ОАПВ на ВЛ 500 кВ и расположении зоны ПРН в средних частях линии. Именно в этих случаях эффективность применения защитных аппаратов в части сокращения требуемых изоляционных промежутков зоны ПРН особенно высока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Батраков А.М, Коробков Н.М., Овсянников А.Г.* Производство ремонтных работ под напряжением на воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения. – Новосибирск: Наука, 2009. – 317 с.

2. *Барг И.Г., Эдельман В.И.* Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

Автор выражает благодарность Овсянникову Александру Георгиевичу, д-ру техн. наук, профессору кафедры ТЭВН Новосибирского государственного технического университета.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н.Н. Керимкулов, В.М. Левин

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, vlevin@ngs.ru

Рассмотрены ключевые принципы статистической идентификации состояний маслонаполненного оборудования по результатам хроматографического анализа растворенных газов. Показана их информационная состоятельность и преимущества практического применения.

The key principles of statistical identification of conditions of the oil equipment by results of dissolved gas analysis are considered. Their information solvency and advantages of practical application is shown.

Электрические сети высокого и сверхвысокого напряжения содержат значительное количество трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов (далее маслонаполненное оборудование, МНО), срок службы которых превышает нормативный. Как известно, длительно находившееся в эксплуатации МНО при своевременном контроле и надлежащем обслуживании может надежно функционировать, не создавая проблем. Одно из основных условий надежной эксплуатации такого оборудования – достоверная идентификация текущего состояния, сопровождающая периодический либо online контроль.

В настоящее время наибольший эффект способны обеспечить методы статистической идентификации дефектов в МНО по результатам хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ) [1, 2]. К их достоинствам наряду с прочими относятся компактность и достоверность описания пространства состояний МНО, а также возможность его ранжирования по факту наличия, виду и степени тяжести дефекта. Метод статистической идентификации состояний МНО по результатам ХАРГ базируется на ряде ключевых принципов, которым должны соответствовать вариационные ряды признаков:

- нормальность и однородность статистических распределений;
- возможность определения интегральных и числовых характеристик признаков для каждого из классов состояний;
- возможность формирования линейно-реализуемой дихотомии классов;
- возможность разграничения смеси однородных распределений внутри любого из классов.

Практическое подтверждение информационной состоятельности и корректности, сформулированных в [2] ключевых принципов статистической идентификации с применением реальной диагностической статистики имеет особую актуальность. Оно обеспечивает возможность для разработки компактных и конструктивных решений по достоверной оценке состояния МНО в режимах его периодического либо online мониторинга.

В связи с этим целью данной статьи является проверка информационной состоятельности указанных принципов, а также достоинств их практического применения.

Вариационные ряды диагностических признаков формируются на основе выборок протоколов ХАРГ однотипного МНО с заданной глубиной ретроспективы. В данном случае речь идет об автотрансформаторах (АТ) 220 кВ, принадлежащих двум филиалам МЭС-1 и МЭС-2.

Представительность выборок определяется количеством установленных АТ и сроком их службы. Глубина ретроспективы составляет 15 лет (с 2000 по 2014 г.). Полученные результаты позволяют сформулировать следующие важные с практической точки зрения заключения.

1. Гистограммы относительных частот признака $G(A)$ в классе Π_1 по каждому МЭС представляют собой смеси нескольких распределений.

2. Проверка гипотезы об однородности двух независимых выборок переменной $G(A)$ для разных МЭС в классах состояний Π_1 и Π_2 с использованием критерия Вилкоксона не опровергает ее состоятельность. Этот факт подтверждает корректность объединения однородных выборок, что позволит повысить представительность объединенной выборки и точность производимых по ней оценок.

3. Интервал изменения варианта $G(A)$ обусловлен отличием сроков службы обследуемых АТ (старение постепенно увеличивает концентрации характерных газов и, как следствие, значения $G(A)$) и выполнением мероприятий по их ремонту и обслуживанию. Как правило, ремонт, включающий дегазацию масла, уменьшает концентрации газов, а вместе с ними и значения $G(A)$, делая их сопоставимыми со значениями, характерными для нового оборудования.

4. Одной из важнейших с точки зрения практического применения статистических оценок является оценка границы раздела классов состояний Π_1 и Π_2, определяемая с использованием числовых характеристик полученных согласно [2] распределений.

Оценки границ раздела классов состояний АТ-220 кВ по цензурированным выборкам разных возрастных групп филиалов МЭС-1 и МЭС-2 существенно различаются. Различие обусловлено составом АТ, представительностью цензурированных выборок, а также наличием индивидуальных особенностей МНО в отдельных возрастных группах.

Выводы

1. Практические приложения ключевых принципов статистической идентификации применительно к выборкам протоколов ХАРГ АТ-220 кВ филиалов МЭС-1 и МЭС-2 иллюстрируют их достаточную информационную состоятельность.

2. Преимуществом получаемых по цензурированным выборкам статистических решений является возможность достоверной оценки состояния МНО с учетом ряда эксплуатационных факторов, например таких, как срок службы АТ, наличие профилактических мероприятий

на интервале наблюдения, а также индивидуальные особенности оборудования различных возрастных групп.

3. Проведенные статистические исследования и оценка границы раздела классов состояний МНО подтвердили высокую достоверность (больше чем 98 %) и удобство практического применения полученных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Давиденко И.В.* Идентификация дефектов в трансформаторах 35–500 кВ на основе АРГ: статья [Электронный ресурс] // energoboard.ru: web-сайт: [доска объявлений по электротехнике]. – URL: http://www.energoboard.ru/articles/720-identifikatsiya-defektov-v-transformatorah-35-500kv-na-osnove-arg.html (дата обращения: 12.11.2014).

2. *Левин В.М.* Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию // Промышленная энергетика. – 2013. – № 8. – С. 37–41.

ПОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОРГАНА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ НАЛИЧИИ ПОДПИТКИ

Е.А. Конова, А.В. Ференец

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, konovaea@yandex.ru

Рассматривается поведение измерительного органа сопротивления дистанционной защиты при коротком замыкании в зоне резервирования с учетом возможного изменения по модулю и фазе эквивалентных ЭДС источников по концам воздушной линии.

Distance protection impedance-measuring unit response is considered for a short circuit in a back-up zone by means of possible differences between magnitudes and phase angles of equivalent generating sources voltages on overhead line ends.

В связи с большими возможностями, открывшимися при использовании микропроцессорной техники [1], появилось большое число разновидностей характеристик срабатывания измерительного органа сопротивления (ИОС) дистанционной защиты (ДЗ). При этом возникают

вопросы, связанные с выбором целесообразной формы характеристики срабатывания и расчетом ее параметров.

Существенное влияние на параметры срабатывания ИОС оказывает различие в токах, протекающих на отдельных участках линии между местом установки защиты и местом короткого замыкания (КЗ) – влияние подпитки [2].

Рассматриваемое различие может иметь место для второй и третьей (четвертой – если она есть) ступеней. Для линий с ответвлениями это различие возможно и для первой ступени [2]. В данной работе рассматривается влияние указанного фактора на селективность и чувствительность резервных ступеней для линий с пренебрежимо малой поперечной проводимостью.

При КЗ на линии Л2 в точке К (рис. 1) ток на входе ДЗ, установленной в точке 1, не равен току, протекающему по поврежденному участку линии вследствие подпитки места повреждения током от системы С3 [1, 3]. При этом сопротивление на входе ДЗ зависит не только от расстояния до места КЗ, но и от соотношений эквивалентных ЭДС по модулю и фазе.

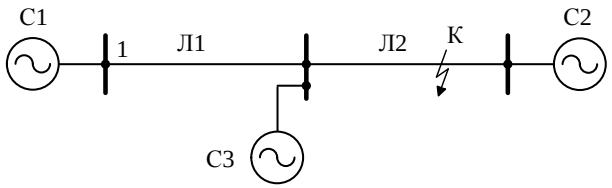


Рис. 1. Схема сети

Для нахождения области, в которой располагается годограф сопротивления $\underline{Z}_{ДЗ}$ при КЗ в зоне резервирования, рассмотрим эквивалентную схему замещения сети, приведенную на рис. 2, где $\underline{E}_1$, $\underline{E}_3$, $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_3$ – эквивалентные ЭДС и сопротивления систем; $\underline{Z}_{Л1}$ – сопротивление защищаемой воздушной линии электропередачи (ВЛ) с сосредоточенными параметрами; $\underline{Z}_{КЗ}$ – сопротивление участка между концом ВЛ и местом повреждения (точка К на рис. 1).

Сопротивление в месте установки ДЗ:

$$\underline{Z}_{ДЗ} = \underline{Z}_{Л1} + \underline{Z}_{КЗ} \frac{\underline{q}\ \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{Л1} + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{КЗ} - \underline{q} \cdot \underline{Z}_{КЗ}}, \quad \underline{q} = \frac{\underline{E}_3}{\underline{E}_1}. \qquad (1)$$

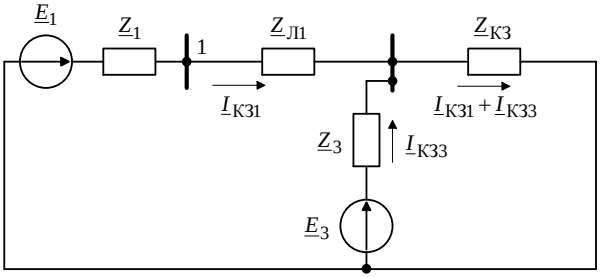


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения сети при КЗ в зоне резервирования

Выражение (1) показывает, что сопротивление на входе ИОС ДЗ $\underline{Z}_{ДЗ}$ связано с соотношением ЭДС дробно-линейной зависимостью. Следовательно, при изменении соотношения между ЭДС только по модулю (δ = const) или только по фазе (q = const) годограф сопротивления представляет собой окружность.

1) Изменение соотношения ЭДС по модулю (δ = const).

Параметры окружности (окружности *1*, *2* на рис. 3):

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{a} - (qk)^2 \underline{b}}{1-(qk)^2}, \quad R_0 = qk\left|\frac{\underline{a}-\underline{b}}{1-(qk)^2}\right|,$$

где $\underline{a} = -\underline{k}_4 / \underline{k}_3$, $\underline{b} = -\underline{k}_2 / \underline{k}_1$, $k = \left|\underline{k}_1 / \underline{k}_3\right|$;

$\underline{k}_3 = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_{КЗ}$, $\underline{k}_4 = -\ \underline{Z}_{Л1}\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{Л1}\underline{Z}_{КЗ} + \underline{Z}_3\underline{Z}_{КЗ}$,

$\underline{k}_1 = \underline{Z}_{КЗ}$, $\underline{k}_2 = \underline{Z}_1\underline{Z}_{КЗ}$.

2) Изменение соотношения ЭДС по фазе (q = const).

Параметры окружности (окружности *3*, *4* на рис. 3):

$$\underline{z}_0 = \frac{\underline{a}+\underline{b}}{2} + j\frac{\underline{a}-\underline{b}}{2\mathrm{tg}\ \delta - \beta}, \quad r_0' = \left|\frac{\underline{a}-\underline{b}}{2\sin(\delta-\beta)}\right|,$$

где $\beta = \arg\dfrac{\underline{k}_3}{\underline{k}_1}$.

Результирующая область расположения годографа сопротивления определяется как общая для вышеприведенных условий (на рис. 3 указанная область заштрихована).

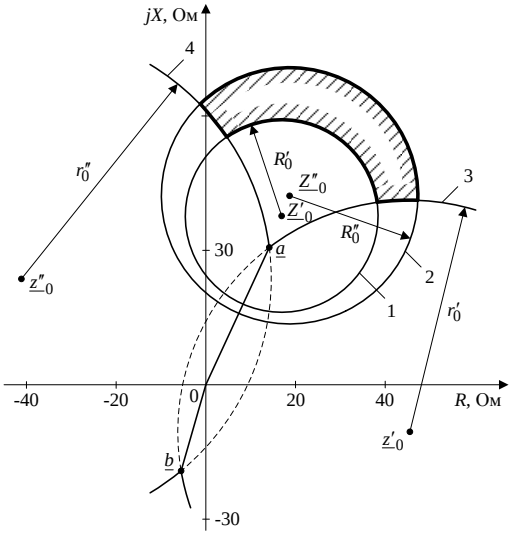


Рис. 3. Область расположения годографа сопротивления при КЗ в зоне резервирования

Приведенные соотношения позволяют оценить влияние подпитки на работу ИОС второй и третьей ступеней ДЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шнеерсон Э.М.* Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

2. *Фабрикант В.Л.* Дистанционная защита: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 215 с.

3. *Шнеерсон Э.М.* Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

4. *Фабрикант В.Л.* Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. – М.: Высшая школа, 1968. – 267 с.

АНАЛИЗ И ТРЕБОВАНИЯ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В.А. Корнев, А.В. Шмойлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, kornev_vasja@mail.ru

Проанализированы естественные условия построения и безопасность обслуживания релейных защит силовых элементов. Предложен единый для всех линий принцип построения дифференциально-фазной защиты, устраняющий недостатки ступенчатых защит и защит с абсолютной селективностью.

The natural conditions of the building and service safety of relay protection power elemenst are analysed. It is offered united for all line principle buildings carrier-current protection avoiding defect current, dictance and differential protection.

Построение средств релейной защиты (РЗ) силовых элементов (генератор, двигатель, преобразователь, трансформатор, автотрансформатор, реактор, линия, узел или секция) систем выработки, передачи и потребления электроэнергии от разрушительного действия токов коротких замыканий (КЗ) возможно благодаря ряду потенциально благоприятных условий электрической части энергосистем, позволяющих реализовать необходимые полезные свойства РЗ: селективность, чувствительность, быстродействие и надежность.

Перечень потенциально благоприятных условий можно сформулировать в следующем виде:

1) сетевая структура электрической части энергосистем благодаря которой можно обнаруживать не только сам факт КЗ, но и силовой элемент, на котором оно произошло;

2) переменный ток 50…60 Гц, на котором работает вся электрическая часть, вследствие чего имеется принципиальная возможность легко, с небольшими энергозатратами подавить (прекратить) ток в цепи любого силового элемента в интервале перехода мгновенных значений промышленного тока через нулевое значение;

3) коммутационные аппараты (выключатели, автоматы) на концах линий и выводах оборудования, секционирующие сеть, способные при воздействии на их приводы сигнала ручного или автоматического управления осуществить выделение (отделение) концов или выводов каждого силового элемента от сети и реализовать на своих дугогаси-

тельных устройствах это выделение, т. е. подавление (отключение) протекания как рабочих токов, так и токов КЗ через цепи силового элемента в интервале времени малых мгновенных значений промышленного тока, когда последний переходит через нулевое значение;

4) потоковый характер параметра реагирования, протекающего по силовому элементу и фиксируемого в нем измерительными органами, что также способствует выявлению (выделению) элемента с КЗ по принципу максимального отличия параметра реагирования в рабочих режимах и при КЗ на аварийно поврежденном силовом элементе по максимуму для токов и минимуму для сопротивлений прямой последовательности – основных параметров реагирования измерительных органов РЗ.

Однако, для обеспечения однозначно гарантированной фиксации КЗ на силовом элементе и быстродействия РЗ использования названных благоприятствующих условий недостаточно. Необходима также возможность блокирования работы РЗ при внешних КЗ относительно защищаемого силового элемента, которая во всех средствах РЗ в настоящее время, как правило, предусмотрена. Она состоит из измерительного органа контролирующего направление потока параметра реагирования на концах (выводах) силового элемента и канала передачи информации, если это направление внешнее относительно защищаемого элемента.

В случае дифференциальных защит пространственно сосредоточенного оборудования и защит с обменом информацией на разных концах пространственно распределенных линий применены физические каналы. В первом случае дифференциальных токовых защит – это цепи циркуляции, соединяющие вторичные обмотки трансформаторов тока на концах (выводах) каждой защищаемой фазы силового элемента в такой полярности, когда в подключенных параллельно к названным цепям измерительных органах при внешнем КЗ сигнала нет, а при внутреннем КЗ сигналы токов концов (выводов) геометрически суммируются, обеспечивая высокую чувствительность. Дифференциальный принцип РЗ оборудования может быть реализован иначе: на равновесие величин или углов ЭДС датчиков тока, если их проходные характеристики в отличие от трансформаторов тока на холостом ходу линейны, например у трансреакторов. Однако при реализации дифференциального принципа обменные цепи или иные каналы между датчиками физически должны быть.

В случае многокилометровых линий электрические цепи циркуляции или равновесия ЭДС вместе с датчиками практически аналогично защищаемым силовым элементам превратились бы в источники помех. То есть наличие длинного физического канала логически приводит к необходимости контроля его исправного состояния, что обусловливает необходимость цикла контроля состояния канала обмена. Канал блокирования может быть организован по проводам линии, что реализуется на высоких частотах по сравнению с частотой промышленного тока. В этом случае отпадает проблема мониторинга исправности длинного канала блокирования, однако снижается безопасность обслуживания при работе в цепях приемопередатчиков, имеющих зашунтированную при ремонтах электрическую связь с фазным напряжением линии.

В случае ступенчатых защит канал блокирования имитируется посредством согласования ступеней защит по времени и параметру реагирования. Например, вторые ступени РЗ линий согласуются по времени и параметру реагирования с быстродействующими защитами предыдущих (в направлении действия второй ступени защищаемой линии) силовых элементов линий: первыми ступенями защит предыдущих линий, дифференциальными защитами предыдущих трансформаторов и автотрансформаторов.

Благодаря согласованию вторая ступень защищаемой линии оказывается менее чувствительной и более медленно действующей по сравнению с быстродействующими защитами предыдущих элементов к КЗ в зоне действия их защит на предыдущих элементах. Таким образом, за счет снижения чувствительности и быстродействия вторых ступеней удается сымитировать блокирующий канал при его физическом отсутствии.

Резервирующие ступени обычно согласуются с резервирующими ступенями предыдущих элементов сети только по времени, что обеспечивает имитацию каналов блокирования за счет существенного возрастания времени действия резервирующих ступеней силовых элементов по мере приближения их расположения к источникам, что противоречит желаемой логике РЗ. Если же относительно защищаемых элементов имеют место обходные связи, то возникает цикл неограниченного возрастания времени действия резервирующих ступеней, который принципиально логически не может быть разрешен, т. е. фактически в сложно замкнутых сетях резервирующие ступени РЗ не могут быть принципиально правильно настроены.

Приведенные требования, анализ недостатков ступенчатых защит и проблемы трансформации сигналов при КЗ актуализируют вопрос о разработке модулей РЗ с абсолютной селективностью и измерением первичных величин.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

С.М. Коробейников, Н.Я. Илюшов, А.Л. Бычков

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, kamchatka1234@rambler.ru

Экспериментально показано, что сопротивление частотозависимого устройства остается высоким вплоть до токов в несколько сотен ампер при частотах 60…200 кГц. Это указывает на его работоспособность не только при рабочих токах, но и при токах молний.

It is shown experimentally that active resistance of frequency-dependent device keep his high value till the currents of several hundreds kiloampere at the frequencies from 60 kHz up to 200 kHz. It points out the working capacity of device not only at operating current but at lightning strokes.

Частотозависимое устройство предложено ранее для защиты подстанций от высокочастотных перенапряжений [1–4]. Идея состоит в том, чтобы «в рассечку» фазы включить устройство, сопротивление которого мало на рабочей частоте и велико на частотах, характерных для перенапряжений. Тем самым должно происходить ограничение перенапряжений. Проведенные низковольтные испытания показали, что сопротивление действительно увеличивается на 4-5 порядков при изменении частоты от 50 до 1 МГц [4, 5]. Однако поскольку в устройстве присутствуют ферромагнитные элементы, возможно их насыщение в сильных магнитных полях, создаваемых протекающими токами.

Целью сильноточных испытаний являлось определение активного сопротивления образца и токов насыщения частотозависимого устройства (ЧЗУ) на различных частотах. Эксперименты проводились на образце, который представлял собой трехметровый отрезок частотозави-

симого провода. Для проведения сильноточных измерений данного образца была использована схема, показанная на рис. 1 [6].

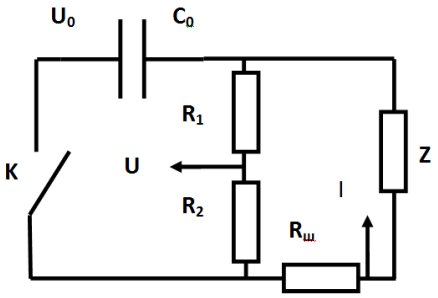
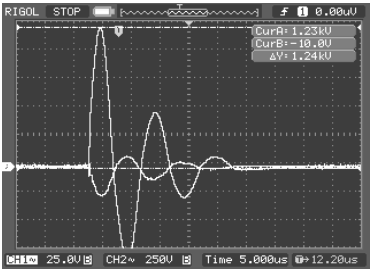


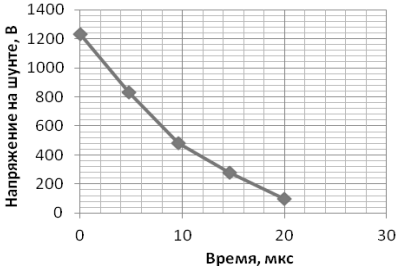
Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сильноточных испытаний

Активное сопротивление образца частотозависимого провода можно определить через добротность Q колебательного контура, которым является схема измерения, представленная на рис. 1.

Измерения проводились при трех конденсаторах C_0 емкостью 0,1; 0,5 и 1 мкФ. При этом частота входного сигнала составляла 240, 102 и 66 кГц соответственно. На рис. 2 представлены осциллограммы входных импульсов и график затухания колебаний при частоте входного сигнала 102 кГц (C_0 = 0,5 мкФ).



а



б

Рис. 2. Определение активного сопротивления образца при частоте 102 кГц

Расчетные значения погонного активного сопротивления $R_п$ и значения силы тока в ЧЗУ при частотах входного сигнала 102 кГц приведены в таблице, график их зависимости показан на рис. 3.

Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ при частоте входного сигнала 102 кГц

I (А)	393	533	673	4100
R (Ом)	0,33	0,271	0,24	0,203

Графики позволяют приблизительно определить значение тока глубокого насыщения при различной частоте входного сигнала и сделать выводы о работоспособности частотозависимого устройства.

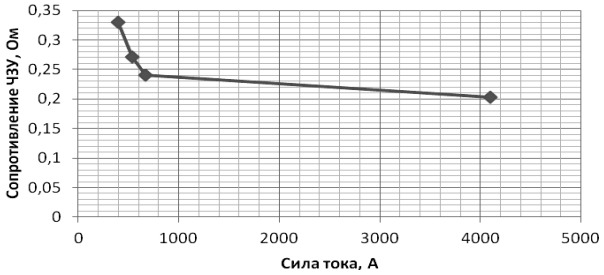


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления ЧЗУ от проходящего тока на частоте 102 кГц

Кроме этого, по графикам с помощью аппроксимации можно проследить зависимость значений активного сопротивления образца при прохождении по нему равных токов на различных частотах. Таким образом, сильноточные испытания образца частотозависимого устройства позволили уточнить значения активного сопротивления устройства при различной частоте входного сигнала. Так же сильноточные испытания позволили определить значения силы тока насыщения на различных частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Один из способов уменьшения энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса / С.М. Коробейников, А.П. Дрожжин, Л.И. Сарин, А.А. Челазнов // Сборник докладов Всероссийского научно-технического совещания «Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производствава, испытаний и примения ОПН» 8–10 октября 2001. – СПб.: ОАО «Электрокерамика», 2001. – С. 14–18.

2. *Коробейников С.М., Дрожжин А.П., Сарин Л.И.* Скин-эффект в композиционных материалах // Электричество. – 2004. – № 7. – С. 2–9.

3. Частотозависимый резистор для молниезащиты / С.М. Коробейников, Н.А. Черненко, Н.Я. Илюшов, А.В. Мелехов // Первая Российская конференция по молниезащите 26–30 ноября 2007 г.: сборник докладов. – Новосибирск: Сиб. энерг. акад., 2007. – С. 281–291.

4. Грозозащита подстанций в условиях Крайнего Севера / С.М. Коробейников, Ю.А. Лавров, Н.Я. Илюшов, А.Л. Бычков // Сиббезопасность–СпасСиб–2013: междунар. выставка и науч. конгресс «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения», Новосибирск, 25–27 сент. 2013 г.: материалы науч. конгресса. – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 116–120.

5. Применение частотно-зависимого резистора для подавления высокочастотных перенапряжений, воздействующих на кабели и электрооборудование подстанций напряжением 110 кВ / С.М. Коробейников, Н.Я. Илюшов, Ю.А. Лавров, Н.Ф. Петрова // Диагностика электрических установок: материалы 8 научно-практического семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок по проблемам оценки технического состояния и проверки эффективности средств защиты от грозовых и высокочастотных коммутационных перенапряжений генерируемых элегазовыми выключателями и разъединителями (Тюмень, 22–23 апр. 2013 г.). – Тюмень: СибПРИНТ, 2013. – С. 194–208.

6. *Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Мелехов А.В.* Измерения сопротивления двухслойного проводника резонансным способом // Электричество. – 2011. – № 10. – С. 52а–55.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗОМКНУТЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, г. Иваново,
AndrewYablokov@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом. Авторами предложены конструкции трансформаторов и специально разработанные математические модели, осуществляющие комбинированный полевой и цепной расчеты одновременно. По результатам расчетов определены амплитудные и фазовые погрешности исследуемых трансформаторов напряжения. Также приводятся ре-

зультаты исследования на математических моделях антирезонансных свойств исследуемых трансформаторов.

This work presents research results of open core high-voltage instrument transformers. The authors proposed different transformer constructions (designs) and performed them on specially developed mathematical computer models, fulfilling joint field and chain calculations simultaneously. According to calculation results investigated voltage transformer amplitude and phase errors are defined. Also research results of investigated transformer antiresonance properties on the base of symbolic models are given.

Работа электромагнитных измерительных трансформаторов напряжения (ТН) при коммутациях высоковольтных выключателей может приводить к возникновению феррорезонансных явлений, обусловленных наличием в одной цепи нелинейной индуктивности (трансформаторов напряжения) и емкостных элементов (емкостей шин и конденсаторов, шунтирующих контактные разрывы высоковольтных выключателей). Феррорезонансные явления приводят к неправильной работе электроэнергетического оборудования, выходу его из строя, развитию крупных аварий [1, 2].

В руководстве по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (РД 153-34.3-35.129-99) в качестве одной из основных мер по борьбе с феррорезонансными явлениями предлагается использование антирезонансных трансформаторов напряжения.

Для придания индуктивным трансформаторам антирезонансных свойств можно использовать разомкнутые магнитные сердечники на основе стержневых магнитопроводов вместо замкнутых. Кривая намагничивания такого трансформатора является более пологой, а конструкция – более компактной и удобной для выполнения внутренней изоляции (рис. 1).

Рассчитать трансформатор напряжения с разомкнутыми магнитопроводами невозможно на основе стандартных инженерных методик, предназначенных для расчета трансформаторов с замкнутыми магнитными системами, поскольку магнитное поле таких трансформаторов имеет разветвленное поле рассеяния, а основной магнитный поток только часть своего пути проходит по сердечнику. Использование существующих инженерных методик расчета трансформаторов напряжения, основанных на предположении того, что весь магнитный поток проходит по ферромагнитному сердечнику и замыкается на нем, при-

водит к существенным погрешностям. Для расчета трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом была разработана методика расчета на основе численного моделирования электромагнитного поля совместно с расчетом электрической цепи трансформатора [3].

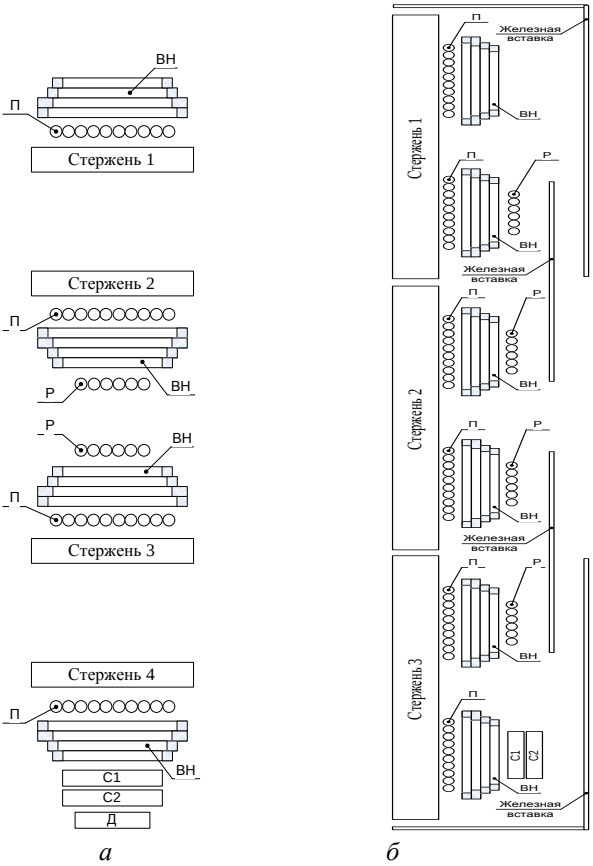


Рис. 1. Конструкции трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом:

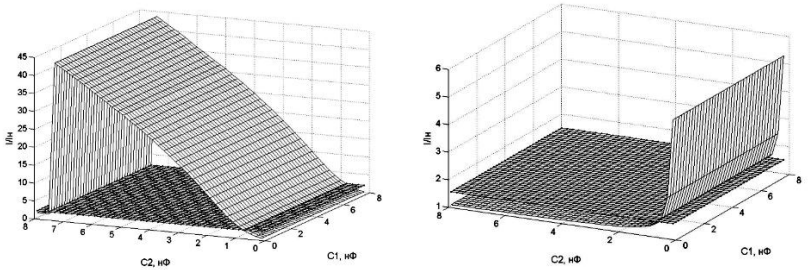
а – конструкция 1; *б* – конструкция 2

На основе разработанной методики моделирования были определены амплитудные и фазовые погрешности разработанных конструкций трансформаторов (таблица).

Метрологические характеристики конструкций ТН

Тип конструкции ТН	Мощность 100 Вт		Мощность 10 Вт	
	Амплитудная погрешность, %	Фазовая погрешность, мин	Амплитудная погрешность, %	Фазовая погрешность, мин
Конструкция 1	3,317	57,018	0,13368	2,66
Конструкция 2	1,17297	18,046	0,11441	1,75

На рис. 2 приведены результаты исследований антирезонансных свойств трансформатора НКФ-220 и разработанного антирезонансного трансформатора с вертикальным расположением разомкнутых магнитопроводов. По оси *Z* на графиках отложено отношение амплитуды тока, протекающего по обмоткам трансформаторов, после коммутации выключателей, к амплитуде номинального тока, по оси *X* – емкость конденсаторов, шунтирующих контактные разрывы высоковольтных выключателей (*C*1), по оси *Y* – емкость на землю (*C*2). Плоскость, параллельная плоскости *XY*, определяет максимально допустимый ток, который может протекать через обмотки трансформатора напряжения данной конструкции без ее повреждения.



а *б*

Рис. 2. Области существования феррорезонанса:

а – НКФ-220; *б* – трансформатор с вертикальным расположением разомкнутых магнитопроводов

Трансформаторы напряжения с разомкнутыми магнитопроводами вступают в опасный феррорезонанс с гораздо меньшим диапазоном емкостей выключателей и шин, и амплитуда тока при феррорезонансе у таких трансформаторов ниже, чем у обычных. На подстанциях сум-

марная емкость выключателей находится в диапазоне от 2 до 6 нФ. Трансформатор напряжения с вертикальным расположением разомкнутых магнитопроводов в указанном диапазоне емкостей не вступает в опасный феррорезонанс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кадомская К.П., Лаптев О.А.* Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения // Новости электротехники. – 2006. – № 6 (42). – С. 2–5.
2. *Алексеев В.Г., Евдокимов С.А.* Условия феррорезонанса с трансформаторами напряжения в сети 220 кВ // Электрические станции. – 1994. – № 10. – С. 54–57.
3. *Лебедев В.Д., Яблоков А.А.* Исследование динамических процессов в измерительных трансформаторах тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 6. – С. 98–104.

ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ВВОДОВ С RIP-ИЗОЛЯЦИЕЙ

Е.А. Марюшко

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, egor.maryushko@gmail.com

Вводы с RIP-изоляцией все чаще используются в высоковольтном электрооборудовании, таком как силовые трансформаторы, элегазовые выключатели, КРУЭ. Несмотря на совершенствование технологии изготовления, надежность вводов с RIP-изоляцией, особенно высших классов напряжения, оставляет желать лучшего. Ниже представлены основные возможные причины выхода из строя вводов с RIP-изоляцией: воздушные включения и микротрещины в изоляции, неравномерное распределение напряженности электрического поля на обкладках, механические напряжения.

RIP (Resin Impregnated Paper) Bushings are increasingly used in high voltage equipment such as power transformers, gas insulated switches and GIS (Gas Insulated Switchgears). The reliability of the RIP Bushings especially on the higher voltage classes leaves much to be desired, despite improvements in manufacturing techniques. The main possible causes of failure of the RIP Bushings such as air voids and micro cracks, uneven distribution of the electric field on the plates, the mechanical stresses, are presented in this paper.

