Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Technische Universität Ilmenau
Администрация городского округа – город Волжский
ПАО «Россети»
Филиал ПАО «МРСК Юга» – «Волгоградэнерго»
ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго»
Филиал ПАО «РусГидро» – «Волжская ГЭС»
ПАО «Системный оператор – ОДУ Юга»
Филиал ПАО «ФСК ЕЭС» «Магистральные электрические сети Центра» (МЭС Центра)
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

НАУКОЕМКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

15–17 мая 2018 г.

Волжский, 2019

УДК 620.9+621.3+681.5
ББК 31

Организационный комитет:
Султанов М.М. (председатель), Ханнес Тёпфер (сопредседатель),
Желбаков И.Н., Курьянов В.Н., Гитцельс М., Болдырев И.А.,
Кульков В.Г., Жилина В.И., Лысакова Ж.А.

Наукоемкие инновационные технологии и экологическая безопасность в энергетике: Международная научно-практическая конференция, г. Волжский, 15-17 мая 2018 г. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2019. – 201 с.

ISBN 978-5-94721-130-6

УДК 620.9+621.3+681.5
ББК 31

ISBN 978-5-94721-130-6

© Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
в г. Волжском, 2019
© Авторы, 2019

Уважаемые гости, участники Конференции, друзья!

Для меня большая честь приветствовать всех участников Академического коллоквиума Германского инженерного факультета МЭИ – Технического университета г. Ильменау (ФРГ) и открыть его. Прежде всего потому, что очень высок уровень соучредителей этого коллоквиума и состава участников. Главной научной темой являются актуальные вопросы тепло- и электроэнергетики, образования и образованного человека. Век науки, знаний и высоких технологий немыслим без становления нового качества высшего образования. Здесь необходимы совместные усилия всех, кто связан с образовательной сферой не только в России, но и в зарубежных странах. Главной остается задача не потерять накопленный потенциал, сберечь все лучшее в российском образовании и обогатить опытом международных научных и образовательных школ, не допустить снижения качества в подготовке специалистов.

Хочу поздравить всех участников коллоквиума с предстоящей интересной плодотворной работой и выразить благодарность за поддержку в организации мероприятия руководству НИУ «МЭИ» в лице ректора Николая Рогалёва и ТУ Ильменау в лице ректора Петера Шарфа.

Директор филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском
М.М. Султанов

СОДЕРЖАНИЕ

Шунаев С.А., Андреенков Е.С. Разработка источника электроэнергии для автономных систем технических средств охраны на базе возобновляемого источника энергии……. 6
Evseev K.V., Boldyrev I.A. Process-dependent parameters assessment software design as a part of acs for energy industry…… 13
Рожков В.В. Тенденции развития современного асинхронного электропривода…… 19
Скопова Е.М., Султанов М.М. Исследование динамики известных систем регулирования мощности турбоагрегатов и их влияние на надежность……. 28
Гришин С.С. К вопросу моделирования процессов в волновых автоколебательных ветродвигателях……... 33
Бондаренко А.В., Стрижиченко А.В. Определение границ теплового влияния грунтового теплообменника теплового насоса…… 37
Головтеева А.Н., Росляков П.В. Разработка программного комплекса для реализации алгоритма оптимального выбора наилучших доступных технологий…….. 42
Kuponosova V.S., Andryushin A.V. Conceptual basics of managing production assets in the energy sector…… 46
Кульков В.Г., Сыщиков А.А. Уширение пиков зернограничного внутреннего трения…. 48
Гурин Р.В., Гончарова Л.К. Особенности эксплуатации ионитов на атомных электрических станциях……. 52
Проскунина Г.И., Карпенко И.А., Бекметов Т.И. Оценка риска влияня предприятий теплоэнергетики на окружающую среду…….. 55
Гомазков Д.С., Кирносов М.С., Зенина Е.Г. Анализ критериев оценки остаточного ресурса обмоток силовых трансформаторов……..…….. 59
Миронов Д.И. Перспективы перехода от традиционной энергетики к водородной…… 65
Гусева Ю.В., Водопьянов В.В. Исследование и разработка предложений по оптимизации работы предочистки системы оборотного охлаждения трубопрокатного стана SR-9 АО «Волжский трубный завод»……... 67
Чепрасов С.А., Зенина Е.Г. Технико-экономическое обоснование внедрения силовых трансформаторов нового поколения с аморфными магнитопроводами в системах электроснабжения…… 70
Абрамов П.А., Абрамова Ю.В., Султанов М.М. Исследование оптимального режима работы паровых котлов ТЭЦ на ОРЭМ……. 75
Бешкарева В.А., Ретивов Д.Ю. Экологическая безопасность теплоэнергетических установок…….. 78
Байдакова Н.В. Применение бесситового метода для классификации шлаковых отходов…. 82
Пруцков А.А., Одоевцева М.В. Разработка комплексных мероприятий по снижению потребления теплоэнергоресурсов на промышленных предприятиях…….. 84
Gorban Yu.A. Research of dynamic characteristics of signals for calculation of technical and economic indicators and increase in power efficiency of the equipment of thermal power plant…… 87
Васильева И.Л., Морозова А.А., Смольянинова А.С. Математическое моделирование нестационарных температурных режимов проводов линии электропередачи…… 89
Рябов А.Ю., Стрижиченко А.В. Анализ применения фазоповоротного трансформатора в филиале ПАО «РусГидро» – «Волжская ГЭС»……. 95
Курьянова Е.В., Султанов М.М. Анализ стратегии развития передовых технологий мини-ТЭЦ в теплоэнергетике……. 98
Терентьев Г.Ф., Султанов М.М., Пивченко А.В., Курьянова Е.В. Некоторые аспекты развития водородных энергетических систем…….. 101

Капля Е.В. Энергетическое условие начала процесса рыскания горизонтально-осевой ветроэнергетической установки…….…… 105
Шамсиев М.А., Терентьев Г.Ф. Тепловибромониторинг конденсатных насосов……... 109
Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Сухова Т.А., Светличная В.Б., Матвеева Т.А. Определение параметров микроразмерных металлических структур электрического взрыва проводников…… 115
Цирульников П.П., Кульков В.Г. Демпфирующая способность металла, содержащего границы зерен с дефектной структурой…… 120
Желясков С.С., Скопова Е.М., Желяскова О.И., Зенина Е.Г. Анализ применения частотно-регулируемого электропривода в работе грузоподъемных механизмов электростанции…… 123
Желясков С.С., Желяскова О.И., Султанов М.М. Исследование надежной и эффективной работы Волгоградской энергосистемы при аварийном отключении ТЭЦ……... 127
Кульков В.Г., Кулькова В.В. Высокотемпературный фон внутреннего трения в наноструктурных материалах……. 130
Савич С.С. Изучение условий применения сорбентов марки АПТ в схемах водоподготовки в теплоэнергетике…… 136
Хаванский Н.Г., Жилина В.И. Разработка методики оценки качества и надежности насосного оборудования в условиях рыночного предложения…….. 139
Васильева И.Л., Морозова А.А. Использование интерполляционных методов численного моделирования и оценка качества результатов при расчете температурных режимов теплоэнергетического оборудования…… 143
Тикаиди В.И., Одоевцева М.В. Исследование и оптимизация режимов действующей установки обратного осмоса трубопрокатного цеха Волжского трубного завода…….. 149
Дорофеев Ю.Н., Спиридонов Д.А., Макаренко Е.А., Одоевцева М.В. Выбор и оптимизация технологии химической очистки мембранных элементов обратного осмоса……... 153
Янина Д.С., Широбоков Д.Е., Зенина Е.Г. Анализ технических решений выполнения релейной защиты для линий дальнего резервирования на воздушных линиях с ответвлениями…… 157
Широбоков Д.Е., Янина Д.С., Султанов М.М. Анализ методик прогнозирования отказов электрооборудования ЛЭС……... 163
Дубровин Д.М., Султанов М.М. Оптимизация потерь в трёхфазном электродвигателе переменного тока……. 168
Севастьянов Б.Г. Структура САР повышенной надежности……. 171
Пивченко А.В., Шевцова С.Б., Терентьев Г.Ф. Моделирование теплофизических процессов, протекающих в водородном генераторе…… 176
Голишников Н.Н., Агринская С.А. Исследование и разработка системы управления насосной станцией тепловой сети г. Волжского……. 180
Целуйко Е.Н., Султанов М.М. Возможность применения количественного регулирования тепловой нагрузки в г. Волжском без изменения существующей структуры тепловых сетей…….. 185
Якимович Е.В. Организация самостоятельной работы по иностранному языку при модульно-цикловом обучении…… 188
Колесников И.В., Курьянов В.Н. Применение малой генерации в едином цикле производства энергии…….. 191
Толстоноженко Н.М., Артёмов А.А., Курьянов В.Н. Исследование надежности в энергосистеме……... 194
Leu C. Electrical Power Technologies……. 198

УДК 620.97

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОХРАНЫ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

С.А. Шунаев – ассистент
Е.С. Андреенков – канд. техн. наук
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье приводится опыт разработки источника электрической энергии для автономных систем технических средств охраны с возможностью комбинирования преобразователя первичной энергии в электрическую и гибридного накопителя электроэнергии. Представлена схема разработанного устройства, а также логическая схема гибридного накопителя электрической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня электрификация на территории Российской Федерации стоит на достаточно высоком уровне. Однако нередко возникают ситуации, когда для электроснабжения потребителей нецелесообразно осуществлять технологическое присоединение к электрическим сетям. Примером такой ситуации является электроснабжение автономных систем технических средств охраны (ТСО) линейных объектов топливно-энергетического комплекса, а также быстро развёртываемых систем охраны периметра. В таких случаях необходимы передвижные или переносные устройства электрической генерации.

Если речь идет об энергоемких системах потребляемой мощностью в десятки киловатт, то неоспоримое первенство здесь имеют передвижные дизельные электростанции. Однако элементы современных систем ТСО являются потребителями малой мощности. В этом случае становится целесообразным применение устройств альтернативной энергетики. В данном контексте наибольший интерес представляют устройства с источником энергии (ИЭ) на базе светоэлектрических преобразователей и ветроэнергоустановки, так как они не требуют подачи топлива.

Одной из специфических особенностей систем ТСО является увеличение числа потребителей в режиме тревожного оповещения (включаются светозвуковые оповещатели, передатчики тревожного сигнала и т. д.). Это приводит к резкому росту потребляемой мощности в данном режиме. Для того чтобы повысить стабильность напряжения, а следовательно, и надежность всей системы ТСО при переходе из охранного режима в тревожный, перспективным является применение накопителя электрической энергии специального исполнения, представляющего гибрид аккумулятора и батареи суперконденсаторов для демпфирования пиков нагрузки.

Другой проблемой устройств, применяемых в области ТСО, является возможность использования только одного источника энергии из перечисленных. Поэтому большой интерес представляет разработка автономного устройства электроснабжения ТСО, позволяющего комбинировать различные источники энергии в зависимости от конкретной ситуации и использующего для накопления электроэнергии гибридную аккумуляторную батарею.

1. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

Согласно техническому заданию, к устройству выдвигались следующие требования:

– возможность использования для электроснабжения в суровых климатических условиях;

– атмосфероустойчивость;

– постоянное выходное напряжение 12 В;

– выходная мощность 75-150 Вт (для стандартного набора устройств линейного комплекта передачи данных);

– обеспечение доступа к сети Internet.