По конструктивному исполнению внутренней изоляции высоковольтные вводы с RIP-изоляцией относятся к герметичным вводам конденсаторного типа и имеют основную изоляцию в виде изоляционного остова с проводящими обкладками. Расположение уравнительных обкладок обеспечивает оптимальное распределение электрического поля как в радиальном (по толщине изоляции), так и в аксиальном (по концам ввода относительно заземленной втулки) направлениях. Основная RIP-изоляция высоковольтных вводов (RIP – Resin Impregnated Paper) – крепированная электроизоляционная бумага, которая подвергается пропитке эпоксидным компаундом. В качестве материала обкладок применяется преимущественно металлическая фольга, наложенная непосредственно на поверхность бумаги.

Воздушные включения и микротрещины в изоляции

Обычно в условиях эксплуатации повреждается изоляционный остов ввода, а сквозному пробою предшествует пробой одного из слоев изоляции между уравнительными обкладками. Наиболее вероятной причиной пробоя слоя изоляции, находящегося на некотором расстоянии от центральной части ввода, могут являться дефекты в виде воздушных пор или трещин. Наличие дефектов может быть вызвано нарушениями технологического процесса и должно выявляться в приемо-сдаточных испытаниях.

Неравномерное распределение напряженности электрического поля. Неровности обкладок возникают из-за неровностей крепированной бумаги (рис. 1).

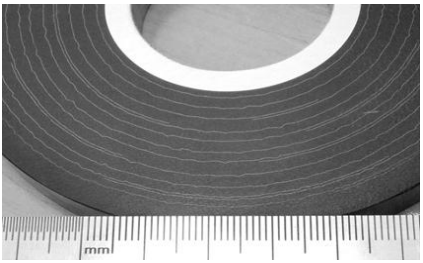


Рис. 1. Внешний вид образца RIP-изоляции

Расчеты электрического поля проводились на модели, построенной на основе реального образца RIP-изоляции, состоящей из четырех сло-

ев изоляции: нулевой обкладки, соединенной с токоведущей трубой, и трех первых уравнительных обкладок.

Параметры модели были следующими: напряжение токоведущей трубы и нулевой обкладки 73,034 кВ, 1-я обкладка – 66,395 кВ, 2-я обкладка – 59,755 кВ, 3-я обкладка – 53,115 кВ. ε = 4.

Пример картины электрического поля в такой модели приведен на рис. 2, *а*.

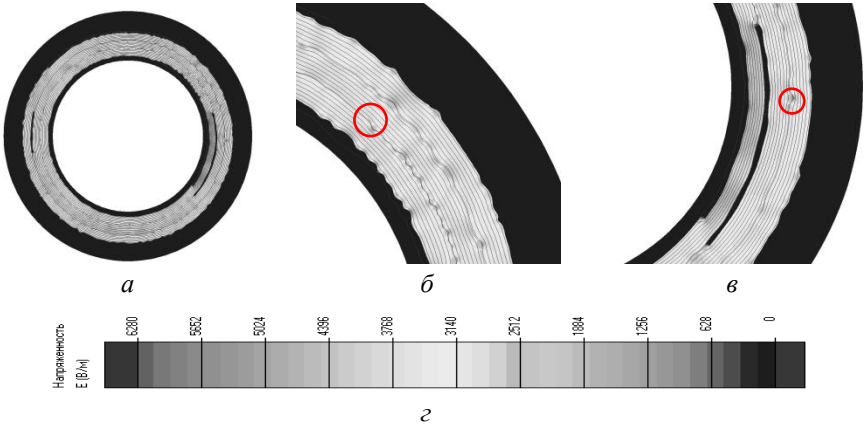


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в RIP-изоляции

При средней напряженности электрического поля между обкладками 3,3 кВ локальные значения в местах наиболее выраженных неровностей могут быть превышены в 1,6–1,8 раза (рис. 2, *б* – 5,5 кВ; рис. 2, *в* – 6,2 кВ). В районе перехлёста обкладки увеличение напряженности не превышает 1,5 раза (рис. 2, *в*).

Электрическая прочность RIP-изоляции оценивается на уровне не ниже 30 кВ/мм. При средней напряженности поля в слоях изоляции порядка 4 кВ/мм даже двукратное локальное усиление поля, вызванное неровностями обкладок, не должно кардинально снижать срок службы вводов. Таким образом, локальные усиления напряженности, вызванные неровностями, не так велики, чтобы непосредственно вызвать пробой изоляции при условии ее качественного изготовления.

Механические напряжения. В изоляции остова ввода еще в процессе изготовления или при эксплуатации могут возникнуть локальные механические напряжения. Они могут привести к возникновению трещин, пригодных для горения ЧР.

Для снятия механических напряжений в процессе изготовления применяется отжиг изделия при температуре выше температуры отверждения заливочного компаунда.

Выводы

1. Основной причиной повреждений RIP-изоляции наиболее вероятно являются дефекты в виде газовых пор, которые, в свою очередь, являются либо недостатками технологии, либо результатом взаимодействия материалов при заливке и твердении.

2. Неравномерность распределения напряженности электрического поля между выравнивающими обкладками и наличие локальных механических напряжений при условии соблюдения технологии производства сама по себе не может являться причиной пробоя RIP-изоляции, однако совокупность данных факторов может приводить к ускоренной локальной деградации изоляции с последующим пробоем.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 60137. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V. – Published: 25.07.2008. – 120 p.

2. *Ботов С.В., Русов В.А.* Влияние защитного реле КИВ-500 с ТПС на техническое состояние высоковольтных вводов с RIP-изоляцией // Энергоэксперт. – 2013. – № 1. – С. 18–21.

3. *Johansson K.* Modeling and Measurements of VFT Properties of a Transformer to GIS Bushing / K. Johansson и др. // Proceedings of the 43rd International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRE Session. – Paris, 2010. – Paper A2 302.

4. IEC 62217. Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use – General definitions, test methods and acceptance criteria. – Published: 27.09.2012. – 56 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗОЛИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ В ЭНЕРГЕТИКЕ

А.А. Мюльбаер

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, mss_nstu@mail.ru

В работе предложен новый механизм разрушения стальных конструкций в дефектах изоляционного покрытия наведенными переменными токами. Показана возможность перехода от электрохимической коррозии стали в дефекте к электроискровому разрушению.

In this paper, we propose a new mechanism of failure of steel structures in the insulating coating defects induced alternating currents. The possibility of a transition from the electrochemical corrosion of steel in the defect to spark destruction.

Российские и зарубежные исследователи выявили, что изолированные стальные конструкции различного назначения подвержены разрушению под действием переменного тока, обусловленного электромагнитным влиянием объектов электроэнергетики [1, 2]. Выдвинутые теории такого разрушения разрознены и не дают полной картины физики процесса. Нами была выдвинута иная гипотеза разрушения стальных изолированных конструкций переменным током.

Если между металлом изолированной стальной конструкции и окружающей ее средой (землей) имеется разность потенциалов переменного тока, то при наличии дефектов в изоляции через них будут протекать токи, которые будут приводить к локальному нагреву вещества, находящегося в дефекте изоляционного покрытия.

Повышенная температура вещества в дефектах изоляционного покрытия приводит к увеличению скорости электрохимической коррозии. При обычной электрохимической коррозии в интервале температур от комнатной до 100 °С первоначальным продуктом реакции является $Fe(OH)_2$. Гидроокись двухвалентного железа способна разлагаться на магнетит (Fe_3O_4) и водород со скоростью, зависящей от температуры. Окислы железа на поверхности стали замедляют электролитические процессы. Любые факторы (как химические, так и механические), действие которых приводит к разрушению защитного магнетитового слоя на стали, увеличивают электрохимическую коррозию [3].

При достижении веществом в дефекте изоляционного покрытия температуры 100 °С происходит закипание имеющейся влаги и образование пузырьков водяного пара. Если пузырек перекрывает частично или полностью поверхность стальной конструкции в дефекте изоляционного покрытия, возможен переход электролитического тока в искровой.

При горении дуги железо в дефекте изоляционного покрытия расплавляется. Оторванные атомы железа удаляются с поверхности электродинамическими силами. Это приводит к образованию глубоких, повторяющих форму дефектов каверн, которые со временем начинают расширяться в стороны.

Для определения условий появления разряда в дефекте изоляционного покрытия была проведена серия экспериментов. Эксперименты проводились на образцах, показанных на рис. 1.

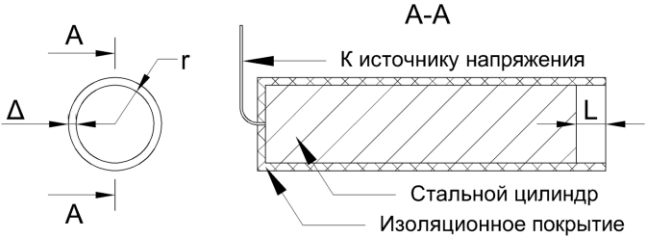


Рис. 1. Образец для испытаний

Образец *4* помещен в электролит с удельным сопротивлением ρ. и подключен к источнику напряжения *1* (рис. 2). Напряжение повышается лабораторным автотрансформатором (ЛАТР) *1* до видимого искрового процесса на неизолированном торце испытательного образца (в капилляре), который обычно возникал при напряжениях от 100 $В_{ампл}$ и выше. Искровые процессы приводят к протеканию токов высокой частоты. Для выделения из общего спектра высокочастотной составляющей тока используется фильтр Ф. С выхода фильтра сигнал регистрируются осциллографом *2*.

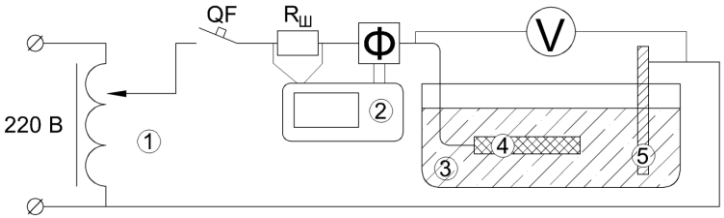


Рис. 2. Схема испытательной установки

На рис. 3, *а* представлена осциллограмма высокочастотной составляющей тока, протекающей при видимых искровых процессах в капилляре. Полученные осциллограммы позволяют оценить происходящие процессы только качественно, а оценить количественно не позволяют особенности конструкции фильтра. При увеличении развертки по времени видно, что высокочастотный процесс носит колебательный характер (рис. 3, *б*).

После подъема напряжения на образце до видимого искрообразования в капилляре и фиксации высокочастотной составляющей тока, напряжение плавно снижали. Напряжение, при котором высокочастотная составляющая тока исчезала, принимали за напряжение начала ис-

крообразования. При длине капилляра $L = 0$ и различных радиусах образцов были получены следующие данные (см. таблицу), где U – напряжение начала искрообразования, приложенное к образцу и вспомогательному электроду; I – ток промышленной частоты, протекающий через образец; J – плотность тока промышленной частоты; P – мощность, выделяемая в цепи «образец – вспомогательный электрод»; R – сопротивление цепи «образец – вспомогательный электрод».

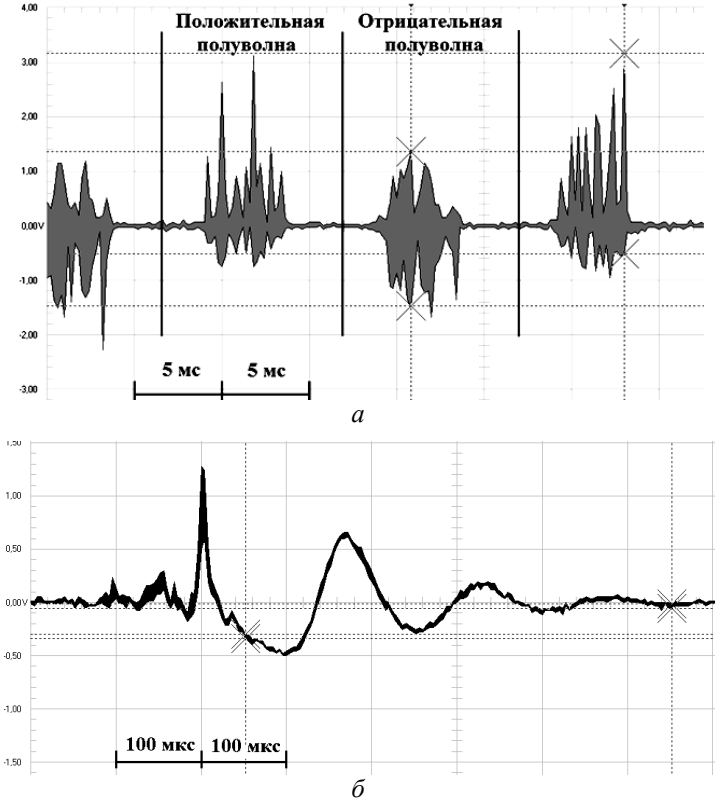


Рис. 3. Высокочастотная составляющая тока при видимом искрообразовании в капилляре

Из данных, приведенных в таблице, видно, что уменьшение площади неизолированной поверхности приводит к снижению напряжения начала искрообразования и необходимой энергии для инициации искровых

процессов. Из литературы [2, 4] известно, что на трубопроводах измеренные напряжения в зоне влияния ВЛ могут составлять от нескольких до десятков вольт. Следовательно, появление разряда в дефектах изоляционного покрытия стальных конструкций возможно в реальных условиях эксплуатации, что будет приводить к значительному увеличению скорости разрушения стали под действием наведенного переменного тока в сравнении со скоростью электрохимической коррозии.

Экспериментальные данные

r , мм	S, мм^2	U, В$_{ампл}$	I, А$_{дейст}$	J, А/м^2	P, Вт	R, Ом
2,35	17,3	71	1,66	95 729	83	30
1,5	7,1	64	0,54	76 433	24	83
0,6	1,1	42	0,17	58 386	5	176

Разрушение стали в дефектах изоляционного покрытия можно разделить на два этапа. Первый этап – происходит электрохимическая коррозия стали, интенсивность которой возрастает при увеличении температуры вещества в дефекте. Второй этап – если выделявшейся энергии в дефекте достаточно для поддержания искровых процессов, начинается электроискровое разрушение стали. Скорость разрушения стали при электроискровых процессах значительно выше, чем при электрохимической коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Толстая М.А., Иоффе Э.И.* Способы определения коррозионной опасности для стальных подземных сооружений в зонах влияния переменного тока про-мышленной частоты // Научные труды Академии коммунального хозяйства. – 1967. – Вып. 42. – С. 57–64.

2. CIGRE Joint Working Group C4.2.02. AC corrosion on metallic pipelines due to interference from AC power lines: CIGRE technical brochure N 290. – April 2006. – 110 p.

3. *Улиг Г.Г., Реви Р.У.* Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.

4. *Мюльбаер А.А.* Влияние воздушных линий переменного тока на стальные трубопроводы // Технические науки – от теории к практике. сб. ст. по материалам XXXI междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 22 января 2014 г. – Новосибирск: Изд-во СибАК, 2014. – № 2 (27). – С. 45–52.

ОЦЕНКА АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО АНАЛИЗА

Д.А. Нестеров

Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, р.п. Черемушки, filialsfu@bk.ru

Проанализирована аварийность силовых трансформаторов. Рассмотрены особенности тепловизионного обследования. Проанализированы способы учета погрешностей тепловизора при обследовании силовых трансформаторов.

Analyzed accident risk of power transformers. Considered peculiarities of thermal imaging inspection. Analyzed methods of accounting temperature errors imager during the examination of power transformers.

Многие предприятия работают в круглосуточном режиме, и нарушение в работе пагубно влияет на экономические показатели. Большую опасность представляет собой возникновение аварийной ситуации, часто приводящее к человеческим жертвам. Это является причиной повышенных требований к системам выработки, распределения и передачи электроэнергии, а значит, и к их элементам. Силовые трансформаторы являются одним из важных звеньев таких систем. По результатам статистического анализа [1], 70 % трансформаторов, срок эксплуатации которых больше 20 лет, имели отклонения в работе и повреждения [2].

В последнее время в связи с появлением компактных, недорогих, а главное, высокочувствительных тепловизоров в энергетике наметилась тенденция поиска локальных дефектов по термограммам.

При проведении тепловизионной диагностики существенное влияние на результаты измерений оказывают погрешности, поэтому важной задачей является их обнаружение и устранение [3].

Оценка теплового состояния трансформаторов в зависимости от условий работы и конструкции чаще всего осуществляется по превышениям температуры либо по избыточной температуре. Пересчет превышения измеренного значения температуры к нормированному осуществляется исходя из соотношения

$$\frac{\Delta T_{\text{ном}}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left(\frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2,$$

где $\Delta T_{\text{ном}}$ – превышение температуры при $I_{\text{ном}}$; $\Delta T_{\text{раб}}$ – то же, при $I_{\text{раб}}$.

Для контактов и болтовых контактных соединений при токах нагрузки (0,3…0,6) $I_{\text{ном}}$ оценка состояния проводится по избыточной температуре. В качестве норматива используется значение температуры, пересчитанное на $0,5I_{\text{ном}}$.

Для пересчета используется соотношение

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left(\frac{0,5I_{\text{ном}}}{I_{\text{раб}}} \right)^2,$$

где $\Delta T_{0,5}$ – избыточная температура при токе нагрузки $0,5I_{\text{ном}}$ [3].

По оценке избыточной температуры при токе нагрузки, равном $I_{\text{ном}}(0,5I_{\text{ном}})$, различают три степени неисправности.

1. Начальная степень неисправности (избыточная температура 10…20 (5…10) °С). При начальной степени неисправности оборудования дефект держат под контролем и исправляют при проведении планового ремонта.

2. Развившийся дефект (избыточная температура 20…40 (10…30) °С) устраняют при ближайшем выводе трансформатора из работы.

3. Аварийный дефект (избыточная температура более 40 (30) °С) требует немедленного устранения.

Важным элементом трансформатора является система охлаждения, контроль которой является достаточно сложной и ответственной задачей, так как она оказывает значительное влияние на работу всего трансформатора. Для эффективной оценки работы систем охлаждения трансформаторов существует несколько методик.

1) Анализ усредненной температуры одинакового оборудования в одинаковых условиях. Исследования показывают, что различие усредненных температур таких объектов более чем на 2 °С может являться причиной неисправности в системе охлаждения.

2) Анализ температуры поступления и отвода масла из системы охлаждения и последующее сравнение с данными заводских испытаний. Проведя исследования в области тепловизионных обследований, можно установить, что средняя разница температур поступления и отвода масла из систем охлаждения не должна превышать более чем 1…1,5 °С.

Анализ опубликованных работ по тепловизионному контролю состояния трансформаторов показал следующее: практически ни в одной работе не учитывается, что трансформатор не является абсолютно черным телом, что может приводить к значительным погрешностям измерений намного больше, чем декларируемая разработчиками чувствительность тепловизоров 0,1…0,2 °С. В реальных условиях именно погрешность, а не чувствительность может достигать нескольких градусов. Для учета этих погрешностей целесообразно использовать запатентованные способы определения температуры объекта с неизвестным коэффициентом излучения [5], которые позволят проводить наиболее точную диагностику трансформаторов.

Более полная информация приведена в сборнике материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке», www.shf-sfu.ru/upload/Sbornik.pdf

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sokolov V., Tsurpal S., Drobyshevski A.* Reliability problems with large power transformers and shunt reactors. Typical failure modes and failure causes [Electronic resource] // Cigre A2 Colloquium on Transformer Reliability and Transients. – Moscow, Russia, 2005. – Available at: http://ebookbrowsee.net/reliability-problems-with-lange-power-transformers-and-shunt-reactors-typical-failure-nodes-and-failure-causes-pdf-d450428262 (accessed: 12.11.2014).

2. Результаты длительной периодической диагностики силовых трансформаторов / Аксенов Ю.П., А.В. Голубев, В.И. Завидей, А.В. Юрин, И.В. Ярошенко // Электро. – 2006. – № 1. – С. 28–35.

3. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. – Введ. 2000–06–01. – М.: ОРГРЭС, 2000. – 136 с.

4. Патент 2410654 Российская Федерация, МПК^8 G 01 J 5/52. Способ измерения температуры / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, Д.С. Шелковой; патентообладатель ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – № 2009134008/28; заявл. 10.09.2009; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. – 8 с.

5. Патент 2381463 Российская Федерация, МПК^8 G 01 J 5/00. Пирометрический способ определения термодинамической температуры металлов и устройство для его осуществления / В.А. Фираго, А.Г. Сеньков, В.К. Кононенко, Ф. Христол; патентообладатели: Белорусский государственный университет, Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси». – № 2008130574/28; заявл. 23.07.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 4. – 10 с.

СОСТОЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ВОПРОСЫ ЭКОЗАЩИТЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭНЕРГЕТИКИ ПАВЛОДАРСКОЙ ОБЛАСТИ

К.С. Садвакасов[1], В.В. Ларичкин[1], К.Ш. Арынгазин[2]

[1] *Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, РФ, kanat620@mail.ru*

[2] *Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар, РК, kapar47@mail.ru*

В работе анализируется современное состояние, проблемы и перспективы развития предприятий энергетики Павлодарской области в рамках реализации Государственной программы по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010–2014 годы. Также предлагаются пути повышения промышленной безопасности и эффективные экологически чистые и ресурсосберегающие технологии на электростанциях.

The paper analyzes the current status, problems and prospects of development of power plants Pavlodar region in the framework of the State Program on Forced Industrial-Innovative Development of Kazakhstan for 2010–2014 years. Also suggests ways to improve the safety and effective eco-friendly and resource-saving technologies in power plants.

Энергетика Павлодарской области Республики Казахстан представлена такими крупными предприятиями, как ТЭЦ-1 АО «Алюминий Казахстана», ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 АО «Павлодарэнерго», ТОО «Экибастузская ГРЭС-1», АО «Станция Экибастузская ГРЭС-2», АО «Евроазиатская энергетическая корпорация» (Аксуская электростанция) и др. Все электростанции Павлодарской области используют как основное топливо каменный уголь Экибастузского месторождения марки КСНР-0.300 [1].

Однако, при общих хороших показателях в энергетическом секторе области есть серьезные проблемы.

Одна из главных проблем электроэнергетики в области – изношенность оборудования. К настоящему времени около 90 % основного оборудования ТЭЦ исчерпали парковый ресурс. Во-вторых, дешевая электроэнергия за счет сжигания угля рано или поздно закончится, и становится актуальным вопрос об альтернативных способах получения электроэнергии.

В целях обеспечения электроэнергией потребностей современной экономики и достижения энергетической независимости в настоящее

время в стране реализуется Государственная программа по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010–2014 годы [2].

На перспективу в Казахстане в области электроэнергетики определены 19 критических технологий, в том числе:

1) технологии «зеленой экономики» и энергосбережения,

2) технологии по выпуску новых материалов на основе нанотехнологий для выработки энергии,

3) технологии газификации угля,

4) технологии по сжиганию высокозольного угля,

5) технологии по теплоснабжению и генерации электрической энергии за счет солнечных лучей и др.

Развитие данных критических технологий будет обеспечиваться через реализацию механизма целевых технологических программ. Для достижения этих целей требуется комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасности эксплуатации технических устройств.

Предприятия энергетики области проводят работу по своевременному проведению капитальных, расширенных и текущих ремонтов основного и вспомогательного оборудования. Это дает положительные результаты в области промышленной безопасности.

Вместе с тем вопросы экологии на предприятиях энергетики Павлодарской области по-прежнему требуют своего решения. Основное загрязнение природной среды происходит от тепловых электростанций, сжигающих экибастузский уголь с высоким, более 30 %, содержанием вредных минеральных веществ.

В качестве технологии, альтернативной существующей, предлагается подземная газификация угля, которая позволяет:

– исключить подземные (шахтные и карьерные) работы, а значит, исключить травматизм и жертвы среди шахтеров;

– более полно вырабатывать месторождения угля;

– сохранить природный ландшафт в местности, где ведутся разработки;

– сохранить природную среду от загрязнения продуктами сгорания угля;

– получать ценное сырье для химической промышленности и др.

Комплексная технология газификации угля заключается в поджигании угольного пласта через скважины, извлечении горючего газа, выделении из него конденсированием ценных органических веществ и

использовании полученного газа для выработки электроэнергии на тепловой газовой электростанции.

Другой важной экологической проблемой для энергетики Павлодарской области является состояние пруда-охладителя ТОО «Экибастузская ГРЭС-1» и водохранилища-охладителя ТОО «Экибастузская ГРЭС-2».

На протяжении многих лет требует решения экологический вопрос, связанный с мелкой фракцией золы, извлеченной из дымовых газов электрофильтрами и через систему гидрозолоудаления и отправляемой на золоотвал в озеро Карасор. На отмелях водоема мелкая фракция золы высыхает и при сильном ветре происходит ее пыление.

Экономически и экологически выгодным представляется проект, в котором реализуется сухой отбор золы-уноса, строительство на территории электростанций технологических линий по изготовлению строительных материалов и изделий, в состав которых может входить до 30 % золы в виде наполнителя и частично связующего [4]. Сухая зола-уноса – это не отход, а материал. Поэтому его утилизация обеспечит сокращение объемов использования в строительных материалах и изделиях природных материалов (песка, глины), а также цемента, так как частично его будет заменять обладающая вяжущими свойствами высококальциевая зола. При этом будут сокращаться общие объемы золошлаковых отходов. Кроме того, утилизация золошлаковых отходов позволит предприятиям энергетики иметь дополнительный доход за счет реализации материалов и изделий строительного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлодарский вектор энергоэкспертизы // Электроэнергетика Казахстана. – 2013. – № 1–2. – С. 39.

2. Государственная Программа по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010–2014 годы, утвержденная Указом Президента Республики Казахстан № 958 от 19 марта 2010 года.

3. *Гусев К.П., Ларичкин В.В., Ларичкина Н.И.* Перспективы использования золошлаковых отходов теплоэнергетики Сибири в производстве тротуарного камня // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13 (39), № 1 (8). – С. 2058–2061.

ОСОБО ТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

А.С. Сафронов

Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, г. Саяногорск, Safronov--as@mail.ru

Проведен анализ использования различных типов гидронивелиров, их особенности и погрешности измерений. Выработаны рекомендации по использованию гидронивелиров на реконструируемых, вновь вводимых и проектируемых системах мониторинга гидротехнических сооружений (ГТС) с учетом их особенностей.

The analysis of using of different types Hydrostatic Levelling Systems, their feature measurements and error. Recommendations on the using of Hydrostatic Levelling Systems on projects that are reconstructed and newly monitoring systems waterworks (HLS), based on their characteristics.

Гидротехнические сооружения являются объектом повышенной опасности. От стабильности работы ГТС зависят многие предприятия и социально значимые объекты. Возникновение аварийных ситуаций может привести к экономическим потерям и человеческим жертвам. Во избежание аварий государство ужесточает правила эксплуатации и диагностирования ГТС Федеральным законом от 21.07.1997 N 117-ФЗ (ред. от 28.12.2013) «О безопасности гидротехнических сооружений» и иными нормативными документами.

Среди измерений различных параметров, проводимых на высоконапорных ГТС, можно выделить несколько наиболее значимых:

- плановые смещения;
- высотные перемещения;
- измерение давления, уровня воды в пьезометрических скважинах;
- измерение уровня воды в бьефах;
- измерение фильтрационных расходов воды;
- сейсмометрические наблюдения;
- измерение положения ГТС относительно створа;

Особенное значение в диагностике плотин имеет наблюдение за вертикальными перемещениями с помощью гидронивелиров. Гидронивелир является одним из первых точных приборов, позволяющих определить разность высот между измеряемыми точками. Этот прибор и в настоящее время не потерял актуальность из-за своей простоты и точности.

В статьях по наблюдению за высотными плотинами и организацией автоматизированных систем наблюдений [1, 2] указывается на необходимость измерений с точностью до десятков микрон.

Гидростатическое нивелирование достаточно широко описано в литературе [3, 4]. В данной статье описываются методы учета факторов, влияющих на точность стационарных гидростатических нивелиров, опыт применения различных датчиков и приводятся практические рекомендации по применению системы автоматизированного контроля вертикальных смещений (САК ВС) на ГТС.

При создании и эксплуатации САК ВС необходимо учитывать погрешности от сил, действующих на поверхность: поверхностных и массовых (объемных). Поверхностные силы в покоящихся жидкостях направлены по нормали к элементу поверхности. Массовые или объемные силы действуют на каждую частицу жидкости пропорционально массе выделенного объема.

Также необходимо учитывать влияние сил поверхностного натяжения, которое также влияет на разность уровней. На границе соприкосновения жидкости газа и твердого тела наблюдается явление «смачивание» – появление мениска свободной поверхности жидкости. Формула, учитывающая эти факторы, приведена ниже:

$$\Delta h = \frac{(p_1 g_1 - p_2 g_2)}{p_2 g_2} h_1 + \frac{p_{01} - p_{02}}{p_2 g_2} + \frac{\sigma_1 \cos \vartheta_1}{p_1 g_1 \sqrt{D_1 h_1 - h_1^2}} - \\ - \frac{\sigma_2 \cos \vartheta_2}{p_2 g_2 \sqrt{D_2 h_2 - h_2^2}},$$

где p_{01}, p_{02} – внешнее давление; p_1, p_2 – плотность жидкости; g_1, g_2 – ускорение свободного падения; σ_1, σ_2 – поверхностное натяжение жидкости; d – диаметр трубы гидронивелира; ϑ – краевой угол; h_2 – высота жидкости.

В зависимости от требуемой точности измерений необходимо учитывать следующие факторы:

- свойства жидкости в точках наблюдения (состав, зависимость свойств от температуры, давления и т. д.);
- внешнее давление и температуру в точках измерения;
- гравитационное поле в точках измерения;
- поверхностное натяжение жидкости;

– свойства материала трубы, ее чистоту, форму и высоту столба жидкости.

Для непосредственной оценки степени влияния вышеперечисленных факторов (аргументов функций) на разность уровней в точках измерения необходимо брать частные производные от функций по каждой из входящей в нее переменной и выразить через нее зависимость изменения разности уровней жидкости от величины изменения отдельно этого параметра (аргумента).

Анализ погрешностей гидронивелиров подтвержден опытом применения трех вариантов гидронивелиров на Саяно-Шушенской ГЭС:

- магнитострикционные;
- оптические триангуляционные (поплавковые);
- оптические триангуляционные (прямые).

Установлено, что для уменьшения погрешности необходимо:

1) использовать беспоплавковые гидронивелиры;
2) использовать гидронивелиры без выносных измерительных головок;
3) применять дополнительные средства, поддерживающие однородность;
4) определять лабораторно свойства жидкости;
5) использовать замкнутые гидронивелиры;
6) использовать трубы прямоугольного сечения и с обработанными стенками.

Особую благодарность выражаю своему научному руководителю Волошину А.М. за предоставленную информацию и помощь в написании данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гордон Л.А., Затеев В.Б., Стефаненко Н.И.* Оценка состояния контакта бетонной плотины со скальным основанием по данным измерений осадок поперечными гидростатическими нивелирами. (применительно к плотине Саяно-Шушенской ГЭС) // Известия ВНИИГ им. В.Г. Веденеева. – 2004. – Т. 243. – С. 157–169.

2. *Гордон Л.А., Френкель А.С.* Диагностика бетонных плотин по данным натурных измерений относительных осадок // Известия ВНИИГ им. В.Г. Веденеева. – 1989. – Т. 214. – С. 83–91.

3. *Васютинский И.Ю.* Гидростатическое нивелирование. – М.: Недра, 1976. – 167 с.

4. *Шайдуров Г.Я.* Автоматизированный контроль гидротехнических сооружений. – Новосибирск: Наука, 2006. – 239 с.

5. *Волошин А.М., Шайдуров Г.Я.* О погрешности измерения уровня воды в гидронивелирах ГЭС: научно-исследовательская работа // Датчики и системы. – 2011. – № 3. – С. 62–67.

КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛА ПОВРЕЖДЕННОГО РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДАМИ

А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков, Н.В. Быкова

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, n.ababkov@rambler.ru

В работе проведено сопоставление результатов неразрушающего контроля металла поврежденного ротора паровой турбины спектрально-акустическим и ультразвуковым методами. Показано, что спектрально-акустический метод обладает большей чувствительностью по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем.

A comparison of the results of non-destructive testing of metal damaged steam turbine rotor by spectral acoustic and ultrasonic methods is conducted in this paper. It is shown that the spectral-acoustic method has greater sensitivity compared to a conventional ultrasonic testing.

Металл элементов энергетического оборудования (в частности, роторов паровых турбин) работает в критических условиях: при высоких температурах и при воздействии высоких напряжений, вызванных усилиями самокомпенсации и массовыми нагрузками.

В практике эксплуатации паровых турбин известны серьезные аварии в результате повреждения роторов. Большой интерес представляет исследование металла разрушенных роторов паровых турбин высокого давления для выявления причин их разрушений и для предотвращения в будущем подобных случаев. В настоящей работе приведены результаты исследований металла фрагмента разрушенного ротора паровой турбины высокого давления после наработки 293 061 ч на ОАО «Западно-Сибирская ТЭЦ (г. Новокузнецк).

Для экспериментальных исследований был вырезан образец из разрушенного ротора паровой турбины высокого давления в виде диска диаметром 290 мм и шириной 50 мм, включающий с одной стороны поверхность излома. Измерения скорости распространения волн спектрально-акустическим и ультразвуковым методами проводили в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

Иследование металла поврежденного ротора паровой турбины ультразвуковым методом проводилось с применением дефектоскопа OMNISCAN на фазированных решетках (Институт неразрушающего контроля НИ ТПУ). Измерение времени задержки поверхностных аку-

стических волн проводили с применением измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», предназначенного для контроля состояния материала. В основу работы системы положен современный спектральный импульсный метод акустической структурометрии. Результаты измерения скорости распространения волн спектрально-акустическим и ультразвуковым методами представлены на рис. 2.

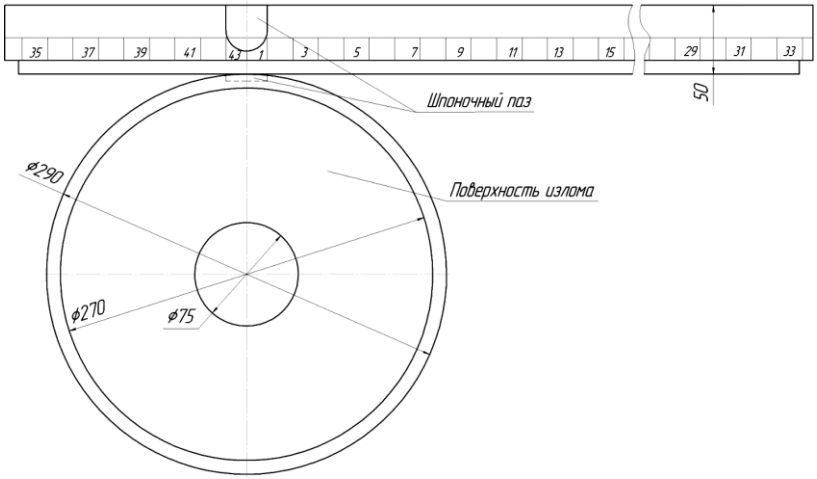


Рис. 1. Схема измерения скорости распространения волн спектрально-акустическим и ультразвуковым методами

Рис. 2. Сравнение результатов измерения скорости распространения волн спектрально-акустическим и ультразвуковым методами

Как видно из рис. 2, отклонение значения скоростей распространения волн от средней величины, измеренные ультразвуковым методом, не превышает 8 м/с. В то же время отклонения значения скоростей распространения волн от средней величины, измеренные спектрально-акустическим методом для сектора 2, составляет 22 м/с, а для сектора 14 – 34 м/с. Это свидетельствует о том, что спектрально-акустический метод обладает большей чувствительностью по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем металла поврежденного ротора паровой турбины. Применение спектрально-акустического метода для оценки качества роторов турбин может оказаться эффективным экспресс-методом предотвращения аварийных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Использование УЗ-сигналов для идентификации НДС / А.Н. Смирнов, В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, Н.А. Хапонен, Ю.М. Шатунов // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 3. – С. 32–35.

2. Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высокого давления / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков, Э.В. Козлов, В.В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 7. – С. 13–17.

3. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей / Л.Б. Зуев, В.Я. Целлермаер, В.Е. Громов, В.В. Муравьев // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67, № 9. – С. 123–125.

4. *Грецкая И.А., Коновалов С.В., Соснин О.В.* Возможность построения кривых усталости по данным измерения скорости ультразвука // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 11. – С. 77.

5. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Ч. 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н.В. Абабков, А.В. Бенедиктов, А.Н. Смирнов, О.Н. Дегтярева, А.С. Глинка // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 5. – С. 101–106.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.А. Суворов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, suvorov_saa@mail.ru

В статье приводятся результаты исследования способа выполнения защиты от однофазных замыканий на землю в шахтной сети 1140 В. По данному способу вместо автоматической компенсации емкостного тока сети предусмотрено нерегулируемое устройство, настроенное на середину диапазона в 0,5 мкФ. Приведенные в статье результаты испытаний такой схемы показали, что она позволяет увеличить чувствительность защиты при определении поврежденной фазы.

The article presents the results of a study method to make a defense against single-phase earth fault in the mine network 1140 V. This method implements unregulated device configured on the mid-range of 0,5 uF. Given in the article results of tests showed that it can increase the sensitivity of the protection in the determination of the faulty phase.

В настоящее время в шахтных распределительных сетях используются комплектные трансформаторные силовые подстанции (КТСП). В сети низшего напряжения таких подстанций устанавливается защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), которые могут возникать как при повреждении кабелей, так и при прикосновении человека к фазному проводу.

Требования [1], предъявляемые к таким защитам:

1) аппаратура общесетевой защиты от ОЗЗ должна иметь устройство автоматической компенсации емкостного тока и обеспечивать отключение защищаемой сети при повреждении ее изоляции и возникновении тока утечки, равного 0,025 А и выше ($R_{из}$ < 45 кОм);

2) допускается использование неавтоматических устройств компенсации, если в системе предусмотрено автоматическое закорачивание и снятие остаточного заряда с отключенной линии со временем срабатывания и закорачивания не более 0,05 с.

Большинство используемых в настоящее время аппаратов защиты от токов утечки не удовлетворяют требованиям чувствительности, так как автоматические устройства компенсации, входящие в их состав,

функционируют некорректно [2]. При отсутствии компенсации существуют режимы ОЗЗ, при которых из-за больших значений переходного сопротивления напряжение на поврежденной фазе становится больше, чем напряжение на неповрежденной фазе. Тогда максимальное сопротивление изоляции (таблица), вызывающее срабатывание защиты, при емкости в 0,5 мкФ на фазу составляет не более 4 кОм, что не удовлетворяет требованиям [1].

Переходное сопротивление изоляции $R_з$, при котором возможно определять поврежденную фазу при различных емкостях сети $C_Ф$

Переходное сопротивление изоляции $R_з$, кОм	Емкость сети $C_Ф$, мкФ на фазу									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$R_З$ без L	19,2	9,3	6,1	4,6	3,7	3	2,6	2,3	2	1,8
$R_З$ с L*	15,2	17,7	24,2	29,3	60	26,5	22,1	19,4	17,8	15,4

(*) – индуктивность дросселя настроена на середину возможного диапазона, при этом поврежденная фаза определяется по минимуму напряжения.

Для увеличения чувствительности защиты существует возможность использовать неавтоматическую компенсацию. На рис. 1 представлена лабораторная схема с компенсирующим дросселем L, настроенным на середину диапазона изменения емкости сети (неавтоматическая компенсация с настройкой на 0,5 мкФ). Такое техническое решение позволяет увеличить переходное сопротивление изоляции, при котором возможно определить поврежденную фазу, в середине диапазона и по его краям (таблица).

В ходе исследования установлено, что для более точного определения поврежденной фазы существует возможность использовать фазу с максимальным напряжением. При емкостном характере сети поврежденная фаза будет всегда отставать по времени от фазы с максимумом напряжения. При индуктивном характере сети (режим перекомпенсации) замкнутая на землю фаза будет всегда опережать по времени фазу с максимумом напряжения (рис. 2).

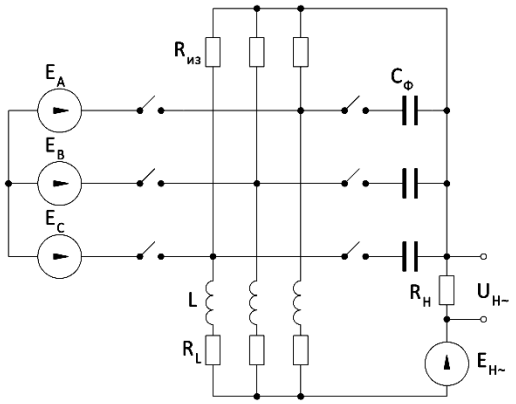


Рис. 1. Лабораторная схема испытания с компенсирующим статическим дросселем

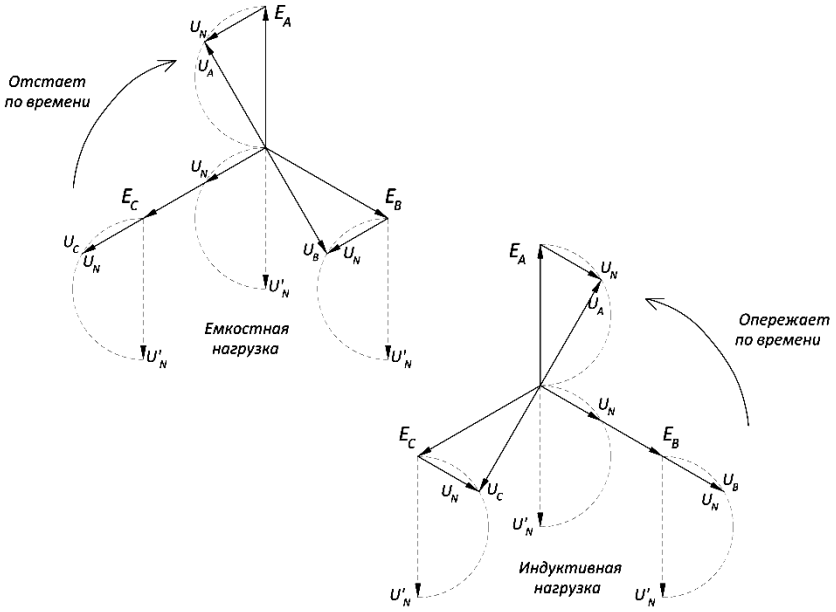


Рис. 2. Определение фазы с ОЗЗ (фаза А) при емкостном и индуктивном характере сети

Достаточно просто определить характер сети возможно путем измерения угла между наложенным переменным током и напряжением на добавочном активном сопротивлении $R_н$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Требования к изготовлению рудничного электрооборудования напряжением 1140 В: РД 05-335-99: [утв. постановлением Госгортехнадзора России от 24.12.99 № 96] // Безопасность горнотранспортного оборудования, электроустановок и электрооборудования угольных шахт и разрезов: сборник документов. – М.: Гос. унит. предприятие «Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Гостехнадзора России», 2003. – С. 1–21. – (Госгортехнадзор России. НТЦ «Промышленная безопасность». Серия 05. Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в угольной промышленности; Вып. 9.).

2. *Задорожный В.И.* Анализ надежности аппаратов защиты от токов утечки в электрических сетях угольных шахт напряжением до 1000 В // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, 2006. – С. 110–112.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СПОСОБА МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Д.Е. Титов, А.Г. Сошинов, Н.Ю. Шевченко

Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета,
г. Камышин, dm30081989@yandex.ru

В статье представлены физические принципы работы термодинамического способа мониторинга гололеда на ВЛ. Процесс гололедообразования на проводе рассматривается как термодинамический процесс у поверхности провода.

In article the new principles of creation of system of glaze monitoring are offered. Icing process is considered as a thermodynamic wire surface process.

Гололедные отложения с ветром являются причинами падений железобетонных опор воздушных линий электропередачи напряжением 35–110 кВ (до 37 %), до 12 % от общего числа обрывов проводов, до 42 % обрывов грозозащитных тросов и до 8 % разрушений изоляторов [1].

Недоотпуск электроэнергии при гололедных авариях в отдельных регионах достигает 70…80 % общего годового аварийного недоотпуска, а среднее время восстановления 5–10 суток.

Для минимизации риска возникновения гололедных аварий сетевые службы организуют как можно более частый визуальный осмотр наиболее подверженных гололеду линий или используют информационно-измерительные системы мониторинга гололедообразования.

Практическое применение получили системы, основанные на измерении тяжения провода с гололедом, а также на явлениях затухания сквозного зондирующего ВЧ сигнала. Недостатками известных способов и устройств являются невозможность определения момента начала образования отложений, интенсивности нарастания отложений в реальном времени и прогнозирования динамики изменения процесса гололедообразования. Поэтому необходима разработка эффективной системы информационного обеспечения – системы мониторинга гололедно-ветровых нагрузок ВЛ. Для решения поставленной задачи авторами предлагается новый термодинамический способ предвещания образования гололеда. Термодинамический способ заключается в сравнении температуры провода, точки росы и точки десублимации, определяемых по влажности и температуре воздуха. Выявлено, что гололедообразование начинается при снижении температуры провода ниже точки росы и точки десублимации [2].

Выдвинута гипотеза, что интенсивность нарастания массы отложений V_P на обесточенном проводе при отсутствии ветра имеет функциональную связь с $\vartheta_{\text{пов}}$, θ_a и θ_i [3]:

$$V_p = F(\theta_a, \theta_i, \vartheta_{\text{пов}}), \tag{1}$$

где V_p – интенсивность нарастания массы отложений, кг/м^2·с; θ_a – точка росы, °С; θ_i – точка десублимации, °С; $\vartheta_{\text{пов}}$ – температура поверхности провода, °С.

На основании серии экспериментов в климатической камере подтверждено наличие прямой пропорциональной зависимости между интенсивностью нарастания сложных отложений и суммой точек росы и десублимации за вычетом двух температур поверхности провода в °С.

$$V_{P_{\gamma_0=0,5}} = K_{\text{п}\gamma_0=0,5}\ \theta_a + \theta_i - 2\vartheta_{\text{пов}}\ , \tag{2}$$

где $K_{\text{п}}$ – рассчитанный по результатам эксперимента коэффициент подобия (для сочетания процессов конденсации и десублимации):

$$K_{\text{п}\gamma_0=0,5} = 94,34 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot {}^\circ\text{C/c}}.$$

Следовательно, максимально возможная масса рассматриваемых отложений на единице площади поверхности обесточенного провода при отсутствии ветра имеет ту же линейную зависимость от разниц линейных интегралов функций изменения по времени θ_a, θ_i, $\vartheta_{\text{пов}}$:

$$\left.\frac{d\ P_{t_1} - P_{t_0}}{dS}\right|_{\gamma_0=0,5} = K_{\text{п}\gamma_0=0,5}\left(\int_{t_0}^{t_1} \theta_a + \theta_i - 2\vartheta_{\text{пов}}\ dt\right). \qquad (3)$$

От максимально возможной массы отложений на единице площади поверхности провода по очевидным зависимостям нетрудно перейти к массе отложений на единице длины провода и массе отложений в пролете.

Предложены уравнения для определения плотности, максимально возможной массы отложений и интенсивности их образования, учитывающие температуру провода, температуру и влажность воздуха, направление и скорость ветра, напряженность электрического поля провода. Все коэффициенты, учитывающие влияние описанных факторов, получены эмпирическим путем. Предложенные уравнения легли в основу работы термодинамического способа мониторинга гололедообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение эффективности воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ в гололедных районах: монография / Г.Г. Угаров, Н.Ю. Шевченко, Ю.В. Лебедева, А.Г.Сошинов. – М.: Перо, 2013. – 187 с.

2. *Титов Д.Е.* Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Электро. – 2014. – № 1. – С. 31–34.

3. *Титов Д.Е.* Термодинамический способ мониторинга гололедных отложений на проводах // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 4. – С. 37–44.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ У ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДА НА ОБРАЗОВАНИЕ ГОЛОЛЕДА

Д.Е. Титов, Г.Г. Угаров, А.Г. Сошинов

Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета,
г. Камышин, dm30081989@yandex.ru

В статье выведены коэффициенты, учитывающие влияние электромагнитного поля провода на интенсивность гололедообразования на проводе. Коэффициенты используются в математической модели по термодинамическому способу для определения массы отложений интенсивности ее роста по замеренным температуре и влажности воздуха, направлению и скорости ветра, температуре провода.

In article the coefficients considering influence of an electromagnetic field of a wire on intensity of icing on a wire are removed. Coefficients are used in mathematical model on a thermodynamic way for determination of mass of ais of intensity of its growth on the measured temperature and humidity of air, the direction and wind speed, wire temperature.

Первые исследования влияния напряженности электрического поля провода на капли тумана и мороси, из которых образуется гололед, проводились на полевом стенде в районе ремонтной базы одного из участков ЛЭП 400 кВ Куйбышев–Москва (Владимирская область) и в лабораторных условиях – в холодильной камере с аэродинамической трубой, которая засасывала пар из испарителя [1].

Испытания показали, что под воздействием электрического поля вес гололеда на проводе увеличивается. Это объясняется тем, что в электрическом поле провода капли тумана и мороси поляризуются, создавая при положительном заряде провода отрицательный заряд диполя, обращенный к проводу, что создает условия для притягивания капли к проводу.

При радиусе капли больше 20…50 мкм влияние заряда практически не сказывается. Поэтому можно принять, что такая капля в пересыщенном воздухе при нахождении в электрическом поле провода ведет себя так же, как и вдали от провода. Более мелкие капли под влиянием электрического поля возрастают в размерах до 5…10 мкм и замедляют свой рост. В ненасыщенном воздухе ($S < 1$) при приближении капли к проводу под напряжением и заряжением единичным зарядом можно пренебречь явлением увеличения мелких капель пара, а тем бо-

лее крупных. Следовательно, электромагнитное поле практически не оказывает влияния на скорость десублимации и конденсации пара в объеме вблизи провода.

В электрическом поле провода капли тумана и мороси поляризуются, создавая при положительном заряде провода отрицательный заряд диполя, обращенный к проводу, что создает условия для притягивания капли к проводу.

Воздействие электрического поля провода более интенсивно для капель малого размера, способных десублимироваться и конденсироваться на поверхность провода. Поэтому напряженность электрического поля вблизи провода оказывает заметное влияние на интенсивность десублимации и конденсации. А так как плотность отложений на проводе при десублимации ниже, чем при конденсации, то кратность увеличения удельного веса гололеда при десублимации пара на провод под напряжением выше кратности при конденсации более чем в два раза.

При росте гололедной муфты снижается кратность увеличения веса гололеда на проводе под напряжением.

Выведено выражение для определения кратности увеличения удельного веса гололеда на проводе под напряжением. При десублимации кратность увеличения удельного веса отложений на одиночном проводе под напряжением составляет:

$$K_{Э\gamma_0 = 0,05} = 0,67 \frac{\xi U \cdot 10^{-6}}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) r} + 1, \qquad (1)$$

где r – приведенный радиус провода, м; h – высота подвеса провода, м; ξ – электрическая проницаемость воздуха, о. е.; U – напряжение провода, В.

При конденсации кратность увеличения удельного веса гололеда на одиночном проводе под напряжением составляет

$$K_{Э\gamma_0 = 0,9} = 0,14 \frac{\xi U \cdot 10^{-6}}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) r} + 1. \qquad (2)$$

При сочетании процессов конденсации и десублимации кратность увеличения удельного веса гололеда на одиночном проводе под напряжением составляет

$$K_{Э\gamma_0 = 0,5} = 0,18 \frac{\xi U \cdot 10^{-6}}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) r} + 1 . \qquad (3)$$

Уравнения (1) – (3) необходимо учитывать при оценке интенсивности увеличения муфты гололеда [2].

Выводы

1. Электромагнитное поле практически не оказывает влияния на скорость десублимации и конденсации пара в объеме вблизи провода.

2. В электрическом поле провода капли тумана и мороси поляризуются, создавая при положительном заряде провода отрицательный заряд диполя, обращенный к проводу, что создает условия для притягивания капли к проводу.

3. Воздействие электрического поля провода более интенсивно для капель размером 5…10 мкм, способных десублимироваться и конденсироваться на поверхность провода.

4. Кратность увеличения удельного веса гололеда при десублимации пара на провод под напряжением выше, чем при конденсации более чем в два раза.

5. При росте гололедной муфты снижается кратность увеличения веса гололеда на проводе под напряжением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Либерман Н.Я.* Исследование вибрации проводов расщепленной фазы на линиях 400 кВ // Дальняя электропередача Волжская ГЭС им. В.И. Ленина-Москва: сб. статей. – М.: Госэнергоиздат, 1958.

2. *Титов Д.Е., Угаров Г.Г.* Учет температуры провода воздушной линии при определении начала образования гололедных отложений // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 5. – С. 46–52.

ИНДУКЦИОННЫЕ НАВОДКИ В ОТТЯЖКАХ ОПОР ВЛ 500 КВ И ПЕРЕМЕННЫЕ ТОКИ, СТЕКАЮЩИЕ В ГРУНТ С АНКЕРНЫХ КРЕПЛЕНИЙ

Б.А. Утеулиев, А.Г. Тарасов, Ю.В. Целебровский

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, info@electrocorr.ru, bauka1177@gmail.com

Наведенные рабочими токами ВЛ переменные токи, протекающие в элементах тросовых оттяжек портальных опор, ускоряют коррозионное разрушение подземных и надземных контактов несущих элементов анкерных креплений. Выполнен расчет переменных токов, протекающих по тросовым оттяжкам анкерных креплений опор и стекающих в грунт. Оценена плотность этих токов и возможность электрической коррозии подземных конструкций.

Alternating currents conducted by operating currents of transmission lines and flowing in the elements of portal supports cable braces accelerate the corrosion destruction of underground and surface contact bearing elements of anchors. The calculation of alternating currents flowing on towers cable braces and flowing into the ground to anchors was made. Density of these currents and the possibility of electrical corrosion of underground structures were estimated.

Применение оттяжек на опорах ВЛ переменного тока в большинстве случаев приводит к появлению больших замкнутых контуров, в которых могут наводиться токи. Эти токи способны вызывать электрическую эрозию в местах разъемных соединений несущих элементов опор, а при стекании в грунт усиливать грунтовую коррозию. По указанным причинам в последние 15-20 лет происходили многократные аварии, связанные с падением опор из-за коррозии подземных анкерных конструкций [1, 2].

Вместе с тем, как показывают проведенные измерения на действующей ВЛ, даже в случае новых опор (когда переходные контактные сопротивления имеющихся у опоры контуров относительно малы) максимальный ток в тросовых растяжках не превышает $I_м$ = 7…10 А. Это подтверждается расчетом если в общее продольное сопротивление контура «трос–трос» включить переходные контактные сопротивления (опора–тросы, тросы–болты, болты–петля), которые даже на новых опорах составляют $R_{пер} = (1{,}0\ldots2{,}0)\,R_{ср}^{тр}$. По мере развития коррозионных процессов влияние переходных сопротивлений будет возрастать.

При расчете токов, протекающих в грунте между болтами стандартного анкерного узла под воздействием расчетного напряжения в контуре по металлу $\varepsilon_М$ = 414 мВ, и разбивке для удобства расчета каждой стороны болта на три ортогональных участка (длиной L = 1 м) и сопротивлении грунта ρ = 10 Ом·м – собственные значения сопротивлений растеканию по участкам составили: вверху – $R_{ii}^{(1)}$ = 6,78 Ом, в середине – $R_{ii}^{(2)}$ = 5,96 Ом и внизу – $R_{ii}^{(3)}$ = 5,85 Ом, а взаимные сопротивления при этом имели значения R_{ij} = 0,643…3,33 Ом в зависимости от расстояния между взаимодействующими участками. Соответственно, значение стекающего (втекающего) с участка тока составило: вверху – I_1 = 23,2 мА, в середине – I_2 = 27,6 мА и внизу – I_3 = 43,4 мА, а суммарное значение тока (протекающего с одного болта на другой) – I_S = 188,4 мА.

При снижении удельного сопротивления грунта до ρ = 2 Ом·м значения всех стекающих с болтов токов пропорционально возрастают и их плотность в нижней части болта достигает значения $j_н$ = 3,47 А/м^2.

При расчетах токов, протекающих в контуре по металлу и грунту, т. е. между болтами и фундаментами опор, под воздействием расчетного напряжения $\varepsilon_з$ = 495 мВ и при аналогичной разбивке болтов на три ортогональных участка с одинаковым удельным сопротивлением грунта ρ = 10 Ом·м значения стекающих с болтов в грунт токов составили: для верхних участков – I_1 = 24,3 мА, для средних – I_2 = 24,0 мА и для нижних I_3 = 25,7 мА при суммарном значении стекающих токов – I_S = 296,6 мА (т. е. почти в 1,5 раза больше, чем в контуре «болт–болт»). Как видим, в данном случае не наблюдается резкого увеличения токов с глубиной, поскольку отсутствует фактор сближения нижних участков, между которыми протекал ток в предыдущей расчетной модели.

С уменьшением удельного сопротивления грунта до ρ = 2 Ом·м значения токов возрастут в пять раз и плотность стекающих с нижней части болта токов составит $J_н$ = 1,24 А/м^2.

Таким образом, учитывая разность фаз (90°) для токов в контурах по металлу и по грунту, получим суммарную максимальную плотность токов в нижней части болтов для низкоомных грунтов:

$$j_н = \sqrt{j_{н1}^2 + j_{н2}^2} = \sqrt{3,47^2 + 1,24^2} \approx 3,7 \text{ А/м}^2.$$

Выводы

1. В результате индуктивного влияния от рабочих токов трехфазной воздушной линии в оттяжках П-образных опор ВЛ 500 кВ наводятся два напряжения, сдвинутые по фазе на 90°. Первое $\varepsilon_м$, действу-

ющее в контуре «трос 1-й оттяжки – трос 2-й оттяжки» и равное разности наводимых в обоих тросах ЭДС, которая составляет 414 мВ, а второе $\varepsilon_З$, действующее в контуре «тросы оттяжек – грунт – опора» и равное сумме наводимых в обоих тросах ЭДС, составляет 495 мВ.

2. При хорошем переходном контакте между U-болтами и петлей анкерной плиты ($R_{пер}$ = 0,02…0,04 Ом) и сопротивлении тросов диаметром 18,5 мм – $R_{ср}^{тр}$ = 0,021 Ом токи, протекающие в контуре «трос 1-й оттяжки – трос 2-й оттяжки» под воздействием $\varepsilon_м$ = 414 мВ, могут достигать значений $I_м$ = 8…10 А, а в контуре «тросы оттяжек – грунт – опора» под воздействием $\varepsilon_З$ = 495 мВ соответственно $I_З$ = 2…3 А (при удельном сопротивлении грунта 2…3 Ом·м).

По мере увеличения переходного сопротивления в контактной системе опоры, а также с ростом удельного сопротивления грунта, уровень токов $I_М$ и $I_З$ резко падает.

3. При плохом контакте болты – петля (единицы и даже десятки Ом) и удельном сопротивлении грунта ρ = 2 Ом м максимальная плотность токов, протекающих в грунте через нижние части болтов под воздействием напряжения $\varepsilon_м$ = 414 мВ, составляет $j_{н1}$ = 3,47 А/м^2, а для напряжения $\varepsilon_З$ = 495 мВ – не превышает значения $j_{н2}$ = 1,24 А/м^2.

С увеличением удельного сопротивления грунта уровень $j_{н1}$ и $j_{н2}$ пропорционально падает. Однако и эти значения плотностей токов представляют коррозионную опасность для арматуры железобетонных конструкций опор и естественных заземлителей.

Характерно также резкое увеличение плотности тока $j_{н1}$ в нижней части болтов, что объясняется уменьшением расстояния между болтами по мере их приближения к петле (плите).

4. Общая плотность тока, стекающего в грунт с болтов, составляет 3,7 А/м^2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коррозионное состояние анкерных устройств оттяжек опор ВЛ 500 кВ Западных электрических сетей «Омскэнерго» / А.Г. Тарасов, А.В. Харитин, В.И. Халецкий, В.И. Гизбрехт // Энергетическое строительство. – 1995. – № 6. – С. 56–59.

2. *Celebrowskij J.W., Tarasow A.G.* Wplyw pradow awaryjnych na korozjc w obiektach elektroenergetycznych // Bezpieczenstwo elektryczne: 12 miedzynarodowa konf. nauk.-techn., Wroclaw, Polska, 1999. – Wroclaw: Inst. energoelektryki Politechn., 1999. – T. 1. – S. 469–474.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

А.И. Хальясмаа, Д.А. Балтин, Н.А. Бабушкина

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, lkhalyasmaa@mail.ru

Статья посвящена проблемам современной энергетики России в области оценки технического состояния оборудования электрических станций и подстанций. Представлен алгоритм работы автоматизированной модели, реализованной с помощью нечеткого вывода Такаги-Сугено. Выполнен анализ эффективности внедрения автоматизированной системы оценки фактического состояния оборудования в инструментарий ремонтных служб энергетических предприятий.

The article is concerned with problems of modern power industry in Russia in the context of technical state assessment of power plants and substations' equipment. Operations algorithm of automated model implemented with the use of Takagi-Sugeno fuzzy inference method are presented in the article. Performance analysis of implementation of automated system of equipment actual state assessment in toolset of power plants maintenance services was performed.

Сегодня комплексная оценка фактического состояния электрооборудования (ОФС) электрических станций (ЭС) и подстанций (ПС) является актуальной задачей и необходима для определения эксплуатационного ресурса оборудования с целью повышения надежности оборудования [1].

В статье описан алгоритм работы модели экспертной системы ОФС ЭС и ПС. Методом математического моделирования выбран метод нечеткого логического вывода Такаги-Сугено, способный к обучению, обобщению и адаптации к изменяющимся условиям задач, в том числе с нестандартными решениями [2]. Нечеткий вывод представляет собой процедуру получения нечетких заключений на основе нечетких условий (предпосылок) с использованием нечеткой логики [3] и определения функций принадлежности [4].

Разработанная модель реализуется на основе данных диагностики и испытаний оборудования ЭС и ПС, а также другой доступной эксплуатационной информации о текущем состоянии оборудования. Структура модели представлена в [5].

Многочисленные исследования, выполненные авторами работы, показали, что с помощью представленного алгоритма работы модели можно произвести ОФСЭС и ПС с вероятностью ошибки определения состояния в 2 %. Проведенная согласно [6] оценка эффективности внедрения в инструментарий ремонтных служб системы автоматизированной ОФС доказывает состоятельность использования разработанной модели на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dmitriev S.A., Kokin S.E.* Working out the policy of technical modernization of big cities' power supply on the basis of network condition estimation model // 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2010, 16–19 May 2010. – Prague, Czech Republic: Wroclaw University of Technology, 2010. – P. 226–229.
2. *Сотник С.Л.* Конспект лекций по курсу «Основы проектирования систем искусственного интеллекта». – 1997–1998. – 87 с. – URL: http://www.shestopaloff.ca/kyriako/Russian/Artificial_Intelligence/Some_publications/Lectures_Artificial_ intelligence.pdf (дата обращения: 09.09.2014).
3. *Шадрина О.А.* Модели и алгоритм обработки данных в задачах управления экологической обстановкой среднего города: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.10. – Курск, 2007. – 16 с.
4. *Khalyasmaa* A.*I., Dmitriev S.A., Eroshenko S.A.* Membership functions for the formation of the electrical equipment state estimation for power stations and substations // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 805–806. – P. 663–666.
5. *Dmitriev S.A., Khalyasmaa A.I.* Power equipment technical state assessment principles // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 492. – P. 531–535.
6. *Bierman H.J., Smid S.* The capital budgeting decision: Economic analysis of investment projects. – 9th ed. – Abingdon, UK: Taylor & Francis Group, 2006. – 402 p.

Подсекция 4. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА, ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В СТАЛЬНЫХ ТРУБАХ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ГАЗОПРОВОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А.В. Афанасьев, А.А. Мельников, М.И. Васьков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (Национальный исследовательский университет), Инженерно-технический центр – филиал ООО «Газпром трансгаз Самара», г. Самара

ssau@ssau.ru; samstg@samaratransgaz.gazprom.ru

В работе представлены результаты исследований стресс-коррозионых дефектов, обнаруженных на газопроводе компрессорной станции. Выявлено влияние многоцикловой усталости на развитие подобных дефектов. Обнаружена связь между линейными размерами стресс-коррозионной трещины.

The paper presents the results of research of the stress corrosion defects detected on the gas pipeline compressor station. The effect of high-cycle fatigue on the development of such defects was found between the linear dimensions of the stress corrosion crack.

Одной из основных причин отказов протяженных подземных трубопроводных систем является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), называемое в отечественной терминологии стресс-коррозией, развивающейся на внешней, катодно-защищенной поверхности подземных газопроводов [1].

Как известно, более половины всех аварий на магистральных газопроводах (МГ) происходит по причине стресс-коррозии. Таким образом, стресс-коррозия магистральных газопроводов представляет собой большую опасность как для самих трубопроводов, так и для окружающей среды и населения [2].

В настоящее время у специалистов нет единого мнения по поводу первопричин появления характера развития и скорости роста дефектов КРН. Характерная особенность КРН – это избирательное, неоднородное распределение дефектов в масштабе всего газопровода и на отдельной трубе [3].

Дефекты КРН были обнаружены на выходном трубопроводе компрессорной станции МГ. Срок эксплуатации газопровода 30 лет. Режим работы за последний год характеризуется колебаниями рабочего давления от 5,98 до 6,94 МПа.

Были обнаружены несколько зон с трещиноподобными дефектами, находящиеся на теле трубы со стороны нижней образующей.

При микроскопических исследованиях вырезанных образцов на растровом электронном микроскопе TESCAN Vega SB были зафиксированы трещины, развивающиеся в генеральном направлении перпендикулярно наружной поверхности трубы (рис. 1). Развитие трещин носит скачкообразный характер.

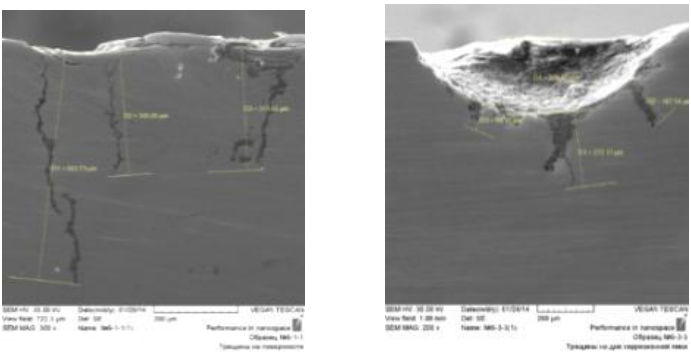
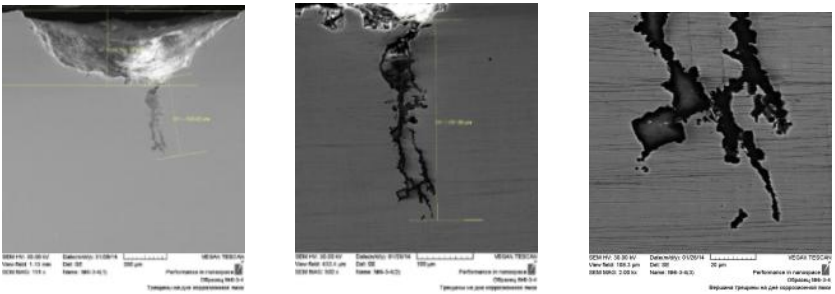


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения трещин на дне коррозионных язв

При анализе механизма распространения трещин обнаружено, что трещины расширяются и сужаются, не имеют постоянного сечения, ветвятся (рис. 2).