Учитывая перечисленные требования технического задания, устройство для

электроснабжения автономных систем ТСО должно состоять из следующих блоков: светоэлектрического или солнечно-ветрового источника энергии; аккумулятора в качестве накопителя электрической энергии; котроллера заряда для оптимального перераспределения мощности, выдаваемой первичным источником; дополнительного оборудования, расширяющего функциональность устройства. Была разработана структурная схема, отвечающая перечисленным требованиям, представленная на рис. 1.

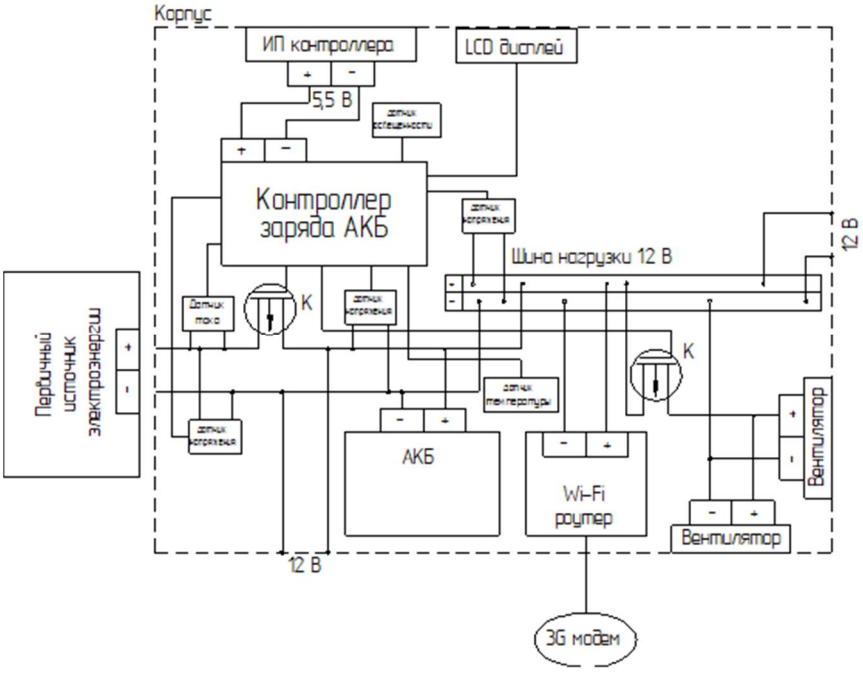


Рис. 1. Структурная схема устройства

Одним из возможных способов реализации этой схемы является использование аппаратной и программной платформы Arduino. Аппаратная платформа Arduino, используемая в качестве контроллера, имеет ряд преимуществ.

1. Экономичность. Стоимость контроллера на базе платы Arduino сравнима со стоимостью ШИМ-контроллера.

2. Многофункциональность (управление системой охлаждения, передача данных через Bluetooth-соединение и т. д.).

3. Ясная и доступная среда программирования. Язык программирования Processing основан на C++, что позволяет использовать библиотеки C++.

4. Возможность расширения и дополнения за счет создания собственных модулей.

В качестве чувствительных элементов используются цифровые датчики тока, напряжения и температуры. В качестве органа управления аккумулятором и первичного источника энергии выступает мощный МОП-транзистор, подключенный к ШИМ-выходу контроллера заряда на базе Arduino. Система охлаждения реализована с помощью транзистора МОП и двух вентиляторов.

2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ КОНТРОЛЛЕРА ЗАРЯДА АКБ

Принципиальная схема разработанного контроллера представлена на рис. 2. Согласно этой схеме, контроллер заряда состоит из нескольких блоков.

Блок контроллера. Это блок транзисторов, которые присоединены к PWM-выходу Arduino. Первый транзисторный ключ с аппаратной платформой – ШИМ-контроллер. С помощью измерительного блока процессор Arduino получает информацию о напряжении батареи. Далее, в результате логических операций, выполняемых в контроллере, на транзистор поступают управляющие импульсы различной длительности, что позволяет изменять напряжение питания.

Второй транзисторный ключ, подключенный к аппаратной платформе, управляется датчиком тока и регулирует работу системы охлаждения устройства. Принцип его работы основан на сопоставлении температуры внутри с допустимой температурой. Таким образом, скорость вращения вентилятора регулируется управляющим импульсом.