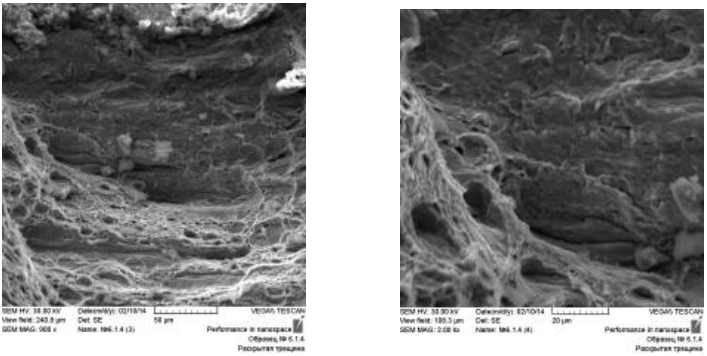
а *б* *в*

Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения трещины в образце:
а) x 151; *б*) x 500; *в*) x 2000

Зачастую развитие трещины вновь возобновляется из, казалось бы, уже неактивной, затупленной трещины. Особенно это хорошо видно в крайней левой трещине на рис. 3, *в*.

Причиной появления разрушающих напряжений в теле трубы может быть многоцикловое нагружение малыми (рабочими при перекачке газа) нагрузками.

При исследованиях в вершине раскрытой трещины были обнаружены усталостные бороздки (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения вершины раскрытой трещины:
а) x 900; *б*) x 2000

Наличие усталостных бороздок свидетельствует о том, что в процессе развития стресс-коррозионных дефектов важную роль играет циклическое изменение внутренних кольцевых напряжений в стенке, инициированное пульсацией давления газа в газопроводе при работе газоперекачивающего агрегата. Также может быть значительным влияние температурного фактора [4].

При микроскопических исследованиях наружной поверхности оценивались параметры большого массива трещин (рис. 4).

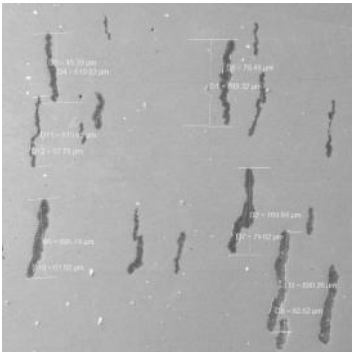


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения трещин КРН на внешней поверхности образца

Было обнаружено, что между шириной раскрытия и длиной трещины существует закономерность. Простое статистическое обобщение показало, что соотношение длины трещины к ширине ее раскрытия можно описать как 10:1.

Глубина стресс-коррозионных дефектов, как показали исследования раскрытых образцов, нигде не превышала 1000 мкм. Так как большинство трещин КРН в исследуемых образцах однотипны по своему происхождению, размерам и морфологии, можно заключить, что подобная закономерность существует в данном конкретном случае КРН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В.* Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем. – Уфа: Гилем, 2007. – 177 с.

2. *Лапынин Ю.Г., Савеня С.Н., Савеня А.А.* Проблемы коррозионного растрескивания под напряжением трубных сталей // Альманах Волгоград-

ского отделения международной академии авторов научных открытий и изобретений. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2007. – С. 180–185.

3. *Сунагатов М.Ф., Гумеров А.К., Шафиков Р.Р.* Стресс-коррозия на магистральных трубопроводах и человеческий фактор // Иптер. – 2011. – № 5. – С. 23–26.

4. *Гарис Н.А., Аскаров Г.Р.* Новый подход к решению проблемы стрескоррозии на трубопроводах больших диаметров // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2, № 1. – С. 137–142.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАНАЛЕ С ПРИОСЕВОЙ ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ

А.И. Байгулова, А.М. Бубенчиков, О.В. Матвиенко

Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
г. Томск, Matvolegv@mail.r

В работе строится математическая модель турбулентного течения, горения и теплообмена в осесимметричной камере с приосевой зоной компактированного дисперсного материала. Проведены численные исследования по влиянию пористости на характер распространения турбулентного пламени в каталитической камере.

The paper describes a mathematical model of turbulent flow, combustion and heat exchange in axially symmetric chamber with axile area of compacted dispersed material. Numerical investigation was done to study the influence of porosity on turbulent combustion distribution in catalyst chamber.

Решение проблемы о конверсии метана в жидкие углеводороды, по-видимому, напрямую связано с низкотемпературным пористым горением, поскольку компактированный дисперсный материал является весьма эффективным регулятором теплового режима каталитической камеры. Это же свойство пористого материала позволяет создавать компактные каталитические аппараты, например, установки для термической обработки твердого топлива. В настоящей работе рассмотрен один из примеров турбулентного фильтрационного горения, которое реализуется в окружении газового горения.

Фильтрационное горение газа (ФГГ) в режиме низких скоростей обладает рядом свойств, привлекательных с точки зрения энергетики. Процесс внутренней рекуперации тепла, реализующийся при ФГГ, позволяет сжигать топливные смеси с недостатком энергии, которые не могут быть использованы в традиционных методах сжигания. Тепловая инерционность пористой среды обусловливает повышенную устойчивость процесса горения по сравнению с обычным пламенем. Многопараметричность процесса ФГГ обеспечивает легкость управления этим процессом и возможность получения заданных характеристик горения.

Для описания фильтрационного горения в канале с пористой вставкой использовалась объемно-усредненная модель взаимопроникающих континуумов. Применены уравнения Бринкмана–Форчхеймера, записанные относительно осредненных по времени газодинамических параметров.

При определении характеристик турбулентности используется k–ε модель, адаптированная Джонсом и Лаундером для расчета течений с низкими числами Рейнольдса [1].

Кроме этого, модель модифицирована на расчет закрученных потоков и течения в высокопористых средах. Влияние пористого слоя на характеристики турбулентности учитывается введением в уравнения для структуры турбулентности дополнительных членов [2].

Сопротивление пористой среды определено с помощью уравнения Эргуна для монодисперсной упаковки шаров [3, 4]. В качестве реагирующей смеси рассматривалась стехиометрическая смесь метана с воздухом. Для описания процесса горения помимо уравнения энергии были применены уравнения сохранения массы компонентов O_2, CH_4, CO_2, N_2, записанные с учетом протекания в потоке необратимой экзотермической химической реакции окисления метана. Таким образом, процесс горения определяется уравнением теплопроводности пористого каркаса, диффузии реагентов, а также уравнением состояния смеси.

Скорость химической реакции определяется как химической кинетикой, так и процессами турбулентного смешения и может быть записана как

$$\Phi = \begin{cases} k_0 \rho^2 M_{ox} M_{fl} \exp\left(-\dfrac{E}{RT}\right), & Da \le 1, \\ B\rho^2 \min\left[M_{ox}, 2M_{fl}\right]\dfrac{\varepsilon}{k}, & 1 < Da. \end{cases} \tag{1}$$

Исследована структура течения в цилиндрическом канале с приосевой пористой вставкой. Реактор представляет собой цилиндрическую трубу радиусом R. Центральная часть реактора, имеющая поперечный размер r_{in}, выложена засыпкой из шаров диаметром d. Пристенная зона реактора является свободной для прохода газов. Ввод газа в реактор осуществляется как через центральную часть, так и через пористую засыпку.

Как показали вычисления, в высокопористых средах влияние пористого каркаса на динамику потока очень мало. Соответственно, картина воспламенения при отсутствии теплового взаимодействия между пористым каркасом и горящей смесью должна была бы напоминать картину горения без пористой вставки. Однако наличие теплообмена между газом и пористой вставкой качественно изменяет картину горения. Тепло, выделившееся в результате химической реакции, расходуется на разогрев пористого каркаса, что препятствует горению в пористом слое. В результате этого горение происходит только в периферийной области. Газ, протекающий через пористую вставку с заданными параметрами течения на длинах $L < 1$ м, не воспламеняется. С уменьшением пористости возрастает роль кондуктивного теплообмена в пористом слое. В результате тепло, выделяемое в периферийной зоне горения, передается в пористую вставку, обеспечивая воспламенение газа в приосевой части канала. При $\gamma = 0{,}8$ на выходе из канала смесь горит во всем сечении канала. С дальнейшим уменьшением пористости роль кондуктивного теплообмена становится более значительной. Зона горения приближается ко входу в канал, при этом фронт пламени становится менее изогнутым. Искривление фронта пламени наблюдается только в пристеночной области, что связано с охлаждением потока возле стенки.

В рассчитанных режимах с высокими значениями пористости газ, протекающий через пористую вставку, не воспламеняется, поэтому приосевая зона, заполненная дисперсным материалом, реализует себя как зона пористого охлаждения. Уменьшение пористости увеличивает вклад кондуктивного переноса тепла через дисперсный материал, что приводит к продвижению пламени вверх по потоку. Таким образом, в этих условиях компактированный материал выполняет роль воспламенителя смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Matvienko O.V., Ushakov V.M.* Numerical modeling of gaseous combustion in a porous combustor // Combustion and Atmospheric Pollution / Ed. G.D. Roy, S.M. Frolov, A.M. Starik. – P. 322–325.
2. *Матвиенко О.В., Ушаков В.М.* Численное исследование структуры закрученного потока в цилиндрической камере, частично заполненной пористым материалом // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2003. – № 4. – С. 14–24.
3. *Доброго К.В., Жданок С.А.* Физика фильтрационного горения газов. – Минск: ИТМО, 2002. – 204 с.
4. *Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.* Combustion. – Berlin: Springer, 1999. – 300 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛИВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СЖИГАНИЯ ИКЖТ В КОТЛОАГРЕГАТЕ С ЦИКЛОННЫМ ПРЕДТОПКОМ

Е.Е. Бойко, Ю.В. Овчинников

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, e.boyko1991@yandex.ru

В статье приведены результаты экспериментальных данных по распыливанию ИКЖТ и их сравнение с расчетными данными. Рассчитан критерий воспламеняемости ИКЖТ. Получены конструктивно-компоновочные параметры циклонного предтопка.

The results of experimental data spraing ACLF and their comparison with the calculated data are presented in the article. Flammability criterion of ACLF was calculated. Constructive and layout parameters of the cyclone furnace extension were obtained.

В разное время проводились многочисленные исследования, связанные с искусственным композиционным жидким топливом (ИКЖТ). Однако, работ по распыливанию и каплеобразованию топливного факела немного. В основном это старые работы 1960-х годов, описывающие распыливание водоугольного топлива (ВУТ) [1]. Среди современных исследований также можно отметить работы, связанные с распыливанием ВУТ [2, 4], которое по свойствам отличается от ИКЖТ [3, 4].

Структура ИКЖТ такова, что в капле топлива содержится несколько тысяч частиц угля диаметром 2…3 мкм, что позволяет говорить о том, что свойства факела ИКЖТ можно моделировать водным факелом.

Для проверки данной гипотеза был создан лабораторный стенд, на котором проводился эксперимент по распыливанию ИКЖТ и воды.

Распыливание производилось при помощи двухкомпонентных суспензионных форсунок специальной конструкции.

Испытания форсунок, выполненные в опытно-промышленных условиях, показали удовлетворительный распыл ИКЖТ и моделируемость распыла топлива водой на различных режимах. Экспериментально определены коэффициент поверхностного натяжения ИКЖТ $\sigma_{ИКЖТ} = 0,068$ н/м, максимальный и минимальный диаметра капель ИКЖИ: $d_{max} = 42$ мкм, $d_{min} = 8,8$ мкм.

Структура капель ИКЖТ, полученных при распыле, однородна и существенно не отличается от водных капель при одинаковых условиях распыла.

Масса капель ИКЖТ больше массы водных капель, так как плотность ИКЖТ (1,33 г/см^3) выше плотности воды. Это необходимо учитывать при расчете с использованием известных формул.

Данные, полученные при распыливании ИКЖТ, позволили рассчитать конструктивно-компоновочные параметры циклонного предтопка.

Циклонный предтопок позволяет решить проблему сжигания ИКЖТ, поскольку это невозможно сделать традиционными методами, так как ИКЖТ на 50 % состоит из воды.

Рассчитав время до начала воспламенения ИКЖТ $\tau_0 = 0,082$ с и скорость капли v = 30 м/с, мы получили длину предтопка:

$$l = v\tau_0 = 30 \cdot 0,082 = 2,46 \text{ м}.$$

Эти данные были проверены экспериментальным путем на специально созданном промышленном стенде и сконструированном предтопке.

Результаты показали хорошую сходимость расчетных данных с экспериментальными.

Также мы опередили критерий воспламеняемости для ИКЖТ.

В Новосибирском государственном техническом университете проводились исследования по разработке критерия воспламеняемости

твердых топлив. Данный критерий был получен и преобразован для ИКЖТ:

$$K_0 = \frac{(Q_{H_2} H)^{daf} \cdot \Phi - Q_{воды}^{исп}(1-\Phi)}{c_т T_{восп}},$$

где H – содержание водорода (доля); Q_{H_2} – теплота сгорания водорода, кДж/кг; $c_т$ – теплоемкость твердого топлива, кДж/кг·К; $T_{восп}$ – температура воспламенения твердого топлива, К; Ф – доля угля в ИКЖТ; $Q_{воды}^{исп}$ – теплота испарения воды, кДж/кг.

Критерий K_0 служит индикатором класса топлив, поскольку численные значения критерия K_0 соответствуют определенным группам твердых топлив. Так, для антрацитов данный критерий лежит в диапазоне от 2 до 3; для ИКЖТ – от 4,5 до 5,5; для тощих углей – 7…9 и для бурых – 11…12. Этот критерий можно увеличить, добавляя в ИКЖТ отходы нефти. Так, эксперимент показал, что при добавлении 8 % отходов нефти от общего количества ИКЖТ мы увеличиваем K_0 до 11-12, что сопоставимо с бурыми углями.

Таким образом, в статье представлены результаты, полученные при распыливании ИКЖТ пневматическими форсунками; установлено, что распыл ИКЖТ возможно моделировать распылом воды; определены коэффициент поверхностного натяжения ИКЖТ и размеры капель при распыле. Рассчитаны конструктивно-компоновочные параметры циклонного предтопка. Определен критерий воспламеняемости для ИКЖТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Делягин Г.Н.* Сжигание водоугольных суспензий – метод использования обводненных твердых топлив: дис. … д-ра техн. наук. – М., 1970. – 32 с.

2. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками / Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 4. –С. 37–40.

3. *Овчинников Ю.В., Рудакова Е.Е.* Распыление водоугольного топлива пневматическими форсунками // Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Вып. 18. – С. 118–124.

4. A new technology for burning solid fuel / P.A. Shchinnikov, E.A. Yevtushenko, Y.V. Ovchinnikov, G.V. Nozdrenko, L.I. Pugach, V.G. Tomilov, Yu.L. Pugach // Thermal Engineering. –2001. – Vol. 48, N 7. – P. 550–553. (In Russian)

5. Исследование воспламенения твердых топлив и ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, А.И. Цепенок, А.В. Шихотинов, Е.В. Татарникова // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2011. – № 1 (16). – С. 117–126.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ПЕНО – И ПОРОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЯХ В РЕАКЦИИ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА

А.С. Брайко[12], Ю.И. Амосов[1], В.А. Кириллов[1]

[1] *Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск*

[2] *Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, andrey_brayko@mail.ru*

Данная работа посвящена исследованиям образцов катализаторов паровой конверсии метана в водородсодержащий газ для целей водородной энергетики на основе различных термостойких металлопористых носителей с регулярной структурой, но с одинаковыми активными компонентами. Было показано, что катализатор на основе никелевого ВПЯМ (высокопористый ячеистый материал) является наилучшим катализатором, имеющим характеристики лучше, чем у промышленного катализатора НИАП-18.

This work is devoted to the study of samples of methane steam reforming catalysts in the hydrogen-containing gas for purposes of hydrogen energetics based on various heat-resistant porous metal carriers with a regular structure, but with the same active ingredients. It was shown that a catalyst based on nickel HPCM (highly porous cellular material) is the best catalyst. This catalyst has better characteristics than the commercial catalyst NIAP-8.

Традиционно реакцию паровой конверсии метана проводят в трубчатых реакторах с гранулированным катализатором. Недостатком таких реакторов является затруднение переноса тепла через стенку реактора и в слое катализатора. Одним из подходов к решению данной задачи является применение реакторов, совмещающих каталитическую и теплообменную поверхности, в которых одновременно проводят эндотермическую и экзотермическую реакции в смежных каналах, разделенных теплопроводной стенкой. Для применения в каталитических

теплообменных реакторах наиболее перспективны катализаторы на основе металлических носителей. Разработка катализаторов с высокой теплопроводностью актуальна и для создания топливных элементов, наибольший эффект работы которых достигается при проведении процесса паровой конверсии метана одновременно с реакцией окисления отработанного анодного газа, содержащего водород. Катализаторы на основе металлических носителей обладают механической прочностью и высокой теплопроводностью. Дополнительным преимуществом является возможность их структурирования и создания блочных катализаторов. Из литературных данных известно, что основное направление разработок катализаторов паровой конверсии метана связано с никелевыми катализаторами [1].

Одними из новых металлических носителей катализаторов являются металлические пеноматериалы.

Высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ, пеноматериалы) – новый класс материалов ячеистой структуры, имеющих крайне низкую плотность в сочетании с высокой удельной прочностью и поверхностью, низким гидравлическим сопротивлением. Пеноматериалы могут быть изготовлены из совершенно различных базовых материалов: никеля, меди, железа, нихрома, алюминия и др. [2].

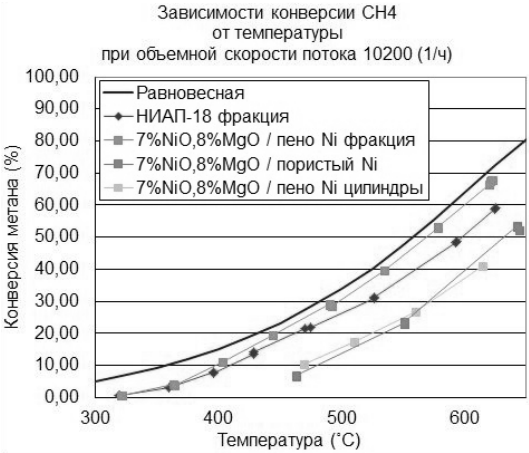
В данной работе были испытаны образцы катализаторов на основе различных пено- и пористых носителей, но имеющие одинаковые активные компоненты 7 % NiO, 8 % MgO. В данных экспериментальных условиях в качестве катализатора сравнения был испытан промышленный катализатор НИАП-18 в виде фракции. Для определения влияния MgO был испытан образец, не содержащий данного промотора.

Эксперименты проводились в диапазоне температур 270…660 °С, при объемных скоростях потока реагентов 2600, 6400, 10 200, 13 500, 16 500 $ч^{-1}$ и давлении 1 атм.

Отмечено значительное падение активности образца 5 % NiO/пористый Ni с течением времени вплоть до полной дезактивации. Полученный результат возникает как следствие спекания активного компонента NiO (при повышении температуры скорость падения активности катализатора увеличивается), так как данный образец не содержал промотора MgO. Это подтверждается тем, что при проведении опытов на катализаторе 7 % NiO, 8 % MgO/пористый Ni падения активности с течением времени не наблюдалось.

Наилучшие показатели среди испытанных образцов показал катализатор 7 % NiO, 8 % MgO/ пенoNi фракция. При объемной скорости

подачи реагентов 10 200 ч$^{-1}$ конверсия метана на данном катализаторе выше, чем на катализаторе НИАП-18 (рисунок).



Зависимости конверсии метана от температуры
для различных катализаторов

Данные результаты предположительно объясняются большей теплопроводностью носителя катализатора 7 % NiO, 8 % MgO/ пенoNi фракция, чем у носителя катализатора НИАП-18 – термостойкой пористой керамики. По этой причине в катализаторе 7 % NiO, 8 % MgO/пенoNi фракция, вероятно, наблюдается более равномерное распределение температур, чем в НИАП-18, что благотворно сказывается на активности катализатора.

Подобное сравнение наилучшего из исследуемых катализаторов с промышленным катализатором позволяет утверждать, что катализаторы на основе пенoNi могут быть эффективными катализаторами паровой конверсии метана.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федорова З.А.* Синтез и исследование никелевых катализаторов на основе металлических носителей для реакции паровой конверсии метана в синтез-газ: дис. … канд. техн. наук: 02.00.15 / Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. – Новосибирск, 2009. – 132 с.

2. Пеноматериалы: виды, свойства, применение [Электронный ресурс]. – Пермь: ЗАО «ЭКАТ», [2012]. – URL: http://ekokataliz.ru/files/penomaterials.pdf (дата обращения: 13.11.2014).

МИГРАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ В РАБОЧИХ СРЕДАХ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ

М.А. Бубенчиков, А.И. Потекаев, А.М. Бубенчиков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, m.bubenchikov@gtt.gazprom.ru

Предложена схема простейшего расчета термофореза форменных наночастиц (нанотрубок, фуллеренов, графенов), основанная на модели прямых траекторий молекул и теореме об изменении количества движения для системы: наночастица-молекула в λ-слое. Выявлена зависимость безразмерной скорости термофореза от параметров задачи.

The paper presents the scheme of elementary calculation of thermophoresis of shaped nanoparticles (nanotubes, fullerenes, graphenes), based on the molecule direct paths model and the theorem on variation of momentum for the system: nanoparticle-molecule in λ-layer. It has been found that there is relation of thermophoresis dimensionless velocity and parameters of the task.

Применение монокинетической модели Р. Клаузиуса позволяет при подсчете числа ударов молекул о наночастицу использовать понятие λ-слоя, окружающего частицу, где λ – средняя длина свободного пробега молекул. Примем, что в одном из выделенных направлений реализуется изменение температуры. На длине, равной λ, это небольшие изменения, однако они полностью определяют процессы термофоретического движения частиц. Заселяем λ-слой молекулами газовой среды, имеющими одну скорость движения, добиваясь при этом их статистически однородного распределения в пространстве.

Таким образом, имеется ступенчатое изменение температуры, причем размер ступеньки в этом распределении также равен λ. Молекулы, сгруппированные в контрперемещающиеся пары, находящиеся в разных температурных слоях, при взаимодействии с частицей передают ей различное по величине и направлению количество движения. Разность этих вкладов и определяет величину элементарного термофоретического воздействия на частицу. Чтобы определить такое воздействие из массы взаимодействующих с частицей молекул, выделим элементарный фрагмент взаимодействия, состоящий из частицы и контрперемещающейся пары. Таким образом, все реальные двойные столкновения мы заменяем модельными тройными, не вызывающими броуновских движений. Если при этом предположить, что реализуется

зеркальное отражение молекул, то окончательный результат будет простой суммой актов взаимодействия контрпар с частицей.

Ориентируем графеновую пластинку или нанотрубку (частицу) по градиенту температуры и определим скорость ее перемещения под действием силы термофореза. В рассматриваемых условиях движение частиц осуществляется против градиента температуры. При этом контрперемещающаяся пара молекул образует некоторый угол φ_i (где i – номер пары) с обратным направлением grad T. Поскольку определяющим для нас является суммарный баланс количеств движения молекул в проекции на указанное направление, то важным становится геометрический параметр:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|\cos\varphi_i\right|}{n}, \qquad (1)$$

представляющий собой среднеарифметическую величину модулей косинусов углов наклона контрпар. Здесь n – число молекул, столкнувшихся с частицей на промежутке времени $\tau = \lambda/\upsilon$.

Введенный в рассмотрение λ-слой заключен между эффективной поверхностью наночастицы и отстоящей от нее на λ эквидистантной поверхностью. Около внешней поверхности λ-слоя описываем параллелепипед. С помощью датчика случайных чисел, который используем три раза для каждой из молекул для задания ее пространственных координат, заселяем этот параллелепипед молекулами окружающего частицу газа. Вокруг каждой молекулы строим единичный куб и помещаем в него случайным образом пробную частицу, другими словами – используем датчик случайных чисел еще три раза. Соединяем эту частицу с молекулой. Получившаяся прямая определяет направление движения молекул в пространстве. После этого определяем N – количество молекул, изначально находящихся в λ-слое. На промежутке времени $\tau = \lambda/\upsilon$ находим n – число столкновений молекул с частицей. Тогда доля столкнувшихся с частицей молекул определяется соотношением $\delta = n/N$. Эта величина входит в формулы, определяющие сопротивление частиц [1, 2].

Величина σ находится также из статистических расчетов. Вычислением δ и σ заканчивается одно испытание. Таких испытаний делается 150, после чего значения δ и σ усредняются.

Баланс количеств движения молекул и частицы при глобальном равенстве сил сопротивления и термофореза позволяет записать для частиц любой формы

$$\upsilon_p = \frac{\lambda\sigma}{2}\sqrt{\frac{3k}{mT}}q. \qquad (2)$$

Здесь υ_p – средняя скорость термофореза.

Как видим из (2), безразмерная скорость термофореза не зависит от числа ударов молекул (при этом их должно быть достаточно, чтобы обеспечить статистику в отношении определения σ) и слабо зависит от их массы. В диапазоне по числам Кнудсена $Kn = \lambda/r_p \in [10,100]$, что соответствует собственно наночастицам, скорость термофореза не зависит от размеров частицы и определяется лишь атомностью газа, величиной градиента температуры и значением геометрического параметра σ.

В механике аэровзвесей для обусловленной термофорезом скорости мелких частиц (не наночастиц) существует следующая формула:

$$\upsilon_p = f\frac{\nu}{T}q, \qquad (3)$$

где f – безразмерный коэффициент, зависящий от числа Кнудсена и изменяющийся в диапазоне 0,05…1,56, ν – коэффициент кинематической вязкости газа, T – температура, q = –grad T.

Сопоставляя (2) и (3), находим

$$f = \frac{\lambda\sigma}{2\nu}\sqrt{\frac{3kT}{m}}. \qquad (4)$$

Теперь безразмерная скорость термофореза определена теоретической формулой (4), которая учитывает влияние исходных физических и геометрических факторов. Значение геометрического параметра σ получается в результате статистических расчетов [1, 2]: σ = 0,515 для фуллеренов; $0,46 \le \sigma \le 0,65$ для графенов; $0,45 \le \sigma \le 0,55$ для нанотрубок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Потекаев А.И., Бубенчиков А.М., Бубенчиков М.А.* Новые физические представления и метод описания и расчета сопротивления движению малых частиц в газообразной среде // Физика. – 2012. – № 12. – С. 54–61.

2. *Бубенчиков М.А., Потекаев А.И., Бубенчиков А.М.* Три фундаментальные задачи молекулярной статистики // Физика. – 2013. – № 3. – С. 94–100.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРАФЕНОВОЙ ПЛАСТИНКИ С ДЕФЕКТОМ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

М.А. Бубенчиков, А.И. Потекаев, А.М. Бубенчиков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, m.bubenchikov@gtt.gazprom.ru

Обсуждается одна из схем выделения водорода из природной смеси газов. Дается математическое описание взаимодействия молекул газового окружения с графеновой пластинкой, содержащей дефект в кристаллической структуре.

The paper discusses one of the ways of hydrogen release out of natural gas mixtures. It presents mathematical description for interaction of molecules of gas environment with graphene plate, containing defect in its crystal structure.

Водород является уникальным топливом, обладающим свойством не создавать и не усугублять экологических проблем, неизменно возникающих при работе автомобильного транспорта и промышленных энергетических систем. Ввиду важности проблем использования водорода в народном хозяйстве они выделены в отдельную отрасль, называемую водородной энергетикой. Но у водорода, находящегося в небольшом количестве в природном газе, есть еще одно специфическое свойство – разрушать кристаллическую структуру металла внутренней части трубы газотранспортной системы. Это свойство обусловлено высокой подвижностью молекул, а также атомов водорода. Оно же лежит в основе предлагаемого способа выделения легких компонент (водорода, гелия) из природной смеси газов через тонкие углеродные мембраны, содержащие дефекты.

В работах [1, 2] рассматриваются практические аспекты проникновения молекул ^{4}He, ^{3}He и H_2 через поры в графене. В настоящей работе численными методами решается задача о взаимодействии перемещающейся молекулы с молекулами графеновой структуры, содержащей отверстие в кристаллической решетке. В нашей теории взаимодействие между отдельными молекулами определяется классическим потенциалом Леннарда-Джонса. Взаимодействие же со структурой мы описываем по закону независимости действий как сумму воздействий каждой молекулы структуры на рассматриваемую пробную молекулу. Согласно этому закону, если на материальную точку действует несколько сил, то они сообщают ей ускорение, равное геометрической сумме тех ускорений, которые они сообщили бы ей, действуя отдельно [3].

Суммарный потенциал взаимодействия молекул структуры с пробной молекулой можно записать как сумму отдельных потенциалов

$$\Phi = 4\varepsilon \sum_{j=1}^{N_p} \left[\left(\frac{\sigma}{\rho_j} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{\rho_j} \right)^{6} \right], \qquad (1)$$

где ρ_j – расстояние между рассматриваемой молекулой и j-й молекулой структуры, σ и ε – параметры взаимодействия пар веществ. Значения констант взаимодействия ε и σ, входящих в потенциал Леннарда-Джонса, легко найти в имеющейся литературе по молекулярной динамике.

Если исследуемая система состоит из разнородных молекул (атомов), то для параметров ε и σ справедливы следующие правила усреднения Лорентца-Бертло (Lorentz-Berthelot mixing rule):

$$\sigma_{CH} = \frac{\sigma_{CC} + \sigma_{HH}}{2}, \quad \varepsilon_{CH} = \varepsilon_{CC} \cdot \varepsilon_{HH}^{\ 1/2}. \qquad (2)$$

Рисунки 2 и 3 представляют траектории молекул, прошедших сквозь дефект в пластине. На рис. 3 использованы следующие обозначения: *1* – молекула пущена перпендикулярно пластине с позиции, находящейся на расстоянии 0,142 нм по *x* от центра дефекта; *2* – стартует так же, но с позиции 0,213 нм; *3* – так же, но с позиции 0,248 нм. Как видно из рисунка, несмотря на то что используемая модель является

детерминированной, предсказать направление движения молекулы после выхода из отверстия невозможно. На рис. 4 показаны величины скоростей молекул, прошедших через центр отверстия (сплошная линия) и на расстоянии 0,02 нм по *x* от него (пунктир).

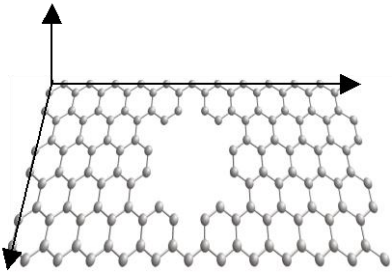


Рис. 1. Графеновая пластинка, содержащая в центральной части кристаллической решетки дефект в виде удаленных 12 узлов

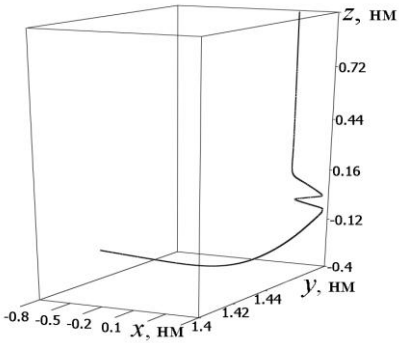


Рис. 2. Траектория молекулы, прошедшей через дефект в графеновой пластинке на расстоянии 0,14 нм от геометрического центра дефекта

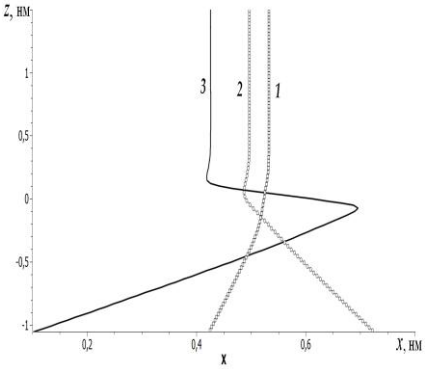


Рис. 3. Траектории молекул водорода, прошедших через дефект в углеродной пластинке

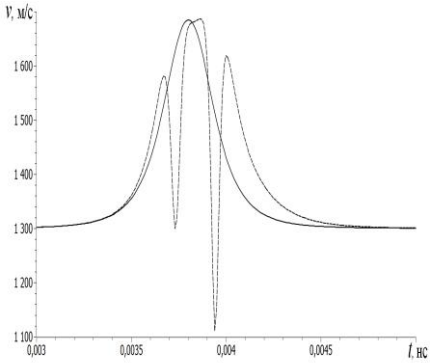


Рис. 4. Величина скоростей молекул, проходящих через углеродную пластинку

Таким образом, в рамках молекулярно-кинетического подхода построена математическая модель взаимодействия молекул и атомов водорода с плоской кристаллической углеродной структурой. В зависимости от того, какие поры (дефекты) имеет рассматриваемая структура, она может быть использована как фильтр для тех или иных компонент газовых смесей. Использование углеродных фильтров представляется наиболее эффективным в случае выделения легких компонент: водорода и гелия из природной смеси газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hauser A.W., Schrier J., Schwerdtfeger P*. Helium tunneling through nitrogen-functionalized graphene pores: Pressure- and temperature-driven approaches to isotope separation // Journal of Physical Chemistry C. – 2012. – Vol. 116, iss. 19. – P. 10819–10827.

2. *Liu H., Dai S., Jiang D.-E.* Permeance of H_2 through porous graphene from molecular dynamics // Solid State Communications. – 2013. – № 175–176. – P. 101–105.

3. *Томилов Е.Д.* Теоретическая механика. Ч. 1. – Томск: ТГУ, 1966. – 304 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ОКСИДОВ АЗОТА В ПРОДУКТАХ ГОРЕНИЯ

С.И. Герцык, Д.Б. Туктаров

Московский государственный университет машиностроения (МАМИ), г. Москва, gertsyk@mail.ru

Рассмотрена проблема выбора газогорелочных устройств для отопления промышленных печей с позиции защиты окружающей среды от выбросов оксидов азота, содержащихся в продуктах горения топлива. На основе эмпирических зависимостей рассчитаны концентрации диоксида азота в дымовых газах при сжигании топлива в горелках с различными способами смешения и разными значениями коэффициента расхода воздуха. Показано, что минимальная концентрация оксидов азота в дымовых газах будет при сжигании топлива в горелках с разомкнутыми факелами и внешним смешением. Получена экстремальная зависимость концентрации оксидов азота в дыме от величины коэффициента расхода воздуха, критическое значение которого, соответствующее максимальной величине концентрации, составляет 1,16…1,17.

The problem of choice of gas-burning devices for heating of industrial furnaces is considered from a position of protecting the environment from emissions of nitrogen oxides contained in the products of combustion. Based on empirical relationships concentration of nitrogen dioxide in the smoke gases from the fuel combustion in burners with various mixing methods and different values of coefficient of discharge of air are calculated. It is shown that a minimum nitrogen oxides concentration in smoke gases from the fuel combustion in burners with open torches and external mixing. It was received extreme dependence of the concentration of nitrogen oxides in the smoke gases from the coefficient of the air flow, the critical value of which corresponding to the maximum value of the concentration is 1,16…1,17.

Выбор системы отопления промышленных печей и котлов определен рядом факторов, среди которых важную роль играет проблема защиты окружающей среды от выбросов вредных веществ, содержащихся в продуктах горения топлива. Наиболее токсичными веществами, содержащимися в продуктах сгорания любого топлива, являются оксиды азота – NO (монооксид) и NO_2 (диоксид), которые наносят ущерб не только здоровью людей, но и окружающей природе. Оценка величины их концентрации в продуктах горения в зависимости от параметров сжигания топлива – один из путей решения экологических проблем при выборе типа и конструкции не только горелочных устройств, но и системы утилизации тепла уходящих продуктов горения.

Существующие методики, позволяющие прогнозировать образование NO_x при различных способах сжигания, основаны на экспериментальных данных, полученных, как правило, при стендовых испытаниях и на практике. Некоторые из них предназначены для оценки вредных выбросов в уходящих газах за котельными агрегатами, отапливаемых преимущественно мазутом, углем и реже – природным газом, причем обычно параметрами предлагаемых расчетных формул являются такие величины, как теплонапряженность топочного объема, производительность котла и характеристики вырабатываемого пара.

Такие методики весьма специфичны и не подходят для оценки величин вредных выбросов, содержащихся в дымовых газах горелок и форсунок, установленных на промышленных печах.

Общее количество оксидов азота NO_x, выбрасываемых в атмосферу, складывается из трех составляющих (быстрых, термических и топливных – при наличии в топливе азота или азотосодержа-

щих компонентов). С учетом доокисления NO до более токсичного NO_2:

$$NO_x = 1{,}53(NO_б + NO_{терм} + NO_{топл}).$$

Количество быстрых оксидов азота ($NO_б$) практически не зависит от условий сжигания и для высококалорийных топлив (природные газы) находится на уровне 70…100 мг/м^3 [1].

Методики оценки (прогноза) величины термических оксидов азота в дыме основаны на публикациях ряда авторов, параметрами расчета являются условия сжигания топлива (способ смешения топлива и воздуха) и показатели тепловой работы печного агрегата [2, 3].

Современные промышленные печи практически все оснащены устройствами утилизации тепла уходящих газов, обеспечивающими экономию топлива на 12…15 %. Однако повышение температуры факела при смешении подогретых компонентов горения неизбежно приводит к росту концентрации оксидов азота в уходящих газах.

Как было показано ранее [3], при сопоставимых условиях наибольшая концентрация оксидов азота в уходящих газах – при сжигании топлива в горелках с полным предварительным смешением топлива и воздуха, стабильно работающих с коэффициентом расхода воздуха n = 1,01…1,03. Минимальная концентрация оксидов - при работе горелок с разомкнутым факелом (ГПП, ГР), что связано со спецификой их конструкции. Сжигание топлива в таких горелках, установленных на термических печах ($T_п$ = 1000 °С), даже при наличии рекуператора для подогрева воздуха горения дает концентрацию оксидов азота в уходящих газах, не превышающую ПДВ.

В ряде случаев предпочтительны горелки с внешним смешением (простота конструкции, относительная дешевизна, необходимость организации факельного сжигания и пр.), работающими с $n \geq 1{,}1…1{,}15$. Значительный расход воздуха (большее количество азота, поступающего в зону горения) приводит к росту концентрации NO_x в дыме, однако при этом снижается калориметрическая температура горения, что, в свою очередь, снижает вероятность образования оксидов азота. Поэтому зависимость функции $NO_x = f(n)$ имеет экстремальный характер. Расчеты показали, что максимальная концентрация соответствует $n_{кр}$ = 1,16…1,17.

Зависимость концентрации NO_x (мг/м^3) в продуктах горения от коэффициента расхода воздуха *n* (калорийность топлива $Q_н^р$ = 35,5 /12,5 МДж/м^3)

n	Холодный воздух		Подогрев воздуха до 350 °С	
	$T_п$ = 1300 °С	$T_п$ = 900 °С	$T_п$ = 1300 °С	$T_п$ = 900 °С
1	260,1/203,03	183,4/173,9	493,1/280,7	257,5/197,1
1,1	283,8/210,8	188,4/175,6	595,2/318,6	284,3/206,4
1,2	262,4/204,4	181,5/173,6	561,0/311,0	270,6/206,4
1,3	235,6/192,1	174,1/170,3	502,5/292,9	250,9/194,5
1,4	216,5/188,9	168,4/167,9	443,1/274,0	232,1/191,8
1,5	200,3/183,1	164,7/163,1	390,7/256,9	216,2/187,0

Полученные расчетные данные подтверждаются экспериментально, критическое значение коэффициента расхода воздуха, соответствующее максимуму NO_x в уходящих газах при сжигании природного газа, угля и мазута, составляет *n* = 1,17 [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сигал И.Я.* Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
2. *Шульц Л.А., Говорова Н.М.* Постадийное сжигание газообразного топлива – основа ресурсосберегающих и экологически совершенных технологий нагрева металла // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1996. – № 5. – С. 66–70.
3. *Герцык С.И., Туктаров Д.Б.* Оценка концентрации оксидов азота в продуктах горения топлива // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – № 5. – С. 3–7.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

М.С. Гречухина, П.К. Кондратенко, А.Ю. Мурзин

Самарский государственный технический университет,
г. Самара, ttxb@inbox.ru

Предложена новая система, основанная на непосредственном преобразовании тяги малогабаритных реактивных двигателей в крутящий момент. Определены показатели эффективности конструкции преоб-

разователя реактивной тяги во вращательное движение и получения электроэнергии.

The following paper proposes a new system based on the direct transformation of a small-size jet engine thrust into torque. The paper determines the performance indices both of the design of the system transforming the jet thrust into rotary motion and the power generation.

Непосредственное преобразование тяги малогабаритных реактивных двигателей в крутящий момент предполагает использование инерционного элемента, представляющего собой тело вращения с установленными на нем реактивными двигателями (рис. 1).

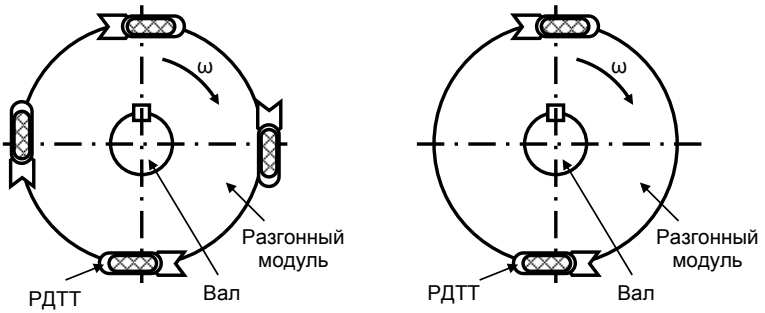


Рис. 1. Примеры расположения РДТТ на разгонном модуле

В качестве системы генерирования энергии, в котором крутящий момент создается непосредственно тягой реактивных двигателей, устанавливаемых на инерционном вращающемся элементе, приведем описание устройства, разработанного в рамках реализации проекта и лишенного указанных недостатков (рис. 2).

В исходном состоянии разгонный модуль имеет предварительно определенную начальную угловую ориентацию и находится в пространстве между шиберами *17* и *18*. Механизм торможения *14* активирован. Шибер *18* закрыт, шибер *17* открыт. В кронштейне крепления ложементов *8* реактивный двигатель отсутствует. Шток пневмотолкателя *12* втянут. Маховик *1* находится в покое.

В данном проекте предлагается использовать в качестве источника энергии малогабаритные твердотопливные реактивные двигатели военного назначения, подвергаемые утилизации. Проведем оценочные расчеты эффективности предлагаемой системы преобразования энергии горения пороха в электроэнергию на основе данных по годовому плану

утилизации маршевых частей РДТТ ручных противотанковых гранатометов РПГ-7. Основным параметром твердого ракетного топлива, определяющим его энергетические характеристики, является теплотворная способность. Для порохов, используемых в зарядах РПГ-7, значение теплотворной способности составляет около 4 МДж/кг. На создание реактивной тяги в наилучшем случае идет 60 % выделяемой при горении пороха энергии. Предположим, что эта энергия без потерь идет на преобразование поступательного движения РДТТ во вращательное движение маховика. Современные электрические машины осуществляют преобразование электрической энергии в механическую с эффективностью 85 %. Таким образом, КПД преобразования энергии порохового заряда в электроэнергию составляет $0{,}85 \cdot 0{,}6 = 0{,}51$. Масса пороховой шашки маршевого двигателя РПГ-7 составляет около 0,5 кг. Годовой план по уничтожению этих изделий составляет около 10 млн штук.

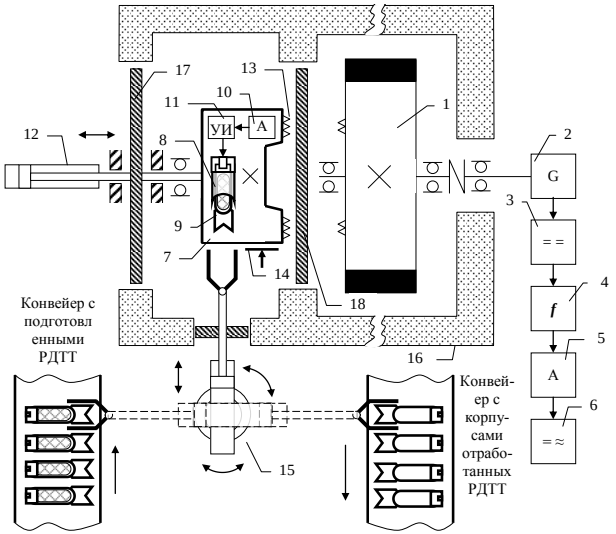


Рис. 2. Схема устройства на основе тяги пороховых двигателей

Определим количество электричества, которое возможно получить при использовании предлагаемого способа. Масса пороха, предполагаемая к сжиганию, составляет

$$10\,000\,000 \cdot 0{,}5 \text{ кг} = 5 \text{ млн кг}.$$

Количество теплоты, выделяющееся при сгорании всех зарядов, равно 4 МДж/кг · 5 млн кг = 20·106 МДж.

Количество получаемой при этом электроэнергии составляет 20 · 106 МДж · 0,51 = 107 МДж.

Это равносильно годовой работе трех электростанций, вырабатывающих 1 МВт электроэнергии.

Эффективность выбранной конструкции газодинамического электрогенератора определяется временем горения твердотопливного двигателя и его тягой, которая является основной движущей силой РДТТ.

Дальнейшие расчеты показывают, что для распространенных дизель-генераторов с номинальной частотой вращения 1500 об/мин необходимо использовать не менее четырех РДТТ.

Оценка эффективности предложенного способа преобразования энергии горения пороховых зарядов и утилизируемых боеприпасов в электроэнергию показывает, что КПД такого преобразования имеет значение около 30 %. Установлено, что для надежной работы системы в момент старта у маховика должна быть ненулевая начальная скорость вращения.

В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что при реализации предлагаемой системы необходимо осуществлять попутную эффективную утилизацию продуктов горения пороха, а также выделяемого при горении тепла, что требует использования мощной системы вентиляции и теплообменников с возможностью дополнительного термоэлектрического преобразования.

В качестве рекомендации к применению описанных систем можно предложить их внедрение на предприятиях, складах и арсеналах для хранения боеприпасов для обеспечения электроэнергией электротехнического оборудования, хозяйственных и бытовых сооружений.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

М.П. Гусев, В.Л. Данилов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, gusev.m.p@yandex.ru

Рассматривается решение обратной задачи ползучести по идентификации параметров уравнения состояния ползучести для сплава Zr1Nb. Идентификация параметров основана на экспериментальных и расчетных исследованиях контактного взаимодействия тепловыделяющего элемента и ячейки дистанционирующей решетки – элементов ТВС.

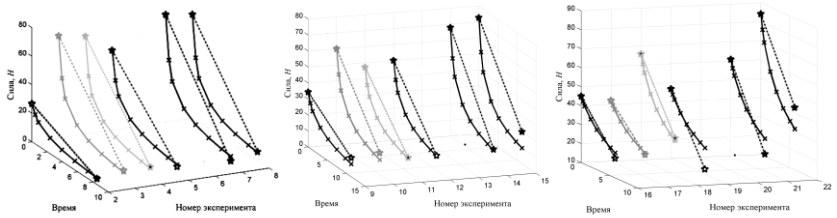
Creep inverse task solution for parameters identification of Zr1Nb alloy creep law is considered. Identification of creep law is obtained by the numerical and experimental investigations of contact interaction between fuel rod and spacer grid sell – elements of fuel assembly.

Циркониевый сплав Zr1Nb широко применяется в качестве конструкционного материала для элементов тепловыделяющей сборки (ТВС) реакторной установки [1]. В серийной ТВС-2М из сплава Zr1Nb выполнены тепловыделяющие элементы (твэлы) и дистанционирующие решетки (ДР) – основные элементы сборки. Обоснование прочности и надежности элементов активной зоны реакторной установки (РУ) требует выполнения расчетов элементов конструкции ТВС, в основе которых лежит закон ползучести, связывающий интенсивность скорости деформаций ползучести ξ_e^c температуру T и интенсивность напряжений σ_e.

$$\xi_e^c = A\sigma_e^n \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \tag{1}$$

Обзор литературных источников [2] показывает, что нет определенности в выборе значения коэффициентов A, n и B в законе ползучести (1). Расчеты элементов активной зоны, выполненные автором с использованием известных коэффициентов в законе ползучести, привели к неудовлетворительным результатам, что свидетельствует об отсут-

ствии достоверной базы знаний для циркониевого сплава Zr1Nb. Для верификации коэффициентов в законе ползучести были проведены расчетные и экспериментальные исследования по релаксации контактного взаимодействия между тепловыделяющим элементом и ячейкой дистанционирующей решетки, результаты которых представлены на рисунке.



Результаты экспериментальных и расчетных исследований релаксации контактного взаимодействия между твэлом и ячейкой дистанционирующей решетки

Прямыми линиями на графиках (рисунок) соединены две экспериментальные точки: исходная контактная сила и контактная сила после релаксации; плавными линиями представлены расчеты релаксации контактной силы. О качестве расчета релаксации судят по разнице между расчетными и экспериментальными контактными силами после релаксации.

Идентификация параметров в законе ползучести (1) была выполнена на основе метода многокритериальной оптимизации с использованием анализа чувствительности [3]. В основе метода лежат следующие соотношения.

1. Элементы матрицы чувствительности $[S]$ определяются соотношением

$$s_{ij} = \frac{R_i^p\left(P_j + \Delta P_j\right) - R_i^p\left(P_j\right)}{\Delta P_j},$$

где R_i^p – отклики или контактные силы релаксации, P_j – параметры в законе ползучести (1), при которых определяются отклики R_i^p, $j = 1...3$.

2. Расчет оптимальных параметров $\{P_i\}$ выполняется посредством итерационной процедуры

$$\{P_i\} = \{P_{i-1}\} + [S]^{\dagger}\left(\{R_i^p\} - \{R_{\text{эксп}}^p\}\right), \quad [S]^{\dagger} = \left([S]^T [S]\right)^{-1} [S]^T .$$

В результате расчета были получены численные значения оптимальных параметров в законе ползучести (1): $A = 1{,}3739 \cdot 10^{-14}$; $n = 2{,}386$; $B = 1{,}3 \cdot 10^4$.

Хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными по релаксации контактного взаимодействия позволяет использовать определенные оптимальные коэффициенты для термопрочностных расчетов элементов активной зоны РУ, изготовленных из сплава Zr1Nb.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-3170814_мол_а

ЛИТЕРАТУРА

1. *Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В.* Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 118 с.

2. *Пузанов Д.Н., Сатин А.А.* Анализ и обобщение данных по свойствам циркониевых сплавов, применяющихся в качестве конструкционных материалов [Электронный ресурс] // Научно-техническая конференция молодых специалистов: материалы конф. ОКБ «Гидропресс», 16–17 марта 2011 г. – URL: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf (дата обращения: 20.05.2014).

3. *Imregun M., Visser W.J.* A Review of model updating techniques // Shock and Vibration Digest. – 1991. – Vo1. 23, iss. l. – P. 9–20.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА И ФЛЮИДА В АНИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТАХ

Д.О. Диль, Е.А. Тарасов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, gradpower@list.ru

На основе механики многокомпонентных и многофазных сред и с использованием обобщенного закона Дарси строится модель двухфазной фильтрации в среде с анизотропным по проницаемости слоем. Численное решение проводится с применением методов конечных объемов. Решена плоская задача о вытеснении газовой смеси жидкой взвесью угольных частиц в воде.

The model of a two-phase filtration in the medium with a nonisotropic layer on permeability on a basis of mechanics of multicomponent and multiphase mediums and with use of generalised Darcy's law is constructed. The numerical decision with application of methods of finite-volumes method is carried out. The plane problem about displacement of a gas mixture by a liquid suspension of carbonic parts in water is solved.

При завершении выработок в шахтах продолжает выделяться и скапливаться метан. Со временем его концентрация в объеме становится критической и возникает взрывоопасная ситуация, которая разрешается затоплением шахт. При этом неизвестным остается характер продвижения метана по угольному пласту. Такая задача может быть решена только численными методами. Ее реализация требует вычислительных технологий, работающих на неравномерных сетках, а также наличия анизотропии по проницаемости.

В настоящей работе проведено исследование эффективности одной из противопоточных схем, используемых для моделирования конвективного переноса. Построенная схема была применена для переноса концентрации компонентов газовой смеси в случае вытеснения флюида и одного газового компонента другим из анизотропной по проницаемости среды.

Представленная в работе модель процесса двухфазной фильтрации смеси газов и флюида основана на законах сохранения массы и имеет следующий вид:

$$\frac{\partial c^i m(1-s)}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\frac{K k_r^g(s)}{\mu^i} c^i \vec{\nabla} p^g \right) = q^i \ , \ \ i = \overline{1, nc} \, ,$$

$$\frac{\partial \rho^f ms}{\partial t} - div\left(\frac{Kk_r^f(s)}{\mu^f}\rho^f\left(\vec{\nabla}\left(p^g - p^c(s)\right) - \rho^f \vec{g}\right)\right) = q^f \ .$$

Здесь c^i, μ^i – концентрация и динамическая вязкость i-го компонента газовой смеси; m – пористость среды; s – влагонасыщенность; K – тензор проницаемости среды; k_r^g – относительная проницаемость газовой смеси; k_r^f – относительная проницаемость флюида; p^g – давление газовой смеси; nc – количество компонентов смеси; ρ^f, μ^f – плотность и вязкость флюида; q^i, q^f – соответствующие источниковые члены. Зависимость относительных проницаемостей для каждой из фаз, а также капиллярного давления от влагонасыщенности определяется с помощью замыкающих соотношений Ван Генухтена – Муалема [1, 4].

В рассматриваемой задаче используется уравнение состояния идеального газа для двухкомпонентной газовой смеси. В случае более высоких давлений оно может быть легко заменено на уравнение состояния реальной смеси газов, учитывающее компонентный состав этой смеси.

Рассматривается модельная двумерная область с непроницаемыми стенками, входом и выходом на которых задаются граничные условия Дирихле для искомых величин. На стенках задаются условия непротекания.

Для построения дискретных аналогов исходных уравнений в частных производных используется метод конечных объемов с нелинейной двухточечной аппроксимацией потоков на гранях объемов [2, 5], позволяющей учесть анизотропию пространства по проницаемости, а также обобщить численную методику на нерегулярные сетки. Основные неизвестные переменные считаются в центрах конечных объемов. Отличие нелинейной аппроксимации от стандартной линейной заключается в вычислении коэффициентов, которые в случае нелинейной схемы содержат в себе взвешенные вклады значений неизвестных в соседних объемах.

Для аппроксимации значений концентраций на гранях конечных объемов при конвективном переносе использовалась схема с локальными ограничениями градиентов на каждом конечном объеме. Градиент концентрации, вычисленный на одной грани, ограничивается таким образом, чтобы значения, полученные интерполяцией с его помощью на остальные грани, не превышали значений, полученных интерполяцией с помощью градиентов, вычисленных на этих гранях.

Итоговые дискретные уравнения линеаризуются с помощью метода Ньютона. Получающаяся разреженная матрица решается методом

блочной верхней релаксации. Для контроля вычислений на каждом шаге по времени проверяются балансовые соотношения между флюидом и газами, поступающими, выходящими и содержащимися в рассматриваемой области.

В результате расчетов получены распределения концентрации для различных моментов времени. В анизотропной области наблюдается характерное ускорение течения и изменение его направления. При этом отсутствуют нехарактерные флуктуации, которые могли быть обусловлены возможной несовместимостью двух схем: нелинейной схемы для вычисления потоков на гранях объемов и схемы типа MUSCL [3, 6] для вычисления концентраций. Вблизи входа в изначально незаводненную область наблюдается резкое увеличение концентрации за счет вытеснения флюида газом и более высокого давления газовой смеси.

Результаты численного эксперимента позволяют сделать вывод о применимости исследуемой схемы для случаев двухфазного течения флюида и смеси газов в анизотропной по проницаемости среде и рекомендовать ее для подобных расчетов. Однако следует заметить, что при увеличении размеров конечных объемов на достоверность результатов может оказывать существенное влияние численная диффузия. Это необходимо учитывать для большинства схем, используемых в методе конечного объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jamshidi M., Jessen K.* Water production in enhanced coalbed methane operations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – Vol. 92–93. – P. 56–64.

2. *Thararoop P., Karpyn Z. T., Ertekin T.* Development of a multi-mechanistic, dual-porosity, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2012. – Vol. 8. – P. 121–131.

3. *Hubbard M.E.* Multidimensional slope limiters for MUSCL-type finite volume schemes on unstructured grids // Journal of Computational Physics. – 1999. – Vol. 155, iss. 1. – P. 54–74.

4. *Van Genuchten M.Th.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Science Society of America Journal. – 1980. – Vol. 44, iss. 5. – P. 892–898.

5. *Никитин К.Д.* Метод конечных объемов для задачи конвекции-диффузии и моделей двухфазных течений: дис. … канд. физ.-мат. наук. – М., 2010. – 105 с.

6. *Saad Y.* Iterative Methods for Sparse Linear Systems. Ch. 3. – 2nd ed., Philadelphia: SIAM, 2003. – 528 p.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧИ С УЧЕТОМ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА ОТОПЛЕНИЯ

Г.М. Дружинин, Ю.А. Самойлович, Е.В. Попов

Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, vniimt.popov@yandex.ru

В статье представлена методика расчета нагрева металла в термической печи с учетом импульсной системы отопления. Представлены опытные данные, полученные на толкательной печи со скоростными рекуперативными горелками и импульсной системой регулирования расхода топлива.

The method of calculation of heating of metal in the thermal furnace taking into account pulse system of heating is presented in article. The experience data obtained on the pusher furnace with high-speed recuperative torches and pulse system of regulation of fuel consumption are submitted.

Современное состояние вычислительной техники и средств математического обеспечения позволяет получать достаточно точную и обширную информацию о различных тепловых процессах, сокращает сроки и затраты на разработку рациональных тепловых режимов. В свою очередь, имеет место сложность расчетов нагрева металла в печах с импульсной системой отопления. Это связано с тем, что заложенные в основу многих математических моделей условия лучистого теплообмена о постоянстве температуры во всем рассматриваемом объеме (печи, зоны) не отражают конкретную ситуацию, в частности на начальном участке нагрева. Вместе с тем рассмотрение объектов данного типа с точки зрения излучающей системы с большим числом источников излучения и лучевоспринимающих поверхностей приведет к тому, что такая инженерная методика расчета приобретет нежелательную громоздкость и потеряет оперативность.

Известны работы С.Н. Шорина [1, 2], в которых перенос энергии излучения в газовом пространстве описан на основе скорректированного уравнения теплопроводности без использования гипотезы о постоянстве температуры газа в исследуемых объемах (пространствах). Данный подход позволяет учесть и эффект импульсного сжигания топлива, при котором температура греющих газов на выходе из горелочных устройств может быть представлена в виде функции незатухающих колебаний.

Математическая формулировка задачи теплообмена в проходной печи базируется на рассмотрении теплового взаимодействия системы трех тел – нагреваемого металла, греющих газов и футеровки свода, пода и стен нагревательной печи.

Процессы переноса тепловой энергии в газовой фазе, стенках печи и в нагреваемых заготовках могут быть описаны системой единообразных дифференциальных уравнений параболического типа, различающихся физическими свойствами среды, осуществляющей процесс переноса [3, 4].

В качестве объекта исследования принята толкательная печь для нагрева рельсовых накладок на Нижнесалдинском металлургическом заводе (филиале ОАО «ЕВРАЗ НТМК» НСМЗ). Печь разделена на четыре зоны управления. Первая, вторая и третья зоны являются основными зонами двухстороннего нагрева металла, четвертая зона служит для выравнивания температуры по длине и толщине заготовок. На рис. 1 представлена схема рельсовой накладки типа Р65, нагреваемой в печи.

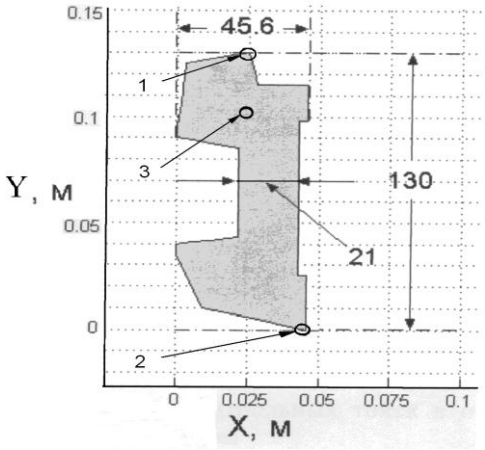


Рис. 1. Схема рельсовой накладки типа Р65 и расположение контрольных точек в ее поперечном сечении

Результаты решения задачи теплопроводности с учетом вышеуказанной концепции, при которой температура греющих газов на выходе из горелочных устройств может быть представлена в виде функции незатухающих колебаний, приведены на рис. 2 для двух значений начальной температуры продуктов сгорания: 880 °С и 500 °С.

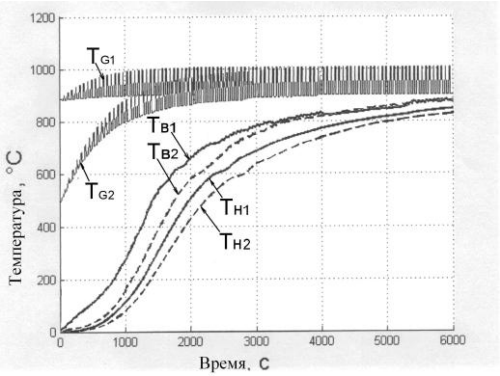


Рис. 2. Изменение во времени температуры греющих газов (T_G) и температур на верхней ($T_в$) и нижней ($T_н$) поверхностях рельсовой накладки при различных значениях начальной температуры греющих газов:

$T_{G1} = 880$ °С, $T_{G2} = 500$ °С

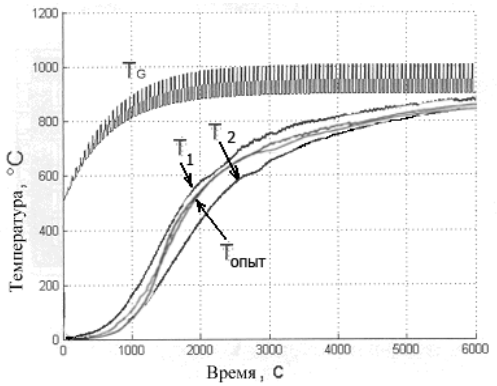


Рис. 3. Результаты расчета нагрева заготовки с учетом эффекта импульсного регулирования расхода топлива при начальной температуре продуктов сгорания $T_G = 500$ °С:

T_1 – температура верхней поверхности заготовки, T_2 – температура нижней поверхности заготовки, $T_{опыт}$ – температура заготовки по опытным данным

Из рассмотрения представленных графиков следует, что снижение начальной температуры греющей среды от 880 до 500 °С приводит к замедлению прогрева рельсовой накладки. Анализируя экспериментальные данные по нагреву заготовки (рис. 3), можно сделать заключение о том, что повышение температуры металла от 30 до 400 °С осуществляется за 1500 с, чему соответствует расчетный режим нагрева заготовки при задании температуры продуктов сгорания на входе в печь 500 °С.

Использование приема, при котором температура греющих газов на выходе из горелочных устройств представлена в виде функции незатухающих колебаний, позволяет повысить точность и адекватность расчетов нагрева металла со скоростными рекуперативными горелками и импульсной системой регулирования расхода топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шорин С.Н.* Теплопередача. – М.; Л.: ГИЗЛСА, 1952. – 340 с.
2. *Шорин С.Н.* Теплоперенос. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.
3. *Беннетт К.О., Майерс Д.Е.* Гидродинамика, теплообмен и массообмен. – М., 1966. – 726 с.
4. *Дзюзер В.Я., Швыдкий В.С.* Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / под ред. В.Я. Дзюзера. – М.: Теплотехник, 2009. – 340 с.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ПЛАСТИНЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВО ВРЕМЕНИ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ

А.В. Еремин, Е.В. Стефанюк, Л.С. Абишева

Самарский государственный технический университет, г. Самара, totig@yandex.ru

На основе введения фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий получено приближенное аналитическое решение задачи теплопроводности для бесконечной пластины с переменными во времени источниками теплоты.

Using the concept of temperature perturbation front there was an approximate analytical solution of a heat conduction problem for an endless plate with time-varying heat sources received.

Математическая постановка задачи имеет вид

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\omega(\tau)}{c\rho}, \quad (\tau > 0, \quad 0 < x < \delta), \tag{1}$$

$$T(x,0) = T_0, \tag{2}$$

$$\partial T(\delta,\tau)/\partial x = 0, \tag{3}$$

$$\lambda\,\partial T(0,\tau)/\partial x - \alpha[T(0,\tau) - T_{\text{ср}}] = 0, \tag{4}$$

где T – температура; x – координата; τ – время; a, λ, α – коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, теплоотдачи; $\omega(\tau) = \omega_0(1+\beta\tau)$ – мощность источников теплоты; $\beta = \text{const}$; ρ – плотность; T_0 – начальная температура; $T_{\text{ср}}$ – температура среды; δ – толщина пластины.

В настоящей работе получено приближенное аналитическое решение задачи (1) – (4), основанное на определении фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий [1].

Введем следующие безразмерные переменные:

$$\Theta = (T - T_0)/(T_{\text{ср}} - T_0), \quad \text{Bi} = \alpha\delta/\lambda, \quad \text{Fo} = a\tau/\delta^2,$$

$$\xi = x/\delta, \quad \text{Po} = \beta\delta^2\text{Po}_1/a, \quad \text{Po}_1 = \omega_0\delta^2/[ac\rho(T_{\text{ср}} - T_0)].$$

Процесс теплообмена разделим на две стадии по времени $0 \le \text{Fo} \le \text{Fo}_1$ и $\text{Fo}_1 \le \text{Fo} < \infty$. Для этого введем движущуюся во времени границу $q_1(\text{Fo})$. Первая стадия заканчивается при достижении подвижной границей координаты $\xi = 1$.

Во второй стадии изменение температуры происходит по всей толщине пластины $0 \le \xi \le 1$ и в рассмотрение вводится функция $q_2(\text{Fo}) = \Theta(1,\text{Fo})$.