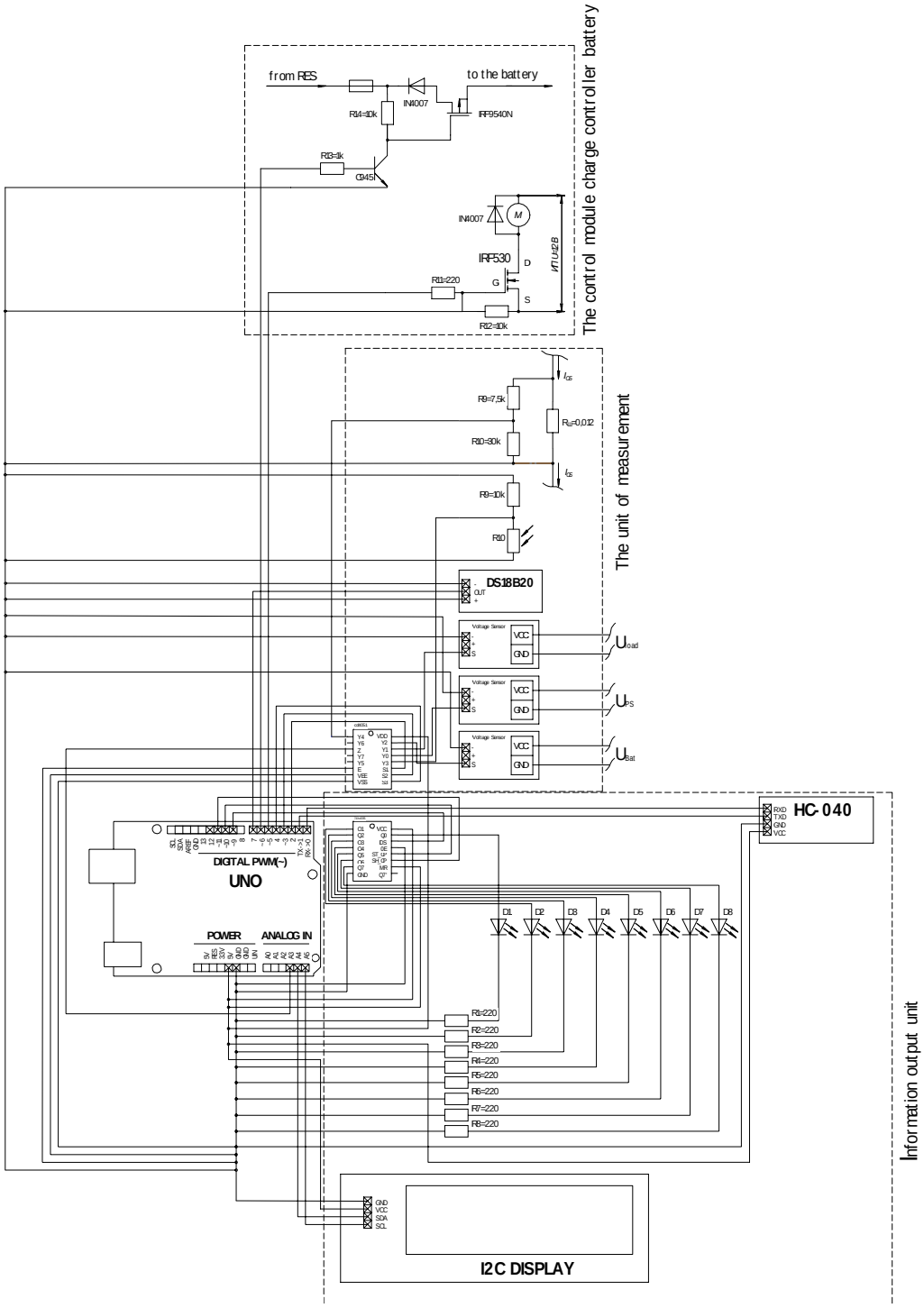


Рис. 2. Принципиальная схема контроллера заряда АКБ

Блок измерения. Этот блок состоит из комплекта датчиков, которые измеряют главным образом параметры прибора. Это датчики напряжения и тока на источнике энергии и батарее, также на шине нагрузки, датчик температуры, датчик освещенности и анемометр. Поскольку число подключенных устройств превышает число аналоговых

выходов, для увеличения числа выходов требуется мультиплексор.

Блок вывода и передачи информации. Этот блок представлен LCD-дисплеем, Bluetooth-модулем, а также 8 светодиодами, подключенными через сдвиговый регистр. Каждое из этих устройств выполняет определенные функции. Светодиоды являются индикатором заряда батареи, который необходим для контроля уровня заряда. На ЖК-дисплее выводится информация о параметрах устройства. Информация также отображается на мониторе порта Arduino, который необходим для проверки программного кода контроллера и графического представления параметров устройства для дальнейшего анализа.

Как говорилось ранее, для накопления электроэнергии в устройстве используются аккумуляторы, которые ввиду разных причин сильно ограничены в электрической емкости, нуждаются в частой подзарядке и имеют ограниченное количество циклов заряда-разряда. На общую картину оказывает негативное влияние тот факт, что режим работы устройства насыщен кратковременными подключениями АКБ, вызванными нестабильностью выработки электроэнергии первичным источником. Также не исключено наличие пиковых нагрузок при подключении большого количества потребителей. Решение обозначенных проблем частично возможно с помощью применения LiFePO4-батарей, так как они обладают следующими преимуществами:

– более длительным сроком службы по сравнению с другими типами литий-ионных аккумуляторов;

– стабильным напряжением разряда;

– возможностью глубокой разрядки без дегенеративных изменений в структуре аккумулятора.

В рамках проектируемого автономного устройства электроснабжения ТСО на базе ВИЭ возможно применение сборки из нескольких LiPO4-аккумуляторов, обеспечивающей напряжение на выводах не менее 12 В и обладающей суммарной емкостью требуемой величины. Однако при питании сборки аккумуляторов нелинейная вольтамперная характеристика ВИЭ уменьшает срок службы АКБ. В результате этого возникает задача применения средств, не допускающих неравномерного заряда сборки АКБ.

Решением данной задачи является установка балансиров, предназначенных для более точного контроля заряда. Это достигается путем включения силового ключа на балластный резистор, параллельного подключаемой секции АКБ, при достижении заданного значения напряжения.

В качестве элемента контроля напряжения был принят регулируемый стабилизатор на базе микросхемы типа TL431, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

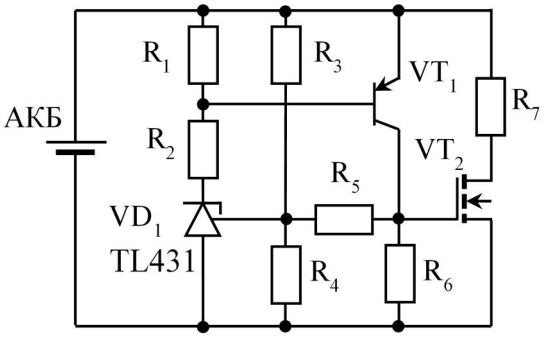


Рис. 3. Схема контроля заряда батарей

Несмотря на то что LiFePO4-аккумуляторы обладают довольно стабильным напряжением разряда, опыт эксплуатации показал, что при включении пиковых нагрузок происходит некоторое изменение выходного напряжения. Данную проблему можно решить путем внедрения в АКБ блока суперконденсаторов, получая, таким образом, гибридный накопитель электроэнергии.

3. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГИБРИДНОГО АККУМУЛЯТОРА

Сглаживание графика нагрузки и уменьшение количества кратковременных подключений положительно влияют на срок службы батареи. Этого можно добиться с помощью промежуточного устройства, имеющего запас электрической энергии, необходимый для заполнения нестабильных участков режима работы источника энергии. Важной характеристикой такого промежуточного звена является большой ресурс при многократных зарядах и разрядах. Таким свойством обладает суперконденсатор.

Принципиальная схема гибридной батареи с использованием суперконденсаторов показана на рис. 4.

Схема работает следующим образом. Когда напряжение на выходе из ВИЭ превышает напряжение батареи и батареи конденсаторов (КБ), на диод VD1 подается прямое напряжение, он разомкнут и пропускает ток, вырабатываемый ВИЭ. Ключ $К_3$ закрыт, происходит потребление электроэнергии для нужд подключенной нагрузки. В режиме зарядки необходимо сначала зарядить батарею конденсаторов, так как это занимает меньше времени. Контроллер заряда посылает сигнал на закрытие ключа $К_2$, КБ начинает зарядку от ВИЭ. Когда КБ полностью заряжен, ток в его цепи становится близким к нулю. Это фиксируется датчиком тока $ДТ_2$, после чего ключ $К_2$ должен быть переключен. Далее по аналогичному принципу идет зарядка аккумулятора.

Снижение напряжения на клеммах ВИЭ фиксируется датчиком напряжения ДН с последующей коммутацией $К_2$. Напряжение КБ превосходит напряжение ИЭ, к диоду в цепи ИЭ прикладывается обратное напряжение, он закрыт. Это необходимо для снижения расхода запасенной в КБ электроэнергии на потери в собственном сопротивлении ИЭ.

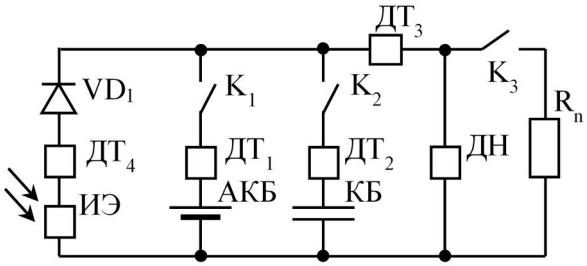


Рис. 4. Принципиальная схема гибридного аккумулятора

Процесс разряда конденсаторной батареи сопровождается снижением напряжения. Достигнув минимально допустимого напряжения фиксации ДН, контроллер заряда сначала посылает сигнал на включение $К_1$, а затем выключает $К_2$. Такая последовательность необходима для сглаживания импульсных скачков напряжения.

Увеличение напряжения на ВИЭ во время процесса разряда, как для конденсатора, так и для батареи, приведет к их последовательной зарядке в соответствии с принципом, описанным выше.

Для выполнения главной задачи – уменьшения количества циклов заряда-разряда АКБ – нужно, чтобы процесс разряда КБ был наиболее продолжительным и достаточным для покрытия недостатка энергии от ВИЭ, чаще всего имеющих нестабильную выработку энергии.

Рассчитаем необходимую емкость КБ. Изменение напряжения КБ происходит по экспоненциальному закону и зависит от ее емкости и сопротивления нагрузки. Процесс описывается следующим выражением:

$$U_C(t) = U_0 e^{\frac{t}{RC}},$$

где U_0 – начальное напряжение конденсаторной батареи, В; R – сопротивление нагрузки, Ом; C – емкость КБ, Ф.

Согласно требованиям технического задания произведем расчет для ИЭ с выходным током 5 А при напряжении на зажимах источника 14 В. За расчетную нагрузку

принимается величина 150 Вт. Такая нагрузка моделируется сопротивлением

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{12^2}{150} = 0{,}96 \text{ Ом}.$$

Оценить минимальную емкость батареи конденсаторов можно следующим образом [6]:

$$C_{\text{мин}} = \frac{\Delta t}{R \cdot \ln\left(1 - \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{100}\right)},$$

где Δt – продолжительность провала напряжения, с; R – сопротивление нагрузки, Ом; $\Delta U_{\text{доп}}$ – допустимое снижение напряжения питания нагрузки, %.

Допустимое снижение напряжения для потребителей – 10 %.

Для выбора емкости конденсаторной батареи нужно задаться продолжительностью провала напряжения на выводах ИЭ. Зададимся длительностью 30 с.

Подставляя численные значения, получим

$$C_{\text{мин}} = \frac{30}{0{,}96 \cdot \ln\left(1 - \frac{10}{100}\right)} = 297 \text{ Ф}.$$

Для комплектации устройства были выбраны суперконденсаторы с номинальным напряжением 2,7 В и емкостью 500 Ф. Последовательное соединение пяти элементов дает напряжение 13,5 В, а параллельное соединение трех цепочек определяет ёмкость батареи в 300 Ф. Таким образом, оптимальная структура энергообеспечения возможна при условии рационального соотношения запасаемой энергии между АКБ и КБ.

При этом можно выделить существенные преимущества устройства электроснабжения ТСО с применением гибридного накопителя:

– суперконденсатор увеличивает ресурс аккумулятора и снижает время отклика устройства на внешние воздействия;

– наличие в составе накопителя суперконденсаторной части позволяет сглаживать фронты импульсов тока и напряжения;

– является перспективной технологией, которая может найти широкое применение.