Математическая постановка задачи для первой стадии процесса имеет вид

$$\frac{\partial\Theta(\xi,\text{Fo})}{\partial\text{Fo}} = \frac{\partial^2\Theta(\xi,\text{Fo})}{\partial\xi^2} + \text{PoFo} + \text{Po}_1, \quad (0 \le \xi \le q_1(\text{Fo})), \tag{5}$$

$$\partial\Theta(0,\mathrm{Fo})/\partial\xi - \mathrm{Bi}[\Theta(0,\mathrm{Fo})-1]=0, \tag{6}$$

$$\Theta(q_1,\mathrm{Fo})=Q(\mathrm{Fo}), \tag{7}$$

$$\partial\Theta(q_1,\mathrm{Fo})/\partial\xi=0, \tag{8}$$

где $Q(\mathrm{Fo})=\int\limits_0^{\mathrm{Fo}}(\mathrm{PoFo}+\mathrm{Po}_1)d\,\mathrm{Fo}=0{,}5\mathrm{PoFo}^2+\mathrm{Po}_1\mathrm{Fo}.$

Решение задачи (5) – (8) разыскивается в виде

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=\sum_{k=0}^{n}a_k(q_1(\mathrm{Fo}))\xi^k, \tag{9}$$

где a_k – коэффициенты, определяемые из (6) − (8).

Составим невязку уравнения (5) и проинтегрируем ее в пределах толщины термического слоя

$$\int\limits_0^{q_1}\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}}d\xi=\int\limits_0^{q_1}\left(\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2}+\mathrm{PoFo}+\mathrm{Po}_1\right)d\xi. \tag{10}$$

Из (10) относительно $q_1(\mathrm{Fo})$ получаем нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение с начальным условием $q_1(0)=0$. Его решение, например, при $\mathrm{Bi}=10^4$, $\mathrm{Po}=0$, $\mathrm{Po}_1=50$ имеет вид [1] $q_1(\mathrm{Fo})=2{,}048\,\mathrm{Fo}^{0{,}5489}$.

Подставляя $q_1(\mathrm{Fo})$ в (9), получим решение задачи (5)–(8) в первом приближении. Для нахождения решения в последующих приближениях используются дополнительные граничные условия [1].

Математическая постановка задачи для второй стадии процесса включает уравнение (5) $(0\le\xi\le1)$, а также следующие граничные условия:

$$\partial\Theta(0,\mathrm{Fo})/\partial\xi - \mathrm{Bi}[\Theta(0,\mathrm{Fo})-1]=0, \tag{11}$$

$$\Theta(1,\mathrm{Fo})=q_2(\mathrm{Fo}), \tag{12}$$

$$\partial\Theta(1,\mathrm{Fo})/\partial\xi = 0. \qquad (13)$$

Решение задачи (5), (11) – (13) принимается в виде

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = \sum_{k=0}^{n} b_k(q_2(\mathrm{Fo}))\xi^k, \qquad (14)$$

где b_k – коэффициенты, определяемые из (11) – (13).

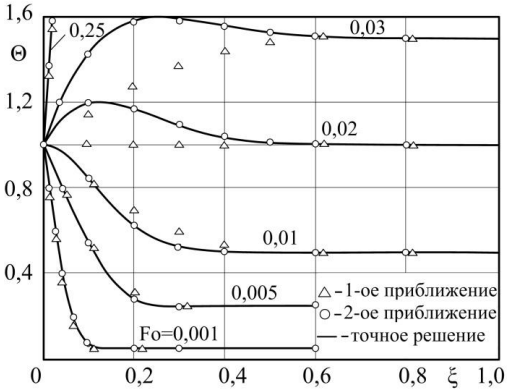
Осредняя уравнение (5) по всей ширине пластины, получаем интеграл теплового баланса вида

$$\int_0^1 \frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}} d\xi = \int_0^1 \left(\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2} + \mathrm{Po}\mathrm{Fo} + \mathrm{Po}_1 \right) d\xi. \qquad (15)$$

Подставляя (14) в (15), относительно $q_2(\mathrm{Fo})$ получим обыкновенное дифференциальное уравнение, решение которого при $\mathrm{Bi} = 10^4$, $\mathrm{Po} = 0$, $\mathrm{Po}_1 = 50$ имеет вид

$$q_2(\mathrm{Fo}) = -5\cdot 10^{-5} e^{-2{,}997\mathrm{Fo}+13{,}238} + 26. \qquad (16)$$

Результаты расчетов безразмерной температуры по формулам (9), (14) в сравнении с точным решением [2] представлены на рисунке.



Распределение безразмерной температуры

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кудинов В.А., Кудинов И.В.* Методы решения параболических и гиперболических уравнений теплопроводности. – М.: Либроком, 2011. – 280 с.
2. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания СамГТУ (код проекта 1273).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОТУРБИННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ФРЕОНОВЫХ СТУПЕНЕЙ

Л.Ф. Ибрагимова, О.К. Григорьева

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, lia_ibragimova@mail.ru

Разработана методика расчета термодинамических параметров и расходных характеристик паротурбиных установок с фреоновой ступенью.

The method of calculation of thermodynamic parameters and metering characteristic of turbine plant with freon phase is developed.

Повышение выработки тепловой и электрической энергии при тех же топливных затратах на предприятиях теплоэнергетического комплекса является актуальной проблемой на современном этапе. Эта потребность стимулирует развитие новых энерготехнологий, позволяющих повысить эффективность по сравнению с традиционными энергоблоками.

Применение низкокипящих рабочих тел в фреоновых ступенях паротурбинных установок (ПТУ) позволяет создавать более эффективные циклы за счет использования процессов конденсации при температуре ниже 273 К.

В статье рассматривается перспектива создания паротурбинной установки с фреоновой технологией. Принципиальная тепловая схема предлагаемой к исследованию установки показана на рис. 1 [3]. Отработанный водяной пар после паровой турбины поступает в испаритель, где конденсируется за счет поступающего в испаритель фреона.

Фреоновый пар после испарителя поступает на фреоновую турбину, отработанный фреон направляется в трубчатый конденсатор, установленный в сухой вентиляторной градирне, в которую подается атмосферный воздух. Далее сконденсировавшийся фреон подается насосом в испаритель, тем самым образовывая замкнутый фреоновый контур.

Паровая турбина и парофреоновая турбина устанавливаются на одном валу, с одним электрогенератором, мощность которого равна суммарной мощности ПТУ и парофреоновой турбины.

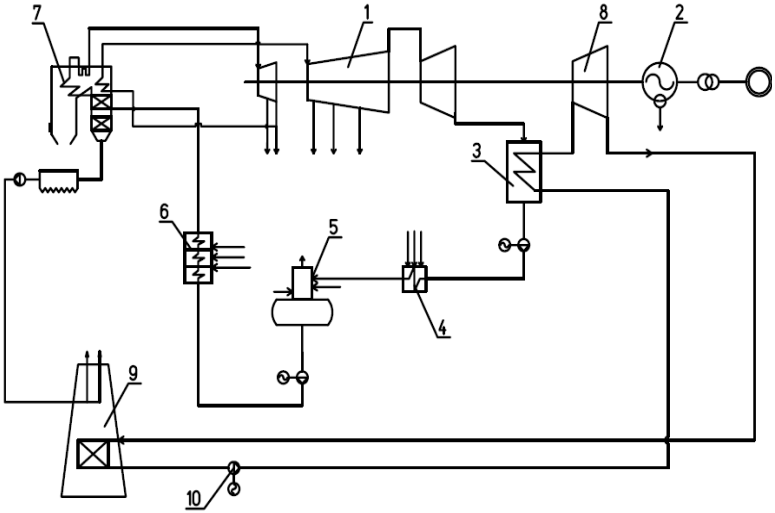


Рис. 1. Принципиальная схема паротурбинного энергоблока с фреоновой ступенью:

1 – паровая турбина; *2* – электрический генератор; *3* – испаритель; *4* – подогреватель низкого давления; *5* – деаэратор; *6* – подогреватель высокого давления; *7* – котел; *8* – фреоновая турбина; *9* – сухая вентиляторная градирня; *10* – насос

Рабочим телом фреоновой ступени был выбран один из самых экологически безопасных хладагентов фреон R-134a.

Зависимость расхода фреонового пара от мощности паротурбинного энергоблока представлена на рис. 2. В качестве стандартной фреоновой турбины ($N_ф$ = const) принимается турбина мощностью 80 МВт.

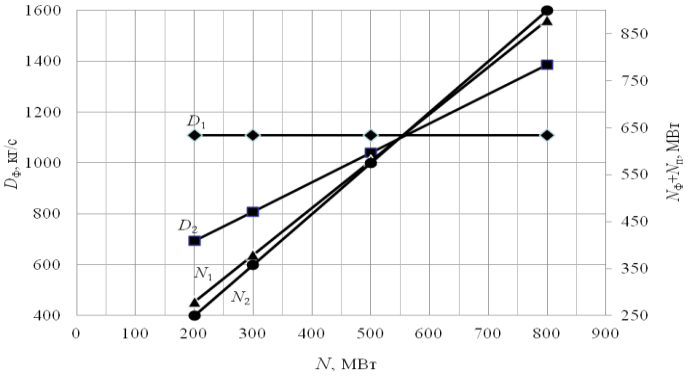


Рис. 2. График зависимости расхода фреонового пара от мощности паротурбинного энергоблока:

D_1, N_1 – расход фреонового пара и мощность ПТУ и фреоновой ступени при $N_ф$ = const соответственно; D_2, N_2 – расход фреонового пара и мощность ПТУ и фреоновой ступени при $N_ф$ = var соответственно

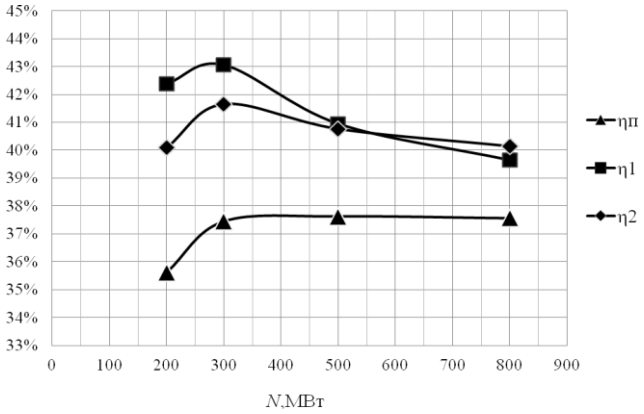


Рис. 3. График зависимостей КПД от мощности паротурбинного энергоблока:

$\eta_п$ – КПД традиционного паротурбинного энергоблока; η_1 – КПД паротурбинного энергоблока с фреоновой ступенью при $N_ф$ = const; η_2 – КПД паротурбинного энергоблока с фреоновой ступенью при $N_ф$ = var

Представленный на рис. 3 КПД паротурбинного энергоблока с фреоновой ступенью рассчитывался по формуле

$$\eta = \frac{(N_{\text{п}} + N_{\text{ф}})}{BQ_i^r},$$

где $N_{\text{п}}$ – мощность паротурбинной части, МВт; $N_{\text{ф}}$ – мощность фреоновой ступени, МВт; B – расход топлива, кг у.т/ч; Q_i^r – теплота сгорания условного топлива, кДж/кг.

Предлагаемая технология является перспективной и может быть внедрена на традиционных энергоблоках. Схема дает возможность при неизменном расходе топлива значительно увеличить выработку электроэнергии и, соответственно, повысить КПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алтунин В.В.* Метод составления уравнения состояния реального газа по ограниченному количеству исходных опытных данных // Теплоэнергетика. – 1962. – № 3. – С. 72–78.

2. *Алтунин В.В.* Метод расчета термодинамических свойств смесей реальных газов по ограниченному количеству исходных опытных данных // Теплоэнергетика. – 1963. – № 4. – С. 78–84.

3. *Ноздренко Г.В., Григорьева О.К., Ибрагимова Л.Ф.* Теплоэнергетическая установка: свидетельство о государственной регистрации полезной модели теплоэнергетической установки № 2014117393/06 (027529) от 29 апреля 2014 г.

УТОЧНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТА НА ФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОСРЕДСТВОМ ТРАССЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.А. Ковалев, А.А. Кожемякин, В.В. Коновалов

Самарский государственный технический университет,
г. Самара, renigm.samgtu@gmail.com

Представлены опытные работы по уточнению энергетического состояния нефтяного пласта с применением фильтрационной модели и интегрированием в нее результатов трассерных исследований. Результаты выполненного анализа использовались для оптимизации

энергетического поля залежи путем совершенствования существующей системы разработки.

An experience of identifying energy state of an oil reservoir using reservoir simulation model with tracer tracking results was presented. The results of the analysis were used to optimize energy field of reservoir by improving existing system development.

В настоящее время при формировании энергетического поля продуктивного пласта в процессе разработки месторождений углеводородов (УВ) преобладающим методом воздействия является организация системы поддержания пластового давления (ППД) путем закачки воды в пласт. Оптимальное формирование энергетической характеристики разрабатываемого пласта оказывает существенное влияние на полноту извлечения УВ и, как следствие, улучшение экономических показателей проекта. Важную роль в оценке энергетического состояния пластовой системы играет достоверность информации о неоднородности геологического строения и свойствах пород-коллекторов, о величине запасов УВ и механизме их вытеснения. Достоверность исходных и поступающих в процессе разработки данных об энергетическом состоянии залежи особенно актуальна при разработке сложнопостроенных коллекторов. Для этих целей наряду с традиционными гидродинамическими и другими методами контроля применяют индикаторные исследования, основанные на использовании трассеров для изучения кинематики фильтрационных потоков в межскважинном пространстве и обнаружения зон с низким фильтрационным сопротивлением (НФС). Качественную (выявление направления реальных путей фильтрации пластовых флюидов) и количественную (проницаемость, производительность, степень неоднородности, скорость фильтрации) информацию, полученную по результатам трассерных исследований, необходимо использовать для совершенствования системы разработки и оптимизации программы ГТМ на месторождениях.

В этой связи в настоящей работе представлены результаты уточнения фильтрационной модели пласта и последующая оптимизация системы ППД при разработке продуктивного пласта одного из нефтяных месторождений.

Объектом исследований является залежь продуктивного пласта Y, породы-коллекторы которого представлены известняками. На момент написания данной статьи на пласт было пробурено 11 скважин.

Добыча началась в 2000 году. По мере увеличения добычи нефти из пласта наблюдается снижение давления, поэтому для его восстановления было принято решение о формировании системы ППД для закачки воды в 2008 году. Однако по достижении компенсации отбора пластовой жидкости закачкой в 100 и более процентов давление в залежи не восстановилось до начального значения. Это послужило основанием для проведения дополнительных исследований по установлению истинных путей фильтрации пластовых флюидов, выявлению областей непродуктивной закачки воды и для оценки эффективности системы ППД в целом.

Для решения задачи по выявлению реальных путей фильтрации закачиваемой воды в течение трех лет (2009–2011 гг.) было выполнено пять исследований по закачке трассеров в пласт. Пять различных типов индикаторов закачивались в нагнетательные скважины с регистрацией концентрации реагента в добывающих скважинах. В результате были установлены зависимости скорости продвижения закачиваемой воды между нагнетательными и добывающими скважинами и выявлены каналы НФС [1]. Получена количественная оценка фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов, оценена степень влияния нагнетаемой воды на обводненность добывающего фонда скважин и проанализирована эффективность существующей системы ППД.

Результаты индикаторных исследований были интегрированы в трехмерную фильтрационную модель. Воспроизведение фактических результатов трассерных исследований позволило уточнить модель и решить следующие задачи: улучшить адаптацию динамики заводнения объекта, пластового и забойного давлений, определить источник появления воды в добываемой продукции скважин (вода закачки и/или вода из законтурной области), оценить эффективность ППД и получить актуализированное представление об энергетическом состоянии пластовой системы. На основе существующей конечно-разностной сеточной садаптированной фильтрационной модели далее была создана модель линий тока. Использование модели линий тока позволило количественно оценить эффективность системы заводнения (визуальное отслеживание потоков, количественное распределение объемов закачки по реагирующим добывающим скважинам, расчет эффективности нагнетательного фонда).

Анализ выполненных промысловых исследований и фактическая динамика добычи по скважинам позволили сделать вывод о снижении эффективности реализуемой системы ППД, значительный объем зака-

чиваемой в пласт воды практически сразу поступает к забоям добывающих скважин, а часть закачиваемой в пласт воды уходит в законтурную область и не совершает полезную работу по формированию эффективного энергетического поля в залежи. Выполненный анализ указывал на необходимость оптимизации энергетического состояния пласта путем регулирования процесса заводнения объекта.

Улучшенное поведение модели пласта и полученное представление о фильтрационных процессах позволило оптимизировать систему ППД. В результате были рассчитаны многочисленные варианты дальнейшей разработки залежи, в основе которых определялось местоположение предлагаемой к бурению дополнительной нагнетательной скважины и перераспределение объемов нагнетаемой в пласт воды между существующими нагнетательными скважинами. Относительно существующей системы разработки наиболее эффективным из выполненных расчетов оказался вариант бурения нагнетательной скважины в северной части залежи с сохранением суммарных объемов закачиваемой воды и отключением действующей нагнетательной скважины 4 бис.

Таким образом, уточнение фильтрационной модели с применением индикаторных исследований позволило повысить информативность представлений о геологическом строении залежи, оценить энергетическое состояние пластовой системы, оптимизировать систему ППД и сформировать планы по дальнейшей разработке залежи. В настоящее время компания проводит работы по улучшению ситуации на основании выполненных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчеты «Результаты проведения индикаторных исследований на пласте Y месторождения А». – Самара, 2009–2011.

МНОГОФАКТОРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ГАЗА НАСЕЛЕНИЕМ

П.А. Кулаков[1], А.Ф. Кулакова[2]

[1] *Филиал Уфимского государственного авиационного университета в г. Стерлитамаке, г. Стерлитамак, Россия, petr20071@mail.ru*

[2] *ООО «Газпром межрегионгаз Уфа», филиал в г. Стерлитамаке*

Многофакторное прогнозирование потребления газа населением. Выявлены основные факторы, влияющие на потребление газа, удалены взаимозависимые и построена математическая модель и составлен прогноз потребления газа от нескольких факторов.

This paper deals with multifactorial prediction of gas consumption by the population. The main factors influencing gas consumption were identified, the interdependent ones among them were excluded, a mathematical model was designed, and gas consumption forecasts based on several factors were presented.

В рамках проектирования единой информационной системы газосбытовой организации появилась проблема прогнозирования потребления газа. На основе данных по потреблению за 2006–2011 годы с использованием метода скользящего среднего по 12 месяцам были рассчитаны сезонные индексы (рис. 1) и линия тренда [1].

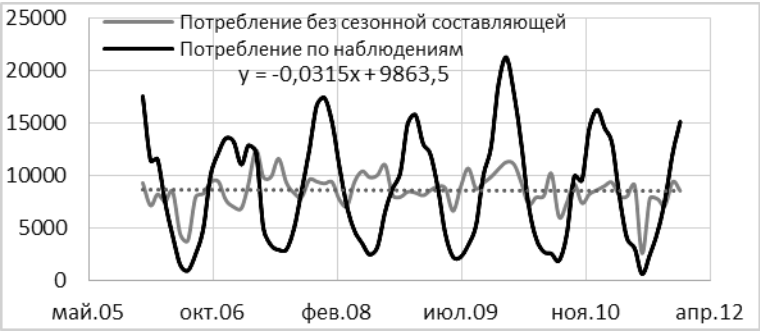


Рис. 1. Потребление газа по наблюдениям и без учета сезонной составляющей

Далее построили прогноз («Прогноз 1» рис. 2) на 2012–2013 годы и сравнили с фактическими значениями.

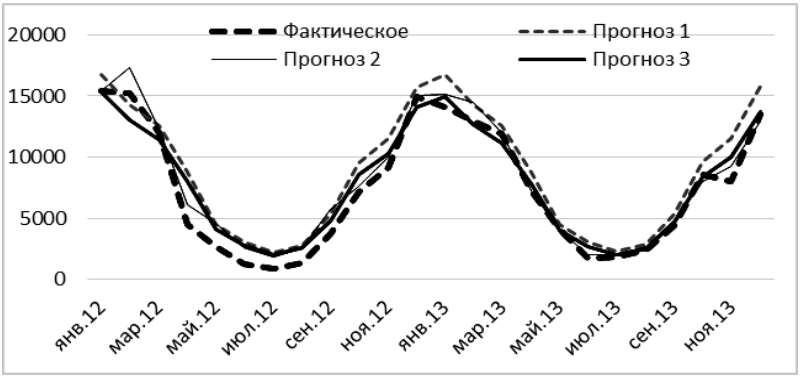


Рис. 2. Потребление газа за 2012 и 2013 годы: прогноз и фактическое

Анализ информационных данных показывает, что погрешность составляет от 10…15 % в зимние месяцы до 100 % в летние месяцы.

Из рис. 2 видим снижение объема потребления газа в летние месяцы, не связанное с температурой. Можно предположить, что основополагающим фактором является массовая установка счетчиков в многоквартирных домах и частном секторе в связи с вступлением в силу Федерального закона от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ, а также метеорологические условия, социально-экономические и технические решения: рост цен на газ, инфляции, рост зарплат [2, 3, 4]. Для определения степени их взаимозависимости и взаимовлияния найдены коэффициенты корреляции (таблица).

В результате исключения взаимозависимости остаются два параметра: среднемесячная температура и цена на газ.

Регрессионный анализ

Факторы	Потребление населением	Среднемесячная температура	Цена	Инфляция	Зарплата
Потребление населением	1				
Среднемесячная температура	–0,954	1			
Цена	–0,0956	0,065	1		
Инфляция	–0,061	0,041	0,977	1	
Зарплата	–0,070	0,080	0,870	0,898	1

Далее проводим дисперсионный анализ (достаточно просто в любом статистическом пакете или в Excel), чтобы найти коэффициенты в уравнении (1):

$$Q = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2, \quad (1)$$

где Q – потребление газа; x_1 – коэффициент зависимости от температуры; x_2 – коэффициент зависимости от цены.

В результате получили следующие коэффициенты:

$$Q = 10991{,}0 - 387{,}4\, a_1 - 216{,}6\, a_2. \quad (2)$$

Зная прогноз погоды на последующие месяцы, а также сроки и суммы повышения цены, можно построить достаточно точный прогноз потребления («Прогноз 2» на рис. 2). Погрешность составляет менее 5…10 % на всем промежутке времени, кроме лета 2012 года с аномально малым потреблением за последние 8 лет. Недостатком является необходимость точного прогноза на месяцы вперед.

Поскольку среднемесячная температура и цена на газ взаимонезависимые факторы, то принято решение выделить влияние каждого фактора. Для этого представили потребление в следующем виде

$$Q = ((k_1 + \alpha_1 t)C_{ti}) + Q_2 + mQ_2((k_1 + \alpha_1 t)C_{ti}) + E, \quad (3)$$

где Q – потребление газа; k_1 – начальное значение линии температурного тренда; α_1 – коэффициент наклона температурного тренда; Q_2 – изменение потребления газа, обусловленное ростом цены, выбираем из линейной ($k + \alpha t$), экспоненциальной ($ke^{\alpha t}$), логарифмической ($k + \alpha \ln(t)$); E – случайная компонента; C_{ti} – сезонные коэффициенты; m – коэффициент, позволяющей учесть взаимосвязь между параметрами температуры и цены на газ.

Для каждой из них коэффициент линии тренда α_1 и α находим по исходным данным за 2006–20011 годы, и затем, используя скрипт в MS Excel перебора параметров k_1, k, m с переменным шагом для всех трех вариантов линии зависимости от цены, находим вариант с минимальным средним отклонением от исходных данных («Прогноз 3» на рис. 2).

В результате получена достаточно точная модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кулакова А.Ф., Кулаков П.А.* Анализ бизнес-процессов газосбытовой организации для целей автоматизации деятельности // APRIORI. Серия: Есте-

ственные и технические науки. – 2014. – № 1. – URL: http://apriori-journal.ru/seria2/1-2014/Kulakova-Kulakov.pdf (дата обращения: 10.11.2014).

2. Таблица инфляции [с 1991 по 2014 гг.]. – URL: http://уровень-инфляции.рф/таблица_инфляции.aspx (дата обращения 13.02.2014).

3. Заработная плата в России. – URL: http://newsruss.ru/doc/index.php/Средняя_зарплата_в_России (дата обращения 13.02.2014).

4. Денежные доходы населения Республики Башкортостан. – URL: http://bashstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/-bashstat/ru//standards_of_life/России (дата обращения 13.02.2014).

КОМПЛЕКС ПО ПРОИЗВОДСТВУ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА НА БАЗЕ ГРС-4 НОВОСВЕРДЛОВСКОЙ ТЭЦ

М.С. Лебедев, А.С. Лебедев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, borez1992@mail.ru

В данной статье описывается уникальный процесс малотоннажного производства сжиженного природного газа на базе газораспределительной станции, рассматриваются основные преимущества производства, а также недостатки и методы борьбы с ними.

This article describes a unique process of small-tonnage production of liquid natural gas on the basis of the gas distribution station, discusses the main advantages of production, as well as disadvantages and methods of dealing with them.

Сжиженный природный газ (СПГ) – криогенная жидкость с содержанием метана не менее 86 % и температурой кипения от –162 °С, при регазификации которой из 1 м^3 получают около 600 м^3 газа при нормальных условиях (760 мм рт. ст., 0 °С). СПГ нетоксичен, хранится под небольшим избыточным давлением в емкости с теплоизоляцией.

Сжиженный газ, в отличие от природного газа в «чистом виде», имеет следующие преимущества.

1. Сжижение природного газа увеличивает его плотность в 600 раз, что сокращает объем при транспортировке и хранении.

2. Появляется возможность создания запасов и их использования по мере необходимости.

3. Возможность транспортировки на большие расстояния.

Целью данной работы является анализ технологического процесса установки для производства сжиженного природного газа на базе ГРС-4, выявление преимуществ и недостатков производства.

Исследование проводилось на Комплексе СПГ Управления «Уралавтогаз» ОАО «Газпром трансгаз Екатеринбург». На этом комплексе для сжижения газа используется детандерный цикл среднего давления, который успешно применяется в установках для разделения воздуха [1]. Природный газ из газотранспортной системы с давлением 35 кгс/см² (до дросселирования на ГРС) поступает на блок осушки, затем сжимается в турбокомпрессоре (на одном валу с турбодетандером) до 41 кгс/см^2, охлаждается в охладителе природного газа и разделяется на сжижаемый (13,5 %) и детандерный (86,5 %) потоки. Сжижаемый поток приходит через блок очистки, и далее оба потока проходят через предварительный и основной теплообменники. В результате расширения в турбодетандере температура газа понижается до –115 °С. Окончательное охлаждение до –140 °С и сжижение газа осуществляется за счет дросселирования сжижаемого потока. Газо-жидкостная смесь поступает в сепаратор для отделения жидкой от паровой фазы; паровая фаза проходит через теплообменники, а жидкая поступает на блок хранения.

Отличительной особенностью данного производства являются низкие удельные затраты электроэнергии (≈ 33 кВт·ч/т СПГ) за счет сжатия газа до 41 кгс/ см^2 в компрессоре с приводом от детандера. Это достигается потому, что в цикле используется потенциальная энергия потока под давлением, который не нужно сжимать до 35 кгс/см^2 и затем охлаждать, поскольку он уже поступает с таким давлением с ГРС. Основными потребителями электроэнергии являются: азотный модуль, производящий азот для пневмоприводных клапанов (компрессорная установка для сжатия воздуха), АСУ (автоматизированная система управления), криогенный насос и вентиляторы контроля загазованности.

Кроме того, использование энергии давления газа для сжижения небольшой его части (3 т/ч) позволяет вернуть остальной газ (более 60 тыс. м^3/ч), фактически прошедший дросселирование до давления 6 кг/см^2, с температурой +5 °С без дополнительного подогрева. Такой подогрев был бы необходим для исключения промерзания грунта вокруг трубы при обычном дросселировании на ГРС, поскольку температура газа после обычного дросселирования была бы отрицательной.

Однако в процессе производства возникают трудности: трубы теплообменников забиваются и давление потока падает. Это может происходить по двум причинам:

1) образование твердых частиц тяжелых углеводородов, входящих в состав природного газа;

2) образование газовых кристаллогидратов (клатратов) [2].

Первая причина исключается, поскольку в местах образования кристаллов стоят фильтры, которые регулярно обслуживаются персоналом. Следовательно, необходимо провести расчет условий образования гидратов.

В результате расчета выяснилось, что при заданном давлении и температуре потока образование гидратов возможно. Для исключения этого образования необходимо поддерживать либо уменьшенное давление, либо более высокую температуру. Но поскольку данный цикл не предусматривает уменьшенное давление, то нужно повышать температуру газа в местах «закупоривания» труб. Для этого можно применить трубу Хилша-Ранка (вихревую трубу) [3], в которой газ под давлением разделяется на холодный и горячий потоки. Горячий поток подается в место образования гидратов, и они разлагаются, а холодный смешивается с обратным потоком на ГРС. Поскольку для получения из «вихря» оптимальных параметров горячего потока и малых размеров самой трубы необходимо использовать поток с определенными расходом, давлением и температурой, данный метод требует дальнейшего расчета и исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.П., Вайнштейн Г.Е., Герасимов П.В.* Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отдние, 1987. – 280 с.

2. *Макагон Ю.Ф.* Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974. – 208 с.

3. *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. – М.: Машиностроение, 1969. – 184 с.

МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ НЕФТИ В ПРИСУТСТВИИ АКТИВНОЙ ВОДНОЙ ФАЗЫ

А.М. Маркелова, А.И. Трифонов, В.А. Ольховская

Самарский государственный технический университет, г. Самара, a.m.markelova@mail.ru

Предлагается способ решения задачи Бакли-Леверетта с учетом нелинейной зависимости скорости фильтрации вязкопластичной нефти от градиента давления. Данный способ основан на преобразовании функции фракционного потока путем введения в теорию водонапорного режима уравнений, отражающих реологические особенности течения нефти. Полученная модель позволяет количественно оценивать влияние реологических факторов на полноту вытеснения нефти водой и рассчитывать показатели разработки с учетом компонентного состава углеводородных фаз. На примере месторождений Самарской области показано, что качество проектных решений является неудовлетворительным в случаях, когда используемые программные комплексы не учитывают специфические неньютоновские свойства высоковязкой нефти.

The article offers a method to solve Buckley-Leverett's problem, taking into account the nonlinear dependence of the filtration rate of visco-plastic oil on the pressure gradient. This method is based on the transformation of the fractional flow function by introducing in the water drive theory the equations reflecting the rheological features of the oil flow. The resulting model allows us to quantify the influence of rheological factors on the completeness of the water-oil displacement and to calculate the performance, taking into account the component composition of the hydrocarbon phases. Taking the Samara Region oil fields as an example, the article shows that the quality of design is unsatisfactory when the bundled software being used does not take into account specific non-Newtonian properties of the high-viscosity oil.

Большинство современных гидродинамических моделей для проектирования разработки нефтяных месторождений базируется на классической теории водонапорного режима Бакли и Леверетта, также известной как гидродинамическая модель двухфазной фильтрации [2, 3].

Составной частью данной модели являются функции относительных фазовых проницаемостей (ОФП) по нефти и воде, которые получают в процессе фильтрационных экспериментов на кернах в лабораторных условиях. В процессе адаптации гидродинамических моделей

диаграммы ОФП часто модифицируют, изменяя произвольно форму кривых и добиваясь тем самым минимального расхождения расчетных и фактических показателей разработки.

В теории водонапорного режима Бакли-Леверетта скорости фильтрации обеих жидкостей, нефти и воды подчиняются линейному закону Дарси. Однако в составе нефти целого ряда месторождений в повышенных количествах содержатся вещества, способные образовывать внутреннюю структуру: асфальтены, смолы и парафины. Часто высоковязкая нефть обладает структурно-механическими свойствами и ведет себя как неньютоновская жидкость в зависимости от концентрации высокомолекулярных веществ, компонентного состава попутного газа, проницаемости пласта и температуры.

Следовательно, классический подход Бакли и Леверетта не корректен для целого класса нефтей, которые являются неньютоновскими системами и, в частности, проявляют свойства нелинейно вязкопластичных жидкостей [1].

Выходом из сложившейся ситуации является ввод в гидродинамическую модель зависимости, аналогичной закону Дарси, но отражающей нелинейную связь между скоростью фильтрации нефти и градиентом давления с учетом реологических особенностей течения.

В отношении вязкопластичных жидкостей таких зависимостей известно несколько [4]. Для встраивания в модель двухфазной фильтрации наиболее удобен гиперболический закон

$$|V| = \frac{k}{\mu_m} \frac{\operatorname{grad} P}{H + \sqrt{H^2 + (\operatorname{grad} P)^2}} \operatorname{grad} P, \qquad (1)$$

где V – скорость фильтрации нефти; k – абсолютная проницаемость пласта; μ_m – динамическая вязкость нефти с предельно разрушенной внутренней структурой; $\operatorname{grad} P$ – фактический градиент давления; H – градиент динамического давления сдвига (ГДДС) безводной нефти, определяемый экспериментально или расчетным путем.

В работе получена функция фракционного потока для нелинейно вязкопластичной нефти:

$$f(S) = \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{в}} + \frac{\mu_{\text{в}} k_{\text{н}}}{\mu_m} \frac{\operatorname{grad} P}{H + \sqrt{H^2 + (\operatorname{grad} P)^2}}}. \qquad (2)$$

Согласно выражению (2), функция фракционного потока для заданной водонасыщенности S будет зависеть не только от значений ОФП, но и от фактического градиента пластового давления, а также ГДДС. Это означает, что в определенном диапазоне градиентов давления на темпы обводнения вместе с фильтрационными свойствами породы будут активно влиять и вязкопластичные свойства нефти.

ГДДС определялся согласно эмпирической методике, предложенной коллективом специалистов под руководством В.В. Девликамова [1].

С помощью преобразованной функции $f(S)$ были рассчитаны значения текущей плотности запасов нефти пласта $Б_2$ двух месторождений Самарской области, которые по сравнению с традиционным подходом оказались выше.

Оперативная оценка выработки запасов исследуемых месторождений с учетом вязкопластичных свойств нефти в присутствии водной фазы позволила рекомендовать в качестве актуального метода воздействия селективную изоляцию водопритока при помощи гидрофобных эмульсионных систем для залежей с активным влиянием законтурной зоны (аквифера). Предложены способы интенсификации добычи нефти, основанные на использовании температурного фактора в сочетании с изоляцией промытых водой зон материалами, не подверженными термодеструкции. Одновременно обоснована возможность адресного воздействия на реологически неблагоприятные участки пласта $Б_2$ увеличением депрессии путем снижения забойных давлений в результате спуска более производительных насосов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Девликамов В.В., Хабибуллин З.А., Кабиров М.М.* Аномальные нефти. – М.: Недра, 1975. – 168 с.

2. *Дейк Л.П.* Практический инжиниринг резервуаров. – М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2008. – 668 с. – (Библиотека нефтяного инжиниринга).

3. *Желтов Ю.П.* Разработка нефтяных месторождений: учебник для вузов. – М.: Недра, 1998. – 365 с.

4. *Каюмов Ш.К.* Приближённо-аналитические методы решения задач теории фильтрации вязкопластичных флюидов. – Ташкент: ФАН, 1991. – 156 с.

5. *Ковалёв А.А., Михайлов Н.Н.* Экспериментальное исследование влияния полярных компонентов нефти на характеристики двухфазной фильтрации // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 1. – С. 29–34.

РАЗРАБОТКА РЕЖИМА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Д.А. Немущенко, А.В. Леготин, Н.С. Полякова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, nemuschenko@corp.nstu.ru

В работе проведен аналитический обзор исследований получения строительной керамики с использованием твердых техногенных отходов и разработан режим высокотемпературной обработки керамической массы, компонентный состав которой включает золу-уноса, стеклобой, суглинок и специальные добавки.

In this paper we conducted an analytical review of studies producing building ceramics using solid technological otho-ing mode and developed high-temperature processing of ceramic-tion of the masses, the component structure which includes ash, glass, clay and special additives.

Основной нерешенной экологической проблемой угольной энергетики современной России является накопление золошлаковых отходов (ЗШО) в отвалах и возникающее при этом вредное воздействие ЗШО на окружающую природную среду и человека. Для решения данной проблемы необходимо внедрять методы переработки ЗШО и при этом возвращать в хозяйственный оборот миллионы тонн ежегодно образующегося ценного техногенного сырья. При внедрении технологий переработки энергетическое предприятие получает определенные выгоды: снижаются экологические платежи, отсутствуют затраты на строительство новых и содержание старых золоотвалов и эксплуатацию системы гидрозолоудаления, возможно получение дополнительной прибыли от реализации продукции из вторичного сырья.

Одно из крупнотоннажных направлений утилизации ЗШО – строительная керамика (кирпич, облицовочная плитка и др.), основными недостатками которой на данный момент являются высокие энергозатраты на обжиг при получении высококачественных изделий и дефицит необходимого сырья. На потребительские свойства керамики главным образом оказывают влияние процессы спекания и преобразования минерального состава при обжиге.

В этой связи в работе были поставлены следующие задачи:

– разработать режим высокотемпературной обработки технической керамики, рецептура которой содержит максимальное количество твердых техногенных отходов;

– исследовать преобразование исходных минералов при обжиге керамики;

– подобрать оптимальное соотношение компонентов в рецептуре керамической массы;

– интенсифицировать процессы твердофазного спекания.

За основу была взята рецептура керамики, представленная в патенте [1], которая нами была адаптирована под местные сырьевые компоненты. В состав образцов керамики входили отходы от сжигания угля на электростанциях г. Новосибирска (кислые и основные золы-уноса сухого отбора, уловленные электрофильтрами), измельченный стеклобой, суглинок в качестве связующего (при необходимости) и другие добавки. Работы проводились в лаборатории «Новые материалы на основе техногенных отходов» кафедры инженерных проблем экологии НГТУ.

В результате исследований, проведенных в работе [2], показано, что при обжиге изделий из глины и высококальциевых золошлаковых отходов при температуре 1050 °С образуются в основном кристобалит, анортит, кварц, муллит, волластонит и гематит. При обжиге изделий из низкокальциевой золы формируется аналогичный минеральный состав, за исключением волластонита. Волластонит создает плотный каркас, препятствующий изменению прежнего объема, вследствие чего снижаются напряжения и усадка образцов. Кристобалит снижает механическую прочность изделий, а образование его из аморфного кремнезема обусловливает проницаемость изделий. Соответственно, данный минерал является нежелательным в технологии производства керамики, и с его присутствием необходимо бороться.

Наличие минерала анортита в изделии, по мнению авторов работы [3], приводит к повышению прочностных свойств, высокой химической стойкости и стойкости к истиранию.

Направленная кристаллизация определенных кристаллических фаз в готовом изделии достигается подбором оптимального соотношения сырьевых компонентов в формовочной смеси (стехиометрического соотношения компонентов) и введением добавок-ускорителей, способствующих на первом этапе разрушению решеток реагирующих компонентов [4].

На протекание твердофазных реакций при обжиге существенное влияние оказывают удельная поверхность компонентов смеси, а также рациональная степень спрессованности. Снижение температуры обжига может происходить вследствие воздействия парогазовой фазы, которая образуется внутри материала при дегидратации гидратных фаз сырца в процессе обжига [4].

Результаты проведенных исследований показывают, что важно интенсифицировать процессы взаимной и самодиффузии компонентов керамической массы, так как данный процесс является наиболее важным при спекании керамического изделия. Диффузия протекает, прежде всего, под действием разницы концентраций заряженных частиц.

Кроме того, варьируя количество стеклобоя в композиции, можно регулировать открытую пористость и, соответственно, влиять на водопоглощение и морозостойкость изделий. На практике в результате добавления измельченного стекла в специальные виды керамики можно, например, осуществить остекловывание опасных веществ, содержащихся в материале, что позволит избежать вымывания их водой в окружающую среду.

Авторы выражают благодарность научному руководителю направления д-ру техн. наук, профессору В.В. Ларичкину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pat. 5,583,079 United States of America, C03C 1/00, C03C 1/02, C04B 18/06. Ceramic products of glass, fly ash and clay and methods of making the same / J.T. Golitz, J.F. Mainieri, B.H. Bennett, R.D. Moore, A.M. Paxton. – № 367,851; filed 19.07.94; date of patent 10.12.96.

2. *Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С.* Фазовый состав керамических изделий на основе отходов горючих сланцев, углеобогащения, нефтедобычи и золошлаковых материалов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 4–1. – С. 82–95.

3. Получение стеклокристаллических материалов из силикатсодержащих расплавов с использованием низкотемпературной плазмы / А.В. Луценко, Н.К. Скрипникова, Г.Г. Волокитин, А.С. Турашев // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 3. – С. 126–132.

4. *Лохова Н.А., Косых А.В., Тугарина А.О.* Рациональное использование отходов промышленности в производстве легковесной керамики // Успехи современного естествознания. – 2003. – № 11. – С. 19–22.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДНО-СОЛЕВОГО РАСТВОРА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО НАГРЕВА

Е.Г. Орлова, Д.В. Феоктистов, Г.В. Кузнецов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, enja199105@gmail.com

Представлены результаты экспериментального исследования процесса испарения капли водно-солевого раствора NaCl на твердой подложке (анодированный алюминий) в условиях варьирования теплового потока. Определяемыми параметрами являются контактный диаметр, контактный угол, высота капли, удельная скорость испарения. Установлены режимы испарения капель раствора с различными концентрациями: пиннинг, «обратный депиннинг». Установлено влияние начальной концентрации раствора на значение контактного угла и удельной скорости испарения.

This paper presents an experimental study of the evaporation of a sessile water- sodium chlorides solution drop to open atmosphere on the solid substrate (anodized aluminum) under the varying heat flux. The main defined parameters are the contact diameter, contact angle, height of the drop, specific evaporation rate. According to the data analysis it was found different modes of evaporation: pinning, "reverse depinning". It was found out the influence of the initial concentration of the evaporated solution to a value of the contact angle and the specific evaporation rate.

Теоретические основы испарения капель чистых жидкостей и их растворов на сегодняшний день не разработаны на уровне, обеспечивающем прогностическую оценку влияния температуры, объема, концентрации растворителя, материала на данный физический процесс.

Цель работы: экспериментальное определение влияния температуры, концентрации раствора соли, объема капли на скорость испарения, краевой угол и контактный диаметр в условиях испарения капли на твердой подложке.

Эксперименты проведены на установке [1], включающей теневую и шлирин-системы [2].

Испарение капли осуществлялось в трех режимах нагрева рабочего участка (таблица).

Регистрация контактного угла, радиуса растекания, высоты капли осуществлялась программой KRUSS [3].

Параметры режимов нагрева

Режимы нагрева	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Температура под подложкой, °С	Температура на поверхности подложки, °С
I	5	2,8	62,5	61,0
II	6	3,2	73,5	72,9
III	7	3,7	84,5	83,1

Удельная скорость испарения, определялась по [1]:

$$ES = \frac{(V_i - V_{i+1})}{\Delta t \;\; A_i + A_{i+1} \;\; / 2}, \quad \frac{\text{мл}}{\text{с} \cdot \text{мм}^2},$$

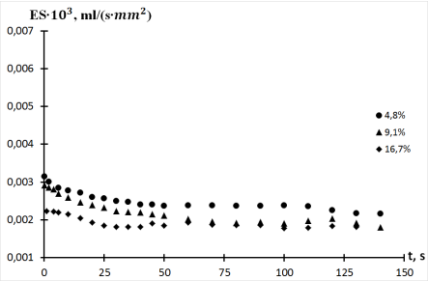
где V_i, V_{i+1}, A_{i+1}, A_i – объем (мл) и площадь поверхности капли (мм^2) в момент времени t_i и t_{i+1} соответственно.

На рисунке представлены графические зависимости удельной скорости испарения капли водно-солевого раствора объемом 0,02 мл в трех режимах нагрева при концентрациях 4,8 %; 9,1 %; 16,7 % (масс.).

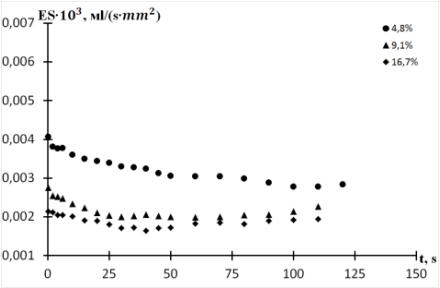
По результатам анализа установлено, что удельная скорость испарения снижается до определенного значения (понижение происходит до 30 %), далее происходит ее повышение. Полученные зависимости согласуются с результатами, установленными для капель дистиллированной воды объемом 104,7 мкл, лежащих на подложке с температурой поверхности 64 °С [4]. Различие состоит в том, что на завершающем этапе удельная скорость испарения водных растворов солей повышается не так стремительно и не достигает значений, превышающих удельную скорость испарения на начальном этапе испарения.

Установлены особенности испарения капель водных растворов солей на подложке из анодированного алюминия при значениях температуры поверхности 84,5 °С. Начало испарения сопровождается непродолжительным по времени процессом уменьшения удельной скорости испарения (5…10 секунд), далее происходит монотонное ее повышение. Предположительно, это связано с высокими значениями температуры поверхности. В данном случае нагрев капли происходит быстрее, ее температура близка к значениям температур кипения. Процесс испарения происходит интенсивнее, повышается диффузия с поверхности капли. Установлено, что при испарении с начальной концентрацией раствора 16,7 % после 30…50 секунд роста удельной скорости испарения происходит ее резкое

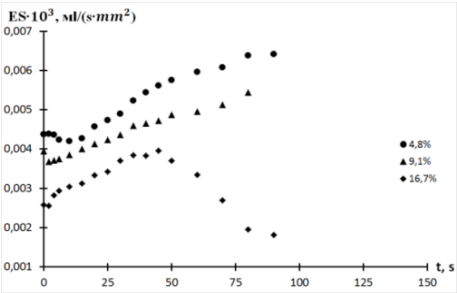
уменьшение с последующим монотонным снижением. Данный момент сопровождается образованием массивной «корки» солевого кольца по периметру капли и практически полным высыханием растворителя. Этот эффект вероятнее всего является причиной понижения скорости.



а



б



в

Изменение удельной скорости испарения капли водно-солевого раствора в трех режимах нагрева:

а – I режим; *б* – II режим; *в* – III режим

По результатам эксперимента установлено, что капля раствора с концентрацией до 16,7 % испаряется в трех стадиях (1 – растекание, 2 – пиннинг, 3 – «обратный депиннинг»), с концентрацией (16,7 %) только в режиме «обратного депиннинга». То есть на протяжении всего процесса испарения происходит движение контактной линии в сторону увеличения площади, занимаемой каплей. Диаметр пятна капли в среднем увеличивается на 19 % от первоначального. Процесс фазового перехода капель сопровождается непрерывным уменьшением контактного угла.

Работа выполнена в рамках Госзадания «Наука» (шифр Федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.* Испарение капель водного раствора NaCl на твердой подложке // Современные техника и технологии: сб. докладов XX Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т.: т. 3. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 169–170.

2. *Marchuk I.V., Lyulin Yu.V., Kabov O.A.* Theoretical and experimental study of convective condensation inside circular tube // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2013. – Vol. 1, iss. 2. – P. 153–171.

3. *Orlova E., Kuznetsov G., Feoktistov D.* The evaporation of the water-sodium chlorides solution droplets on the heated substrate // EPJ Web of Conferences. – 2014. – Vol. 76. – Art. 01039.

4. Modeling of the convective fluid flows with evaporation in the two-layer systems / O.N. Goncharova, M. Hennenberg, E.V. Rezanova, O.A. Kabov // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2013. – Vol. 1, iss. 4. – P. 317–338.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ НА ТЕПЛООТДАЧУ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Ю.М. Бродов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, plotnikovlv@mail.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния высокочастотной газодинамической нестационарности на интенсивность теплоотдачи в газовоздушных трактах поршневых двигателей. Представлены совмещенные зависимости изменения мгновенной скорости потока и локального коэффициента теплоотдачи в газовоздушных трактах двигателя от угла поворота коленчатого вала.

The results of experimental research of the influence of high-frequency gas-dynamical nonstationarity on the intensity of heat transfer in the intake and exhaust tract of piston engines are presented in the article. Dependences of instantaneous values of flow velocity and the local heat transfer coefficient in the intake and exhaust tract of the engine from the crankshaft rotation angle are presented in the article.

Эффективность работы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в значительной степени зависит от совершенства процессов, протекающих в их газовоздушных трактах. Процессы газообмена в двигателях

являются высокочастотными и нестационарными [1, 2]. Для расчета теплоперепада и для определения температурных напряжений в газовоздушных трактах ДВС необходимы данные о мгновенной локальной теплоотдаче в них.

С целью установления влияния высокочастотной газодинамической нестационарности на интенсивность теплоотдачи во впускном и выпускном трактах ДВС проводились исследования на натурной модели поршневого двигателя размерности 8,2/7,1. Подробное описание экспериментальных установок представлено в [3, 4].

Исследовано влияние нестационарности на газодинамические и теплообменные характеристики процесса впуска в двигателе. Показано, что существует общая закономерность изменения α_x от угла φ во впускном канале ДВС. Установлено, что темп изменения теплоотдачи и максимальные значения α_x увеличиваются с ростом n. Наблюдается зависящее от частоты вращения запаздывание интенсивности теплоотдачи от вариации скорости потока воздуха по углу на величину $\Delta\varphi$.

Установлено (рис. 1), что для впускного тракта ДВС газодинамическая нестационарность приводит к сильному снижению теплоотдачи (до 2,5 раз) в сравнении со стационарным режимом течения [5].

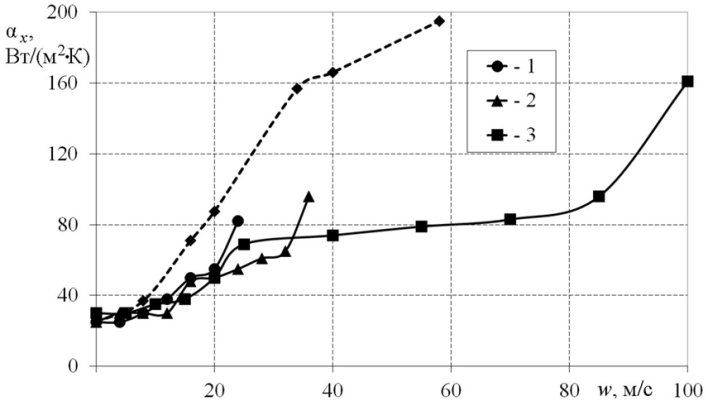


Рис. 1. Зависимость локального (l_x = 110 мм) коэффициента теплоотдачи α_x от скорости потока воздуха w во впускном канале двигателя:

1) n = 600 мин$^{-1}$; *2*) n = 1500 мин$^{-1}$; *3*) n = 3000 мин$^{-1}$;
- - - - стационарный поток; —— пульсирующий поток

При определении газодинамических условий теплоотдачи в выпускном канале обнаружено, что пульсации скорости потока воздуха наиболее ярко выражены при низких частотах вращения коленчатого вала при всех значениях избыточного давления. Установлено, что после закрытия выпускного клапана скорость потока воздуха не становится равной нулю, а наблюдаются некоторые ее флуктуации. Подобный эффект отмечен и для процесса впуска.

Сравнение значений локального коэффициента теплоотдачи α_x в статическом и динамическом режимах движения потоков (рис. 2) показывает, что для выпускного тракта ДВС нестационарность также приводит к снижению теплоотдачи (до 2,5 раз).

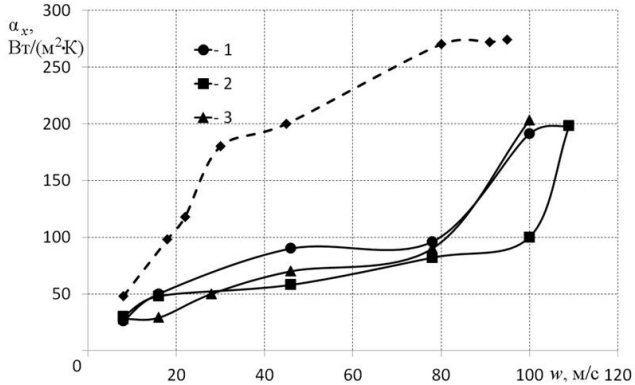


Рис. 2. Зависимость локального (l_x = 110 мм) коэффициента теплоотдачи α_x от скорости потока воздуха w в выпускном канале двигателя:

1) n = 600 мин$^{-1}$; *2*) n = 1500 мин$^{-1}$; *3*) n = 3000 мин$^{-1}$;
- - - - стационарный поток; —— пульсирующий поток

Необходимо подчеркнуть, что в динамическом режиме продувки выпускного канала двигателя максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи отработавших газов достигают примерно одного значения около 200 Вт/(м^2·К) в диапазоне скоростей потока от 100 до 110 м/с при всех значениях частоты вращения коленчатого вала.

Результаты проведенных опытов позволили сформулировать задачи дальнейших исследований:

– углубленное исследование физики процессов, происходящих во впускных и выпускных каналах двигателей;

– оценка влияния высокочастотной газодинамической нестационарности на основные показатели работы двигателей в целом;

– разработка методов совершенствования процессов газообмена поршневых ДВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Краев В.М.* Теплообмен и гидродинамика турбулентных течений в условиях гидродинамической нестационарности // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2005. – № 3. – С. 39–42.
2. *Плотников Л.В., Жилкин Б.П.* Динамические характеристики газодинамики и теплоотдачи во впускном тракте поршневого ДВС // Двигателестроение. – 2009. – № 2. – С. 55–56.
3. *Жилкин Б.П., Плотников Л.В.* Динамические характеристики процесса впуска в поршневом ДВС // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2009. – № 1 (31). – С. 135–141.
4. Об изменении газодинамики процесса выпуска в поршневых ДВС при установке глушителя / Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, А.В. Крестовских, Д.Л. Падаляк // Вестник академии военных наук. – 2011. – № 2. – С. 267–270.
5. *Плотников Л.В., Жилкин Б.П.* Особенности изменения скорости и локального коэффициента теплоотдачи во впускных каналах разной конфигурации поршневого ДВС // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 178–183.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ КАК ЭКОЛОГИЧНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ДВС

М.В. Попов, Д.А. Першина, Г.Г. Кувшинов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, popovmaxvik@gmail.com

В работе представлена технология получения метано-водородных смесей для использования в качестве газомоторного топлива. Были исследованы разные методы приготовления катализаторов применительно к данному процессу. Установлено, что катализатор по методу «соосаждения» проявляет лучшие каталитические свойства, чем катализатор по методу «горения растворов».

This paper presents a technology for producing methane-hydrogen composition for use as motor fuel. We investigated different methods of

catalyst preparation in relation to this process. Established that the catalyst of the method of "coprecipitation" shows better catalytic properties than the catalyst based on a "combustion solutions."

В настоящее время в России с каждым годом добывается все больше природного газа, и это двигает энергетику России в направлении использования природного газа как основного источника топлива для нужд народного хозяйства и автотранспорта в качестве топлива для ДВС.

По постановлению Правительства РФ к 2020 году более половины общественного транспорта страны должно быть переоборудовано для работы на природном газе или СПБТ. Метан и пропан-бутановые смеси почти в три раза дешевле бензина, поэтому их применение даст существенный экономический эффект. Применение водородсодержащих топливных смесей в двигателях внутреннего сгорания обеспечивает многократное снижение вредных выбросов в продуктах сгорания топлив и существенно увеличивает КПД двигателей за счет увеличения энергоемкости топлива. Следовательно, актуальной становится разработка новой экологичной технологии получения в качестве газомоторного топлива – метановодородного топлива.

Наиболее перспективным альтернативным способом получения метановодородной смеси является пиролиз углеводородов на Ni-содержащих катализаторах [1, 2]. Данный процесс осуществляется при относительно низких температурах (500…700 °С) и позволяет получать помимо водорода дополнительный, но не менее ценный продукт – нановолокнистый углерод (НВУ). В предлагаемой технологии метановодородная смесь производится в одну стадию, что существенно упрощает и удешевляет этот процесс.

В данной работе были рассмотрены два катализатора одинакового состава 82Ni-8Cu/Al_2O_3, но приготовленные разными способами: по методу «горения растворов» и методом «соосаждения». Эксперименты проводились при температуре 675 °С в диапазоне давлений 1…10 атм.

Из двух заявленных катализаторов лучшие характеристики показал катализатор, приготовленный методом соосаждения. Такой катализатор показывает хорошую и стабильную активность на протяжении 42 часов при давлении 10 атм, тогда как катализатор, приготовленный методом «горения растворов», при таком давлении работает в три раза меньше (см. рис.1).

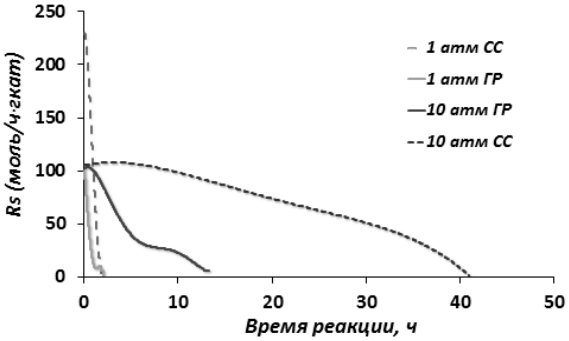


Рис. 1. Зависимость скорости реакции от времени дезактивации катализатора

На рис. 2 просматривается закономерность увеличения удельного выхода водорода при повышении давления в реакторе за время до полной дезактивации катализатора. Видно, что максимальный выход водорода достигается при давлении 10 атм на катализаторе, приготовленном по методу «соосаждения», и составляет 60 моль/гкат.

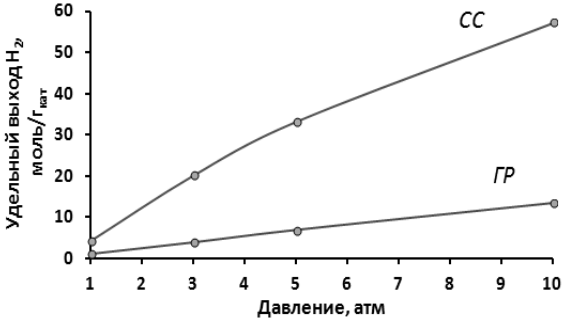


Рис. 2. Экспериментальная зависимость удельного выхода водорода от давления для катализаторов соосаждения и горения растворов

Полученные результаты показывают, что существенное влияние на каталитические характеристики оказывает метод приготовления катализатора. Можно предположить, что введение сухого горючего вызывает увеличение скорости выделения тепла в процессе температурной обработки катализатора и, как следствие, приводит к уменьшению

размеров кристаллов. В кристаллах меньшего размера активные центры быстрее инкапсулируются углеродом, вследствие чего катализатор, приготовленный данным методом, дезактивируется гораздо быстрее катализатора, приготовленного методом соосаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ermakova M.A., Ermakov D.Yu., Kuvshinov G.G., Plyasova L.M.* New Nickel Catalysts for the Formation of Filamentous Carbon in the Reaction of Methane Decomposition // Journal of Catalysis. – 1999. – Vol. 187, iss. 1. – P. 77–84.

2. *Abbas H.F., Wan Daud W.M.A.* Hydrogen production by methane decomposition: A review// International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35, iss. 3. – P. 1160–1190.

ВОЗДУШНЫЙ КОНДЕНСАТОР КАК СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРА

А.Е. Рыльский, О.В. Боруш

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, aleksey_rylskiy@mail.ru

В статье кратко описываются основные проблемы, возникающие при использовании традиционных систем технического водоснабжения на электростанции как с эксплуатационной, так и с экологической точек зрения. Рассматривается альтернативный вариант, в качестве которого выступает воздушный конденсатор, также произведен анализ расчета площади поверхности теплообмена.

This article briefly describes the main issues that are happening due to the usage of traditional systems of technical water supply at power plants, both from operational and environmental points of view. The article also presents an alternative option, as an air condenser, and the analysis of the heat-transfer area calculation.

Вследствие использования традиционных схем с прохождением охлаждающей воды через градирни значительно повышается влажность в районе функционирования электростанций, возникают туманы, что, учитывая суровые температурные режимы нашей страны, приводит к обмерзанию оборудования и снижению надежности его эксплуатации.

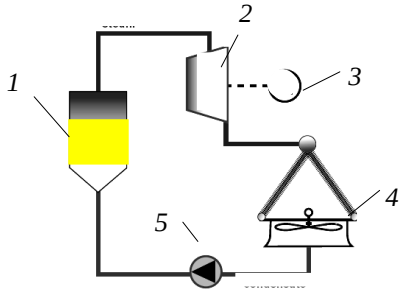
В качестве альтернативного варианта традиционным системам предлагается использование воздушного конденсатора (ВК) в составе паротурбинного энергоблока. Это позволяет сократить уровень эколо-

гической напряженности, устранить образование отложений в виде накипи и биообразований в теплообменном оборудовании, а значит, повысить его надежность [3].

Нельзя не сказать и о том, что строительство ТЭЦ приходится вести в том числе и в регионах, испытывающих проблемы с водой. Там альтернативы воздушным конденсаторам просто нет. Так, расположение электростанций с ВК не зависит от источника водоснабжения, что является огромным преимуществом. Вода – идеальный природный теплоноситель, однако настало время ее поберечь.

Понимая, что повсеместный переход к ВК неминуем, США, Германия, Испания, Канада наряду с Китаем давно озадачились созданием эффективных охладителей нового типа и начали активно их применять. Россия в этом вопросе пока отстает и перспективе их использования не уделяет должного внимания.

Наиболее распространенным исполнением конденсатора с воздушным охлаждением является А-образная модульная конструкция (рисунок), применяемая на энергетических установках любой мощности [2]. Отработавший пар из турбины подается в трубы из расположенного сверху коллектора, а неконденсирующиеся газы (воздух) и образовавшийся конденсат удаляются из нижнего коллектора. Тяга охлаждающего воздуха искусственная (как правило, снизу расположены нагнетательные вентиляторы).



Схематическое изображение конденсатора с воздушным охлаждением в системе прямого сухого охлаждения:

1 – паровой котел; *2* – турбина; *3* – электрогенератор; *4* – воздушный конденсатор; *5* – конденсатный насос

Расчетная площадь поверхности теплообмена находится из уравнения теплопередачи [3]

$$F = Q / (k\Delta t_{\text{ср}}),$$

где k – коэффициент теплопередачи; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор; Q – количество передаваемой теплоты.

В случае значительного изменения коэффициента теплопередачи и температурного напора по длине теплообменной поверхности, как правило, она разбивается на несколько участков, имеющих свой коэффициент теплопередачи и температурный напор. Общая расчетная площадь теплообмена в данном случае будет равна [3]

$$F = \sum_{1}^{n} F_i,$$

где n – количество участков.

Коэффициент теплопередачи как пример биметаллической трубы, отнесенный к полной площади поверхности оребрения, вычисляется по формуле [3]:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} \frac{\varphi d_0}{d_1} + \frac{\varphi d_0}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_1} + R_{\text{к}} \frac{\varphi d_0}{d_{\text{к}}} + \frac{\varphi d_0}{2\lambda_{\text{а}}} \ln \frac{d_0}{d_{\text{н}}} + \frac{1}{\alpha} \right)^{-1},$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны трубы; α – приведенный коэффициент теплоотдачи от оребрения к воздуху, отнесенный к полной поверхности оребрения; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки несущей трубы; $\lambda_{\text{а}}$ – коэффициент теплопроводности алюминия или сплава, из которого выполнена ребристая оболочка; $R_{\text{к}}$ – термическое контактное сопротивление; $d_{\text{н}}$ – наружный диаметр несущей трубы; $d_{\text{к}}$ – диаметр контактирования поверхности несущей трубы и ребристой оболочки.

По оценкам специалистов фирмы GEA (Германия), стоимость ВКУ составляет 80…100 % стоимости оборотного водоснабжения с поверхностным конденсатором, расходы электроэнергии на привод вентиляторов и циркуляционных насосов также приблизительно равны. Сравнительная оценка экономической эффективности применения ВК свидетельствует о значительном преимуществе использования воздушного конденсатора [1].

Таким образом, детальное исследование применения и анализ эффективности паротурбинного энергоблока с воздушным конденсатором в нашей стране – бесспорно важная и актуальная с практической точки зрения задача.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Клевцов А.В., Пронин В.А.* Перспективные технологии и энергоустановки для производства тепловой и электрической энергии. Применение воздушных конденсаторов в энергетике [Электронный ресурс] / МЭИ (ТУ) // Природоохранные технологии. Раздел 6.4. – URL: http://osi.ecopower.ru/2010-10-18-11-03-16/itemlist/category/115-64-применение воздушных конденсаторов в энергетике.html (дата обращения: 10.11.2014).

2. Indirect natural draft dry cooling [Electronic resource]. – Available at: http://spxcooling.com/library/detail/indirect-natural-draft-dry-cooling (accessed: 13.11.2014).

3. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш, В.И. Евенко, Ю.Н. Васильев, А.Э. Пиир, О.П. Кректунов, В.И. Слухин, А.А. Брилль. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗАЛЕЖИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДОБЫЧИ

В.Е. Ханжина, А.А. Ковалев, А.М. Зиновьев

Самарский государственный технический университет, г. Самара, renigm.samgtu@gmail.com

Мероприятия по формированию оптимальной стратегии разработки месторождений должны учитывать возможное проявление структурно-механических свойств (СМС) нефтей. Качественно учесть и количественно оценить влияние СМС на процесс добычи нефти с повышенным содержанием асфальтенов и смол позволяет рассматриваемая методика. В результате выполнения всех расчетов и построений получается набор параметров для формирования оптимальных энергетических режимов разработки залежи высоковязкой нефти с проявлением нелинейно вязкопластичных неньютоновских свойств.

While choosing an optimal field development strategy it is necessary to take into account the possible effects of oil structural-mechanical qualities. The presented methods allow to estimate the effect of structural-mechanical qualities on the production of oil with high levels of asphaltene

and tarry substances. After completing all calculations and designing a parameter set is created for optimal depletion mechanisms of the production of nonlinear high-viscosity non-Newtonian oil.

В качестве примера было рассмотрено месторождение X, подготовленное к промышленной разработке. При формировании системы разработки продуктивного пласта, представленного карбонатными породами, была использована геолого-промысловая информация, полученная по результатам бурения разведочной скважины: стандартная величина динамической вязкости (μ) в пластовых условиях составляет 211,8 МПа·с, нефть характеризуется повышенным содержанием смол (16,7 %) и асфальтенов (7,3 %); коэффициент проницаемости (*k*) принят равным 0,245 мкм^2.