Представленная на рис. 4 схема является упрощенной. Она призвана проиллюстрировать логику работы и возможности реализации такого способа демпфирования провалов напряжения за счет включения в состав батареи суперконденсаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен вариант устройства автономного электроснабжения ТСО на базе ВИЭ, позволяющего обеспечивать электроэнергией от альтернативных источников линейные комплекты передачи тревожных сигналов систем охраны. Наиболее перспективным вариантом исполнения накопителя энергии является совместное использование аккумуляторной батареи и суперконденсатора. Подобное решение позволит демпфировать провалы напряжения и увеличить надежность работы системы ТСО в целом.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТСО – технические средства охраны;

ИЭ – источник энергии;

ВИЭ – возобновляемый источник энергии;

ШИМ (PWM) – широтно-импульсная модуляция;

АКБ – аккумуляторная батарея;

КБ – конденсаторная батарея;

ДТ – датчик тока;

ДН – датчик напряжения;

U_0 – начальное напряжение конденсаторной батареи, В;

R – сопротивление нагрузки, Ом;

C – емкость КБ, Ф;

Δt – продолжительность провала напряжения, с;

R – сопротивление нагрузки, Ом;

$\Delta U_{\text{доп}}$ – допустимое снижение напряжения питания нагрузки, %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиевский, Д.Д., Шунаев, С.А. Опыт конструирования и эксплуатации портативного источника электроэнергии на основе солнечных панелей / Д.Д.Гордиевский, С.А. Шунаев // МНПК «ЛЭРЭП-9-2015»: Сборник научных трудов по материалам IX Международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 200-204.

2. Андреенков, Е.С. Портативный энергетический харвестр / Е.С. Андреенков, С.А.

Шунаев, Д.Д. Гордиевский // Энергосбережение – теория и практика: Труды Восьмой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. (Москва, 10-13 октября 2016 г.). – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 444-447.

3. Андреенков, Е.С. Опыт разработки источника питания энер-гетического харвестра на основе LiPO4 акку-муляторов / Е.С. Андреенков, С.А. Шунаев, В.А. Дрокин, А.Д. Хорошилов // Энергетика, информатика, инновации-2017: Сборник трудов VII-й Междуна-родной научно-технической конференции. – Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2017. – С. 3-7.

4. Гордиевский, Д.Д. Опыт конструирования контроллера энергетического харвестра на основе аппаратной платформы Arduino / Д.Д. Гордиевский, В.А. Дрокин, С.А. Шунаев // В сборнике «Энергетика, информатика, инновации-2016», в 3-х томах. – Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2016. – С. 19-23.

5. Шунаев, С.А., Кавченков, В.П. Разработка принципиальной схемы датчика контроля напряжения / С.А. Шунаев, В.П. Кавченков // Информационные технологии, энергетика и эконо-мика: Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2016. – С. 82-85.

6. Закроев, И.В. К вопросу о применении гибридного накопителя электрической энергии / И.В. Закроев, О.А. Чеботарева, С.А. Шунаев, Р.И. Язиков, В.С. Ков-женкин // В сборнике: Информационные технологии, энергетика и экономика: Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2016. – С. 21-26.

УДК 681.518.2

PROCESS-DEPENDENT PARAMETERS ASSESSMENT SOFTWARE DESIGN AS A PART OF ACS FOR ENERGY INDUSTRY

K.V. Evseev – undergraduate
I.A. Boldyrev – candidate of engineering sciences
Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

ABSTRACT. In the paper the key features of the developed process-dependent parameters assessment software are described. The goal and t to be solved to meet the requirements are set. The data structure and hierarchy are presented and the software function set is shown as well. In the third and forth chapters the plot digitizing and mathematical expression parser algorithms are described. The last chapter contains the results of the performed research with the software screenshots and the conclusions were made.

1. INTRODUCTION

Process-dependent parameters assessment should be considered in industrial sector, and in energy industry in particular, which includes technical-and-economic indexes evaluating, water chemistry and electrical equipment start/shutdown analysis etc [1]. Carrying out these procedures gives results of process and equipment performance and evaluates operating personnel actions as well, what finds its way into increasing lifetime of equipment and its performance reliability.

The important part of technological process is automated control system (ACS), which purpose is technological process management in order to maintain desired process conditions. ACS consists of the following levels from lowest to highest [2]:

1. Field (sensors and actuators);
2. Control (automation controllers);
3. Informational (transfer buses);
4. Supervisory (monitoring systems).

According to this hierarchy, before the personnel can manipulate data, it should be acquired by sensors on the lowest level, which are connected with controllers, which in their turn are able to transfer it to the highest level. Usually monitoring systems can process obtained data with built-in algorithms, but user mostly have to develop own due to its inaccessibility to be morphed or lack of functions. Therefore, there is standalone software in order to provide user flexible structure for evaluation.

The goal of the research is a universal automated process-dependent parameters assessment software design for carrying out various evaluation tasks. In order to reach the goal the following tasks were set:

1. Defining the software features set;
2. The universal data structure design to provide calculating of any parameter;
3. The mathematical functions set implementation for realization of the algorithms.

In compliance with the afore-named the developed software should meet the following requirements:

- Possibility to edit an assessment algorithm;
- Compatibility with various monitoring systems;
- Flexibility to solve any kind of evaluation task;
- It should be able to save the results;
- Clear and simple user interface.

Thereafter, it should be able to read various databases or/and get data from ACS in any other way as by data import or plot digitizing. Also, the developed software data structure should be universal to carry out any calculation and it should be possible to write mathematical expressions to be executed when the computation runs as well.

2. DATA STRUCTURE

2.1. Data hierarchy

It is true that a parameter contains at least one value if it´s not empty. It should be noticed,

that technological parameters mostly are time-dependent, what means that each instance of parameters value array consists of a datetime and a value itself, nevertheless a parameter can represent either datetime or values only array and it even can contain only one instance. Also, it should be mentioned that not only input data are necessary for assessment, but other values, which are predefined, and mostly they are constants, therefore in the software structure the data grouping is introduced.

On the figure 1 the 3-level data hierarchy is represented: a 2-dimensional array belongs to one parameter, when a bunch of parameters in their turn are contained in one tab, and number of tabs can be more than one. In the structure relations «One-to-many» connect all elements with each other from higher level to lower. As there can be a lot of parameters and a lot of tabs, each of both should have a specific and unique number, address, to refer, which is represented by an integer, and their combination with a point ('.') delimiter grants access to the parameter values, when executing math expressions.