На основании методики и выбранной модели фильтрации [1] были выполнены необходимые расчеты по обоснованию стартовых дебитов вертикальных скважин для формирования рационального энергетического режима разработки карбонатной залежи пласта. Расчетные значения эффективной и минимальной вязкости пластовой нефти составили 176 и 139 мПа·с соответственно.

Оценка начальных дебитов осуществлялась для нескольких значений проницаемостей пласта. По полученным данным была построена расчетная зависимость стартового дебита проектных вертикальных скважин от депрессии, создаваемой на пласт (рис. 1).

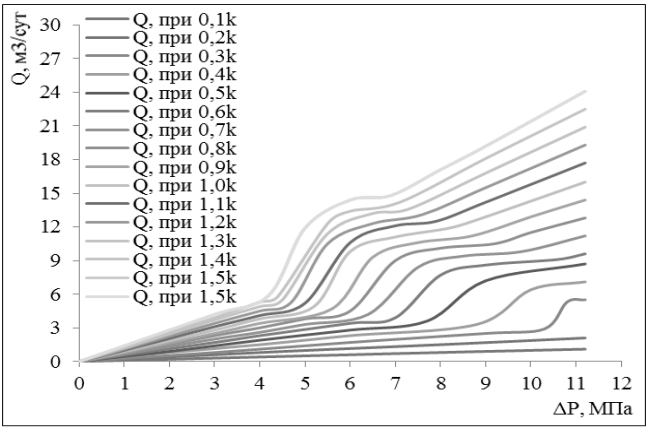
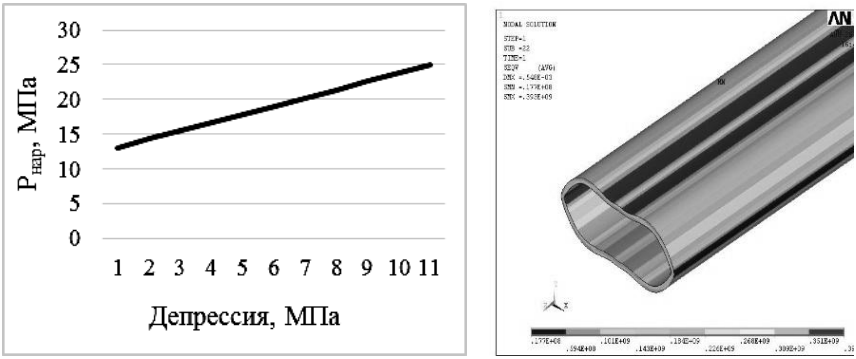


Рис. 1. Расчетная зависимость стартового дебита проектных вертикальных скважин от депрессии

Анализ результатов выполненных расчетов показывает, что изменение проницаемости от 0,1k в зонах с ухудшенными до 1,5k в зонах с улучшенными значениями проницаемости относительно принятой при проектировании величины приводит к изменению стартового дебита вертикальной скважины от 7,1 до 19,2 м^3/сут при создании депрессии в 9 МПа. Однако в реальных условиях при начальном пластовом давлении в 11,2 МПа данный перепад давления создать невозможно.

Далее были выполнены прочностные расчеты типовой колонны (внутренний диаметр 146 мм, толщина стенки 7 мм, группа прочности Д). Для этого в первую очередь на основании соответствующей руководящей документации [2] были определены действующие на колонну наружные избыточные давления ($P_{нар}$). Зависимость $P_{нар}$ от депрессии представлена на рис. 2, *а*. С учетом необходимого запаса прочности труб (1,3) при депрессии в 9 МПа $P_{нар}$ составит 22,5 МПа, что в соответствии с результатами расчетов, выполненных в программном обеспечении ANSYS, приведет к смятию колонны, а следовательно, к выходу скважины из строя (рис. 2, *б*).



а *б*

Рис. 2. Расчетная зависимость $P_{нар}$ от депрессии (*а*); модель колонны после приложения нагрузки 22,5 МПа (*б*)

Необходимо также отметить, что при создании депрессии в 11,6 МПа для участков пласта с проницаемостью 0,5k и меньше влияние неньютоновских свойств на добычу будет минимальным, однако создание данной депрессии даже теоретически недостижимо, так как это значение превышает величину начального пластового давления. Это означает, что для залежей с небольшими запасами аномально вяз-

кой нефти и неизменно снижающемся в процессе эксплуатации относительно стартового значения дебите, с учётом проявления структурно-механических свойств нефти экономически оправданная разработка вертикальными скважинами зачастую невозможна.

Одним из немногих способов экономически оправданной эксплуатации продуктивного пласта в данных геолого-физических условиях может быть бурение горизонтальных скважин. В связи с этим для рентабельного вовлечения в разработку продуктивного пласта было принято решение о замене вертикальных добывающих скважин на скважины с горизонтальным окончанием ствола [3]. Результаты бурения и освоения горизонтальной скважины позволили повысить стартовый дебит относительно вертикальной скважины более чем в 2,5 раза. Фактические уровни добычи нефти пробуренной горизонтальной скважины также превышают аналогичный прогнозный показатель вертикальной скважины.

Выводы

1. Для обоснования режимов разработки залежей аномально вязкой нефти в условиях дефицита исходной геолого-промысловой информации можно использовать алгоритм, основанный на модели фильтрации нелинейно вязкопластичной нефти. Часть параметров из расширенного набора входных данных может приниматься по аналогии с соседними более изученными месторождениями.

2. Вычислительные эксперименты и промысловые исследования показали, что применение вертикальных скважин для разработки залежей аномально вязкой нефти с небольшими запасами в ряде случаев экономически нецелесообразно. Особенно ярко это выражено при неизменно снижающемся относительно стартового значения дебите и проявлении структурно-механических свойств нефти.

3. Формирование систем разработки месторождений аномально вязкой нефти с использованием горизонтальных скважин по сравнению с вариантами разработки вертикальными скважинами может оказаться более эффективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зиновьев А.М., Ольховская В.А., Максимкина Н.М.* Проектирование систем разработки месторождений высоковязкой нефти с использованием модели неньютоновского течения и результатов исследования скважин на приток // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 1. – С. 4–14.

2. Инструкция по расчету обсадных колонн для нефтяных и газовых скважин / Науч.-исслед. ин-т разработки и эксплуатации нефтепромысловых

труб (АООТ "ВНИИТнефть"). – Взамен РД 39-7/1-0001-89; введ. 01.07.97. – М., 1997. – 207 с.

3. Применение технологии Micro-Scope для геологического сопровождения бурения горизонтального ствола скважины / М.Дж. Ризванов, Е.И. Павликовская, В.Н. Довгополый, А.А. Ковалев, А.А. Кожемякин, С.А. Голубева, О.А. Татур // Вестник ЦКР Роснедра. – 2013. – № 6. – С. 27–30.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ

Р.Р. Хасанов, В.М. Гуреев, А.Х. Хайруллин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, qazan7@yandex.ru

С помощью программного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS-CFX проведены численные исследования течения в проточной части компрессорной ступени ТКР 7С-6 двигателя КамАЗ. В ходе численного эксперимента получены интегральные значения давления, температуры на входе и выходе в компрессор, которые представляют возможность определить степень сжатия воздуха в компрессоре, а также вычислить его КПД.

The most effective method of increase in amount of air is an increase of its density by means of preliminary compression in the compressor with the subsequent cooling. It should be noted that high complexity and a large labor content of the natural experiments do not allow receiving the reliable values of gas-dynamic characteristics of air flow in a compressor of a turbocharger.

Одним из важнейших элементов системы питания воздухом двигателя является турбокомпрессор. Газодинамическое совершенство проточной части, а также колеса компрессора позволяет повысить эффективность турбокомпрессора. Определение оптимальных геометрических размеров элементов компрессорной ступени и газодинамических параметров, обеспечивающих требуемую производительность и напор при заданной эффективности, и является целью проведения газодинамического расчета.

Совершенствование характеристики компрессора путем инженерных расчетов и экспериментальных исследований является трудоем-

ким и затратным. Однако в настоящее время все шире начинает применяться новый исследовательский инструмент – численный эксперимент, основанный на использовании методов вычислительной гидрогазодинамики.

Преимущество численного компьютерного моделирования физических процессов перед натурным экспериментом:

– сокращение времени при совершенствовании и проектировании новых конструкций;

– возможность моделировать условия, не воспроизводимые при натурных испытаниях;

– получение более полной и разносторонней научной и практической информации об исследуемом объекте;

– экономическая эффективность компьютерных расчетов на порядок выше проведения эксперимента;

– возможность быстрой корректировки расчетной модели позволяет эффективно использовать время исследований и существенно его сократить.

При численном решении гидродинамических задач требуется решить задачу из четырех независимых уравнений Навье-Стокса и описывающую основные законы сохранения – массы, импульса и энергии в дифференциальной форме. Данные уравнения подробно рассмотрены в [3, 4].

Цели исследования

1. Проверка применимости программного комплекса ANSYS CFX для расчета стационарного пространственного течения в компрессорной ступени ТКР на основе верификации полученных данных в ходе численного расчета и реального экспериментального испытания турбокомпрессора.

2. Обработка универсальной методики численного исследования компрессорной ступени ТКР для получения достоверного результата с целью совершенствования геометрии проточной части колеса, улитки, снижения газодинамических потерь в процессе сжатия воздуха.

Использованный алгоритм проведения численного эксперимента:

– постановка задачи (определение исходных данных);

– построение геометрии газодинамической области движения воздуха – домена в программном комплексе для трехмерного моделирования Unigraphics NX;

– создание сеточной модели домена путем генерации сетки в сеточном генераторе Icem CFD;

– создание расчетной модели с назначением граничных условий в ANSYS CFX на основании сеточной модели;

– верификация полученных численных результатов с экспериментальными данными.

Объектом исследования является компрессорная ступень турбокомпрессора ТКР 7С-6 ОАО «КамАЗ».

Экспериментальное определение характеристики компрессорной ступени турбокомпрессора ТКР 7С-6 были получены на безмоторном стенде для испытания турбокомпрессоров транспортных двигателей в НТЦ ОАО «КамАЗ» [6].

Численным моделированием определены интегральные газодинамические параметры воздуха при различном режиме работы компрессорной ступени ТКР 7С-6: давление на входе $P_{\text{вх}}$ и на выходе $P_{\text{вых}}$, степень сжатия воздуха в компрессоре π_k, температуры на выходе из компрессора, а также линия тока воздуха в компрессоре, поля скоростей, давлений, температур, температурные напряжения внутренней части корпуса компрессора (рис. 1 и 2), а также вихревые зоны.

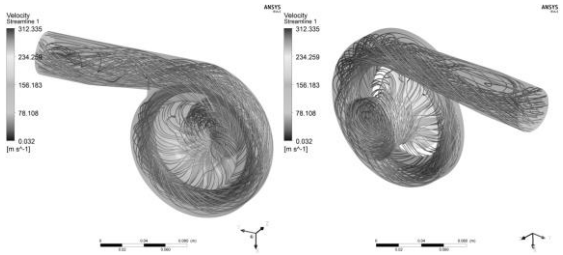


Рис. 1. Линии тока воздуха в проточной части компрессора

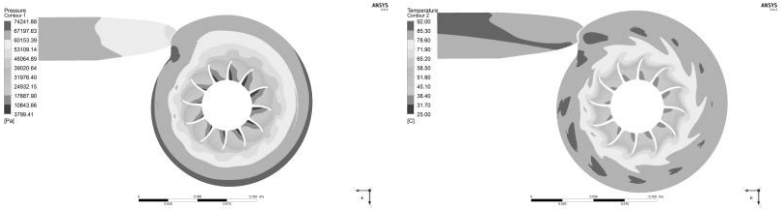


Рис. 2. Поле давления, температур воздуха в характерном сечении компрессора

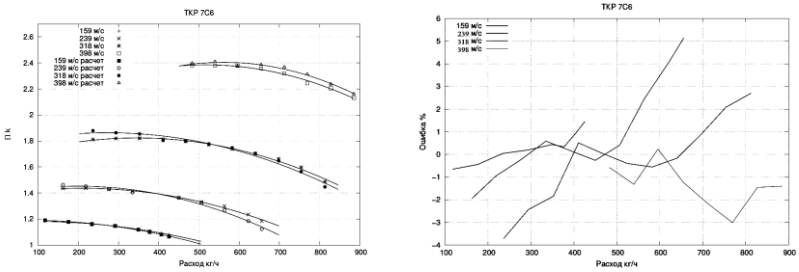


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик компрессорной ступени турбокомпрессора ТКР 7С-6. Отклонение расчета и эксперимента

Для корректности сравнения результатов численного и натурного экспериментов по определению характеристик турбокомпрессора ТКР 7С-6 расчет проводился в точках с одинаковыми расходами. На рис. 3 сравнение представлено в графическом виде.

Выводы

1. Численное моделирование позволяет получить данные о распределении потока воздуха внутри компрессора, а также увидеть картину распределения скорости и давления (полного и статического) при нестационарном и стационарном течении воздуха в проточной части компрессора. Очевидно, что такие результаты практически невозможно получить с помощью натурных испытаний.

2. Численный эксперимент в программном комплексе ANSYS CFX позволит проводить оптимизацию колеса, проточной части компрессора, улитки с целью усовершенствования компрессорной ступени ТКР-7С-6, а также для последующего выполнения прочностного расчета деталей. Благодаря этому возможно повысить мощность и устойчивую работу дизельного двигателя.

3. Основным достоинством численного моделирования является снижение времени и материальных средств при создании и оптимизации турбокомпрессоров.

4. Создана и апробирована численная методика расчета турбокомпрессора, с помощью которой можно совершенствовать уже имеющуюся конструкцию и проектировать новые компрессорные ступени ТКР.

Работа выполнена в рамках договоров с Министерством образования и науки РФ от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.004 и от 4 марта 2014 г. № 14.Z50.31.0003.

ЛИТЕРАТУРА

1. ANSYS: website. – Available at: http://ansys.com/ (accessed: 10.06.2014).
2. Gnuplot homepage. – Available at: http://gnuplot.info/ (accessed: 15.06.2014).
3. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.
4. *Кавтарадзе Р.З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
5. *Иванченко Н.Н.* Высокий наддув дизелей. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 198 с.
6. *Лущеко В.А., Кучев С.М., Никишин В.Н.* Безмоторный стенд для проведения испытаний турбокомпрессоров автомобильных дизелей // Известия ВолгГТУ. – 2013. – Т. 5, № 12 (115). – С. 49–51.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В ВОЗДУХЕ НА СКОРОСТЬ ГАЗИФИКАЦИИ КОКСОВОГО ОСТАТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ

С.А. Янковский, К.В. Слюсарский, К.Б. Ларионов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, konstantinsv@tpu.ru

В статье проведено исследование влияния влажности воздуха на скорость окисления коксового остатка угля с помощью STA 449. Было установлено, что увлажнение воздуха приводит к повышению интенсивности процесса на 15 %. Анализ результатов с использованием модели реакции *n*-го порядка выявил, что рост обусловлен увеличением КПД, учитывающего влияние внешней диффузии.

This work presents experimental investigation of the influence of air humidity on char oxidizing dynamics using STA 449. It was found, that the air humidification cases increasing of the process intensity on 15 %. Analysis of results using n^{th} order reaction model suggests that this growth is caused by the increasing of the external effectiveness factor.

Газификация и горение угля – сложный процесс, состоящий из нескольких стадий и химических реакций, влияющих на кинетику процесса [1]. Поскольку скорость газификации угля существенно ниже скорости его горения [1], особенно актуально увеличение интенсивности этих реакций для газификаторов различных видов.

Известно [1], что механизм получения синтез-газа – многостадийный процесс: стадия прогрева и подсушки частицы, этап возгонки летучих, фаза газификации коксового остатка. В работе [2] отмечено, что лимитирующей стадией является газификация коксового остатка. Результат анализа исследований [1, 2] показал, что внешней диффузией при газификации твердых топлив (каменный уголь) пренебрегают, поскольку ее влияние легко нивелировать, увеличив скорость и изменив состав потока окислителя [2].

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований влияния параметров окислительной среды и влажности воздуха на скорость окисления углерода в коксовом остатке.

Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента использовался термогравиметр (ТГА) STA 449 F3 Jupiter, позволяющий одновременно регистрировать изменения массы образца, экзо- и эндотермические процессы.

В качестве исследуемого образца анализировался подсушенный уголь шахты Листвянская Кузнецкого месторождения. Использовалась фракция угля размера 0,08 мм как наиболее приближенная к реально используемым в газификаторах. Определение влажности и зольности угля проводилось в ТГА в атмосфере воздуха и продувочного аргона. Результаты: содержание влаги 4,95 %; золы – 20 %; летучих – примерно 15 %; возгонка начинается при температурах 573…673 К; площадь удельной поверхности, определенной методом БЭТ, составляет 6,0…6,1 $м^2/г$.

Методика эксперимента и расчет средней истинной скорости реакции

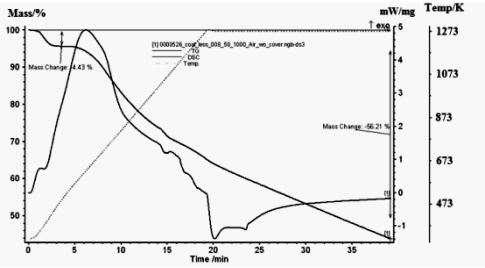
В корундовый тигель помещался образец угля массой 20 г. В камеру с образцом подавалась смесь аргона с воздухом в соотношении 3:1 для снижения скорости реакции и нивелирования влияния внутренней диффузии. В опытах с увлажнением относительная влажность подаваемого воздуха равна 100 % при данной температуре. Объемный расход смеси составил 0,04 л/мин. Скорость нагрева образца – 50 К/мин в течение 20 мин до температуры 1273 К.

Известно, что неполное окисление углерода является эндотермической реакцией, в то время как полное окисление проходит с выделением тепла. Поэтому преобладающую реакцию можно определить по тепловому эффекту процесса.

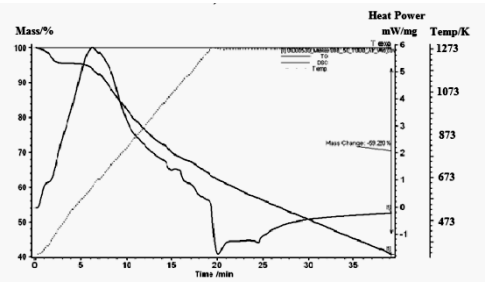
Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке. Колебания величины теплового потока в период нагрева и соот-

ветствующие изменения массы иллюстрируют процессы пиролиза при температурах порядка 673…873 К. Уменьшение массы на участке изотермической выдержки можно объяснить полным или частичным окислением углерода.



а



б

Рис. 1. Результаты эксперимента в атмосфере сухого (*а*) и влажного (*б*) воздуха

Рассматриваемые реакции, характерные при изотермической выдержке угля в ТГА, являются эндотермическими, т. е. доминирующей в этой фазе является реакция неполного окисления углерода. Считая истинную скорость реакции постоянной, сравнение ее усредненных значений показывает, что изменение обусловлено различными значениями коэффициентов, учитывающих внешнюю диффузию окислителя: $\eta_{\text{ex}}^{\text{hum}} \big/ \eta_{\text{ex}}^{\text{dr}} = R_{\text{app}}^{\text{hum}} \big/ R_{\text{app}}^{\text{dr}} = 1{,}15$.

Увлажнение воздуха перед подачей в ТГА позволяет увеличить скорость окисления углерода на 15 %, что обусловливается повышенной активностью водяного пара как окислительной среды при газификации угля согласно [3]. Незначительное содержание пара

(0,005 г/см^3) существенно повышает активность окислительных процессов. Данный факт подтверждает нелинейный характер зависимости КПД, учитывающего внешнюю диффузию (от содержания водяного пара в атмосфере).

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Проанализированы образцы угля шахты Листвянская Кузнецкого месторождения; определены их влажность, зольность и содержание летучих.

2. Два образца угля исследованы в ТГА в атмосфере смеси аргона и воздуха в условиях недостатка кислорода с увлажнением и без него. Анализ изменения массы показал доминирование неполного окисления углерода.

3. Анализ результатов эксперимента при помощи модели реакции n-го порядка показал нелинейный характер зависимости поправочного коэффициента, учитывающего внешнюю диффузию, от содержания влаги в воздухе.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» Мероприятие 1.4. ГК 14.581.21.0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Smoot L.D., Pratt D.T.* Pulverized coal combustion and gasification. – New York: Plenum Press, 1994.

2. *Kim R.-G., Hwang C.-W., Jeon C.-H.* Kinetics of coal char gasification with CO2: Impact of internal/external diffusion at high temperature and elevated pressure // Applied Energy. – 2014. – Vol. 129. – P. 299–307.

3. *Song J., Jeon C.-H., Boehman A.L.* Impacts of oxygen diffusion on the combustion rate of in-bed soot particles // Energy & Fuels. – 2010. – Vol. 24, iss. 4. – P. 2418–2428.

СОДЕРЖАНИЕ

Подсекция 1. Новые технологии в электроэнергетике

Айтказина С.М., Строганов Д.А., Тлеулесов А.К. Перспективные технологии утилизации золошлаковых отходов Павлодарской ТЭЦ-1 5

Андреев М.В., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Стенд на базе гибридного моделирующего комплекса реального времени для настройки и проверки систем защиты и управления 8

Армеев Д.В., Арестова А.Ю., Абрамова Я.А. Применение средств силовой электроники в системах типа микрогрид.....11

Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Уфа Р.А. Улучшенное моделирование статического преобразователя напряжения устройств FACTS и HVDC систем в гибридных программно-технических средствах моделирования реального времени энергетических систем 14

Возисова О., Егоров А., Трембач А. Конструктор электроэнергетических систем. Выключатель Simens 3API DT 145kV 17

Глотов А.А., Денчик Ю.М., Ковалева Н.А. Основные факторы влияния на качество функционирования электрических сетей северных месторождений полезных ископаемых.....20

Глущенко А.И., Еременко Ю.И., Цуканов М.А. Мультиагентная система-советчик диспетчера энергосистемы 23

Горте О.И., Хмелик М.С. Накопитель энергии как средство противоаварийного управления микроэнергосистемой.....27

Дворцов Е.А. Обоснование строительства малых ГЭС в Республике Тыва.....31

Достовалова С.С., Бирюк В.В., Угланов Д.А. Использование вихревой ветроэнергетической установки в условиях климата среднего Поволжья.....34

Манусов В.З., Бойко К.Н. Построение функций принадлежности 37

Отрощенко А.А., Чернов С.С. Применение мировой практики строительства и эксплуатации систем на основе ВИЭ в России.....40

Радионов А.А., Маклаков А.С., Карякина Е.А. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты 43

Русина А.Г., Русин Г.Л., Горевая Е.С. Разработка имитационной модели портфеля проектов предприятий энергетики 45

Сатдарова Н.М., Ненашев М.В., Рогожин П.В. Технологические аспекты замены медных втычных электрических контактов на алюминиевые 48

Скурихина К.А., Арестова А.Ю., Армеев Д.В. Исследование динамических свойств MicroGrid при параллельной работе с энергосистемой 52

Смирнов Н.Н., Захаров В.М., Румянцев Е.С. Тройной энергетический эффект в системах энергоснабжения зданий от использования автоматизированных энергосберегающих окон 56

Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Зубова Н.В. Исследование влияния струйного привода на величину подъемной силы лопасти ветроустановки.....59

Фишов А.Г., Клавсуц И.Л., Клавсуц Д.А. Компромиссное децентрализованное регулирование напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией и управляемой компенсацией реактивной мощности 63

Подсекция 2. Управление режимами работы электроэнергетических систем

Бай Ю.Д., Шмойлов А.В. Полные вероятностные характеристики многомерных функциональных зависимостей задач электроэнергетики 66

Близнюк Д.И., Банных П.Ю., Хальясмаа А.И. Программная реализация расчета установившегося режима сетей с четырехфазными передачами 69

Гладкий Д.И., Едемский С.Н., Ивлев М.Л. Совершенствование режимов функционирования электроэнергетической системы Архангельской области посредством применения объединенного регулятора потока мощности 71

Глазырин Г.В., Казанцев Ю.В., Твердохлебов Н.Н. Моделирование переходных процессов поворотно-лопастных гидротурбин с учетом пропеллерных режимов 75

Глазырин Г.В., Твердохлебов Н.Н., Казанцев Ю.В. Оптимизация режимов работы гидроэлектростанций методом уравнивания удельных приростов с учетом напора нетто 78

Глазырин Г.В., Шаюк С.М. Разработка алгоритмов группового управления активной мощности ТЭС 82

Зайцев Е.С., Лебедев В.Д. Разработка тепловых схем замещения для оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий в режиме реального времени 85

Литвинов И.И., Глазырин В.Е., Осинцев А.А. Моделирование переходных процессов в трехфазных силовых трансформаторах 88

Манусов В.З., Халдаров Ш.К. Регулирование скорости ветроустановки с максимальным извлечением мощности на базе нечеткой логики 92

Мятеж Т.В. Анализ влияния высших гармоник при работе асинхронного двигателя с частотным преобразователем ACS 550 на режим электрической сети 95

Поляков И.Д., Дмитриев С.А., Чусовитин П.В. Выравнивание суточного графика потребления при помощи введения двухтарифной оплаты мощности 98

Русина А.Г., Акульшина П.А. Разработка принципов эквивалентирования для элементов электроэнергетической системы 100

Секретарёв Ю.А., Митрофанов С.В., Султонов Ш.М. Принятие решений при внутристанционной многокритериальной оптимизации состава агрегатов ГЭС.....103

Султонов Ш.М., Секретарёв Ю.А., Митрофанов С.В. Назначение оптимальных режимов энергосистемы Таджикистана.....107

Филиппова Т.А., Совбан Е.А. Методы и задачи оптимального использования ГЭС в ЭСС 110

Фишов А.Г., Фролов М.Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах 113

Чебан В.М., Толкацкий Р.А. Использование вращения статора для повышения управляемости электрических машин переменного тока 116

Шевцов Д.Е. Опыт применения синхронного вакуумного выключателя в электрической сети среднего напряжения.....119

Подсекция 3. Диагностика и надежность работы электрооборудования

Ахмедова О.О., Сошинов А.Г. Анализ способов борьбы с гололедными образованиями на ЛЭП 123

Белоглазов А.В. Интеграция системы вибрационного контроля генератора и турбины в АСУ ТП гидроэлектростанции 126

Бычков А.Л., Коробейников С.М., Овсянников А.Г. Исследование частичных разрядов в трансформаторном масле на переменном напряжении в системе электродов «острие–плоскость» 129

Васильева М.В. Организационно-экономический механизм обеспечения адресной надежности электроснабжения 132

Дербенёв В.В., Жданович А.А., Панова Я.В. Анализ эксплуатационного состояния оборудования при принятии решений в управлении гидроэлектростанцией.....135

Евдокимов С.А., Карандаева О.И., Кондрашова Ю.Н. Методика расчета надежности электрооборудования тепловой электростанции 138

Евдокимов С.А., Николаев А.А., Леднов Р.А. Мониторинг технического состояния силовых трансформаторов промышленных электрических сетей 142

Казакова С.А. Использование линейных разрядников для обеспечения безопасности при проведении работ под напряжением 145

Керимкулов Н.Н., Левин В.М. Статистический анализ диагностических признаков для оценки состояния маслонаполненного оборудования 148

Конова Е.А., Ференец А.В. Поведение измерительного органа сопротивления дистанционной защиты при наличии подпитки 151

Корнев В.А., Шмойлов А.В. Анализ и требования к релейной защите электрических сетей 155

Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Бычков А.Л. Определение характеристик частотозависимого устройства при проведении сильноточных испытаний 158

Лебедев В.Д., Яблоков А.А. Исследование метрологических характеристик и антирезонансных свойств трансформатора напряжения с разомкнутым магнитопроводом 161

Марюшко Е.А. Причины выхода из строя вводов с RIP-изоляцией 165

Мюльбаер А.А. Исследование механизма разрушения стальных изолированных конструкций переменным током в энергетике 168

Нестеров Д.А. Оценка аварийных ситуаций силовых трансформаторов при помощи тепловизионного анализа 173

Садвакасов К.С., Ларичкин В.В., Арынгазин К.Ш. Состояние промышленной безопасности и вопросы экозащиты на предприятиях энергетики Павлодарской области 176

Сафронов А.С. Особо точные системы измерений на гидротехнических сооружениях 179

Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Быкова Н.В. Контроль металла поврежденного ротора паровой турбины спектрально-акустическим и ультразвуковым методами 182

Суворов А.А. Определение поврежденной фазы при замыкании на землю в сетях горно-шахтного оборудования 185

Титов Д.Е., Сошинов А.Г., Шевченко Н.Ю. Принципы работы термодинамического способа мониторинга гололеда на проводах воздушных линий 188

Титов Д.Е., Угаров Г.Г., Сошинов А.Г. Учет влияния электрического поля у поверхности провода на образование гололеда 191

Утеулиев Б.А., Тарасов А.Г., Целебровский Ю.В. Индукционные наводки в оттяжках опор ВЛ 500 кВ и переменные токи, стекающие в грунт с анкерных креплений 194

Хальясмаа А.И., Балтин Д.А., Бабушкина Н.А. Эффективность внедрения системы оценки состояния электрооборудования 197

Подсекция 4. Теплоэнергетика, теплотехника, топливоиспользование и энергоэффективность

Афанасьев А.В., Мельников А.А., Васьков М.И. Возникновение и развитие стресс-коррозионных дефектов в стальных трубах большого диаметра газопровода высокого давления 199

Байгулова А.И., Бубенчиков А.М., Матвиенко О.В. Математическое моделирование горения метановоздушной смеси в канале с приосевой пористой вставкой 203

Бойко Е.Е., Овчинников Ю.В. Исследование распыливания воспламенения и сжигания ИКЖТ в котлоагрегате с циклонным предтопком.....206

Брайко А.С., Амосов Ю.И., Кириллов В.А. Исследование катализаторов на пено- и порометаллических носителях в реакции паровой конверсии метана.....209

Бубенчиков М.А., Потекаев А.И., Бубенчиков А.М. Миграция наночастиц в рабочих средах теплообменных систем 212

Бубенчиков М.А., Потекаев А.И., Бубенчиков А.М. Дифференциальная проницаемость графеновой пластинки с дефектом в кристаллической структуре 215

Герцык С.И., Туктаров Д.Б. Влияние параметров сжигания топлива на концентрацию оксидов азота в продуктах горения 218

Гречухина М.С., Кондратенко П.К., Мурзин А.Ю. Оценка возможности использования твердых топлив для получения электроэнергии 221

Гусев М.П., Данилов В.Л. Обратная задача ползучести при контактном взаимодействии элементов тепловыделяющей сборки энергетического реактора 225

Диль Д.О., Тарасов Е.А. Математическая модель фильтрации метана и флюида в анизотропных пластах.....228

Дружинин Г.М., Самойлович Ю.А., Попов Е.В. Решение задачи нагрева металла в печи с учетом импульсного характера отопления.....231

Еремин А.В., Стефанюк Е.В., Абишева Л.С. Теплопроводность в пластине с изменяющимся во времени источником теплоты.....234

Ибрагимова Л.Ф., Григорьева О.К. Повышение эффективности паротурбинных энергоблоков за счет применения фреоновых ступеней 238

Ковалев А.А., Кожемякин А.А., Коновалов В.В. Уточнение энергетического состояния пласта на фильтрационной модели посредством трассерных исследований.....241

Кулаков П.А., Кулакова А.Ф. Многофакторное прогнозирование потребления газа населением.....245

Лебедев М.С., Лебедев А.С. Комплекс по производству сжиженного природного газа на базе ГРС-4 Новосвердловской ТЭЦ 248

Маркелова А.М., Трифонов А.И., Ольховская В.А. Модель двухфазной фильтрации для нелинейно вязкопластичной нефти в присутствии активной водной фазы.....251

Немущенко Д.А., Леготин А.В., Полякова Н.С. Разработка режима высокотемпературной обработки строительной керамики на основе твердых отходов 254

Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В., Кузнецов Г.В. Измерение скорости испарения капли водно-солевого раствора в условиях интенсивного нагрева 257

Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Бродов Ю.М. Влияние высокочастотной газодинамической нестационарности на теплоотдачу в газовых потоках двигателей внутреннего сгорания 260

Попов М.В., Першина Д.А., Кувшинов Г.Г. Перспективы применения и особенности получения метано-водородной смеси как экологичного топлива для ДВС.....263

Рыльский А.Е., Боруш О.В. Воздушный конденсатор как способ охлаждения пара 266

Ханжина В.Е., Ковалев А.А., Зиновьев А.М. Влияние энергетического режима залежи высоковязкой нефти при проектировании добычи 269

Хасанов Р.Р., Гуреев В.М., Хайруллин А.Х. Численное исследование газодинамических процессов в компрессорной ступени турбокомпрессора транспортного дизеля 273

Янковский С.А., Слюсарский К.В., Ларионов К.Б. Исследование влияния содержания водяного пара в воздухе на скорость газификации коксового остатка с использованием термогравиметрии 277

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА. МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭЭМ – 2014

Сборник научных трудов I международной научной конференции молодых ученых

В трех частях

Часть 2. Секция ЭНЕРГЕТИКА

г. Новосибирск, 2–6 декабря, 2014 г.

В авторской редакции

Выпускающий редактор *И.П. Бровановa*
Корректор *Л.Н. Киншт*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 24.11.2014. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 70 экз.
Уч.-изд. л. 16,74. Печ. л. 18,0. Изд. № 216. Заказ № 1365. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20