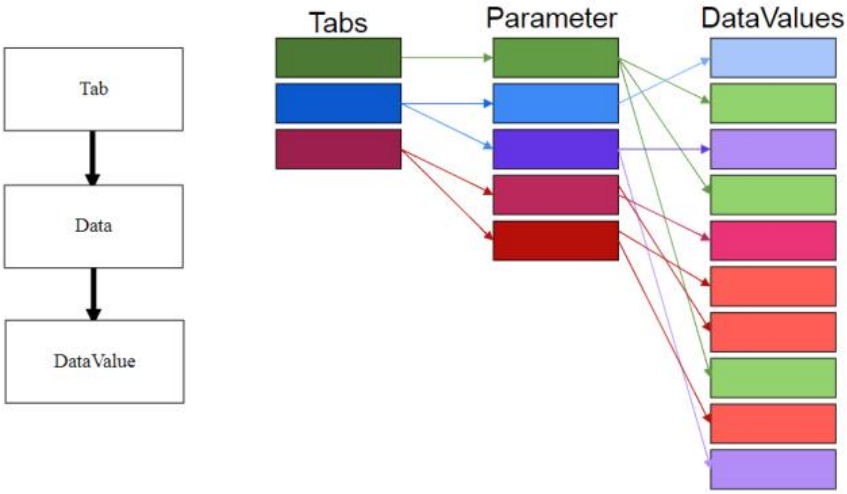


Fig. 1. Data hierarchy

2.2. Object classes in programming language

As the programming language to reach the goal and solve the tasks C# has been set, which is object-oriented one, hence it allows better work with data and can implement Entity Framework technology for database interaction improvement [3]. For we decided to use the object-oriented paradigm, then we can declare 3 classes to represent data: Tab, Parameter and DataValue. In the tables below are shown all 3 classes' structures and their relations.

According to the data hierarchy, both Tab and Data classes should have an Address, which is a mandatory field, when other ones are nullable. Except for parameters and values arrays and Expression, the nullable properties are for information only and not included in calculations.

Table 1

Tab class

Item	Type	Description
Address	int	Tab address
Name	string	Tab name
Data	List<Data>	Parameters array

Table 2

Data class

Item	Type	Description
Address	int	Parameter address
Name	string	Parameter name
Stamp	string	Signal stamp
Dimension	string	Parameter dimension
Expression	string	Math expression
DataValues	List<DataValue>	Values array

The lowest class in the hierarchy DataValue consists of only 2 nullable properties, which represent datetime and value (table 3).

Table 3

DataValue class

Item	Type	Description
Date	DateTime	Datetime value
Value	double	Value

User is allowed to add, delete and edit instances of Tab, Data or DataValue via user interface (UI). DataValue instances can be added to a parameter by import from a database, text file or Excel tables and set/edited manually as well. All entered data should be verified, i.e. it should have valid Date and Value before it´s applied. The Value property takes only numeric entries and the Date one tries to parse an input string expression into a DateTime object, that contains values of year, month, day, hour, minute and second. For example, if we enter «24.07.2005 17:03:57» the software splits it and creates an object of DateTime fromt them. Should be considered, that the «dd/mm/yyyy hh/mm/ss» format is not the only and it can be represented in other way, therefore datetime format should be considered and can be set in the settings.

3. PLOT DIGITIZING TOOL

In case if there is no input data to be imported, but there are processes plots and diagrams, an operator can use the built-in digitizing tool. The digitizing algorithm is shown on the figure 2. For scanned images are mostly noisy, then they should be preprocessed with the certain filters, which are an averaging filter, such as median, for noise reduction and the contrast one for edges highlighting. After an image preprocessed, zero number point and ranges should be set.

Plots usually contain graticube, which are represented by thin lines, as well and it's necessary to remove it for it may interfere with plot lines. Due to image can be greyscale or colored, there are two ways to extract required line. In the former case, if graticube lines are brighter than plot ones, we can set threshold to remove them and in the latter one we can use color segmentation to extract necessary lines.

If we are not able to separate lines due to their homochromatism, then we can use opening transformation, which consists of sequential filtering with erosion and dilation, what results in thinning graticube lines till they are none, when necessary thick lines remain unaltered. Should be mentioned, that before this procedure an input image should be binarized, i.e. it should consist of only two white and black colors. Otsu´s method is universal and solves this problem well.

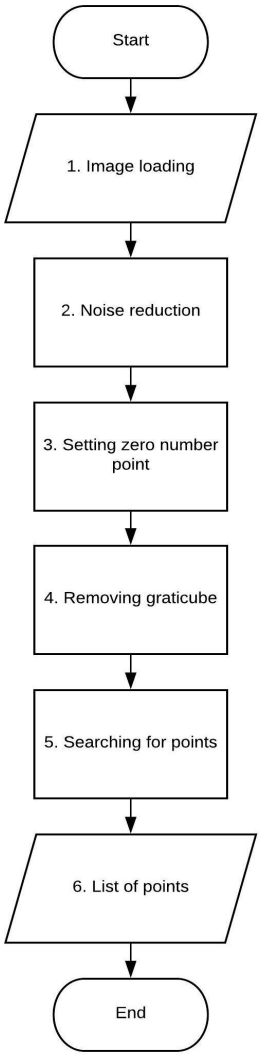


Fig. 2. Plot digitizing algorithm flowchart

In total, we obtain a binary image with required line only (fig. 3) and the next step we are to get the points with their coordinates in the range and add them into the stack.

It can be done with iteration algorithm through both X and Y-axis: if current point is black, then it meets the requirements.

Once we reached the range limit, the acquired points values should be scaled. For instance, if on the canvas of size 100 × 50 the X and Y maximum and minimum points are set in the following manner.

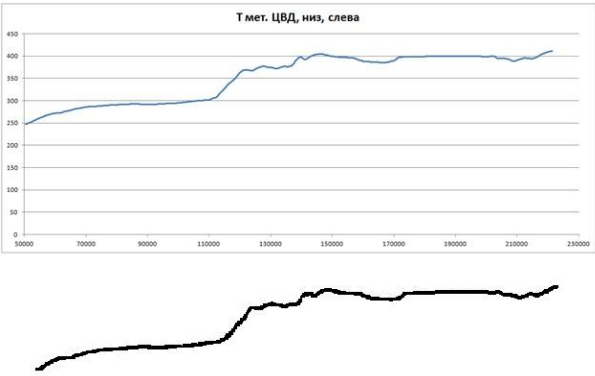


Fig. 3. The processed image

Table 4

X and Y – axis ranges

	X	Y
Min	25	10
Max	50	20

Then, according to the formula 1, point (31, 15) corresponds to (32.75, 13).

$$\begin{cases} x_2 = \dfrac{x_1}{(x_{\max} - x_{\min})} + x_{\min}; \\ y_2 = \dfrac{y_1}{(y_{ma[} - y_{\min})} + y_{\min}. \end{cases} \quad (1)$$

Nevertheless, should be mentioned, that X-axis represents datetime, and it's better to convert it to total seconds value for scaling. Upon completion of the procedure the obtained points can be assigned to a list of DataValue instances with converting seconds to DateTime type. Now the array can be attached to a certain parameter.

4. MATHEMATICAL EXPRESSION PARSER

In order to provide a possibility to develop algorithms and make values calculations, the software should support math expression evaluator as a function, which takes a string as an argument and returns a DataValue instance to be assigned to a Data instance, which called this function. In table 5 the part of the list of functions operator can use is shown.

Table 5

List of functions

Function name	Arguments	Description
Rate	A, Tin, Tfin	Evaluates how fast the value changes
Min, Avg, Max	A, Tin, Tfin	Returns the lowest, average or highest value
SojournH	A, lim, Tin, Tfin	Returns the amount of minutes when value is higher than limit
SojournL	A, lim, Tin, Tfin	Returns the amount of minutes when value is lower than limit
Abs	A	Returns absolute value
Pow	A, n	Returns value A raised in power of n
Round	A	Round the value
Ceil	A	Round the value up
Floor	A	Round the value down

All functions take as an argument a value array and some take a value array in time range from Tin to Tfin only.

On the fig. 4 the math expression evaluator parsing algorithm flowchart is shown. It starts with searching for not empty parameters expressions and putting them into the instance of type Dictionary, consisting of a key (parameter address) and a value (parameter expression). After the dictionary is filled with all non-empty expressions, it should be sorted by address, so parameters are calculated in increasing order of address.

The math expression evaluator is based on the split-and-merge expression parser algorithm [4] with the exception of Cell class value type. In our case it is a list of DataValue instances. The result of the splitting is tokens. For each Cell in tokens the merge function is called, which returns only one Cell after calculations.

The key feature of the math expression evaluator is that it works with not only numbers, but with arrays as well, therefore it's necessary to distinguish one from other. To do so an address should be followed by a latin capital letter 'A', for instance A1.5 refers to parameter with address 5 in tab with address 1. Otherwise an argument or cell is considered a number.

Arithmetic calculations, such as addition (+), subtraction (-), division (/) and multiplication (*) on arrays are time referenced. As in arrays

often acquired data is not certainly the same time (table 6), then we can not just calculate them with iteration, but we should merge their Datetime values as shown in table 7.

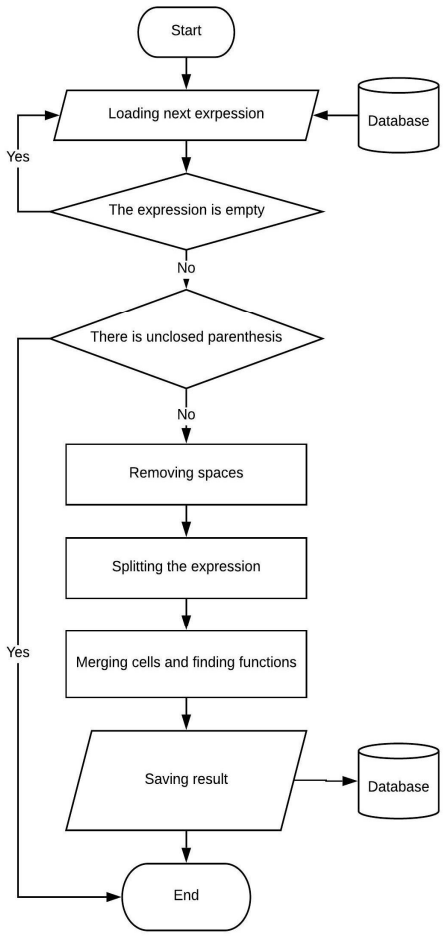


Fig. 4. Mathematical expressions parser flowchart

If a token represents a function name, then it takes all that between following parentheses as arguments and returns a Cell instance as the result.

In both cases we refer to database to get parameter values by address. The results of an assessment are assigned to certain parameters. After an assessment is done, user is able to export results to Microsoft Excel tables.

Table 6

Value arrays sample

The 1st array		The 2nd array	
Datetime	Value	Datetime	Value
12.11.2009 14:00:56	49	12.11.2009 14:02:07	18
12.11.2009 14:04:56	52	12.11.2009 14:05:40	19
12.11.2009 14:05:40	56	12.11.2009 14:10:40	20

Table 7

The merged value arrays

DateTime	The 1st array values	The 2nd array values	Result
12.11.2009 14:00:56	49	18	31
12.11.2009 14:02:07	49	18	31
12.11.2009 14:04:56	52	18	34
12.11.2009 14:05:40	56	19	37
12.11.2009 14:10:40	56	20	36

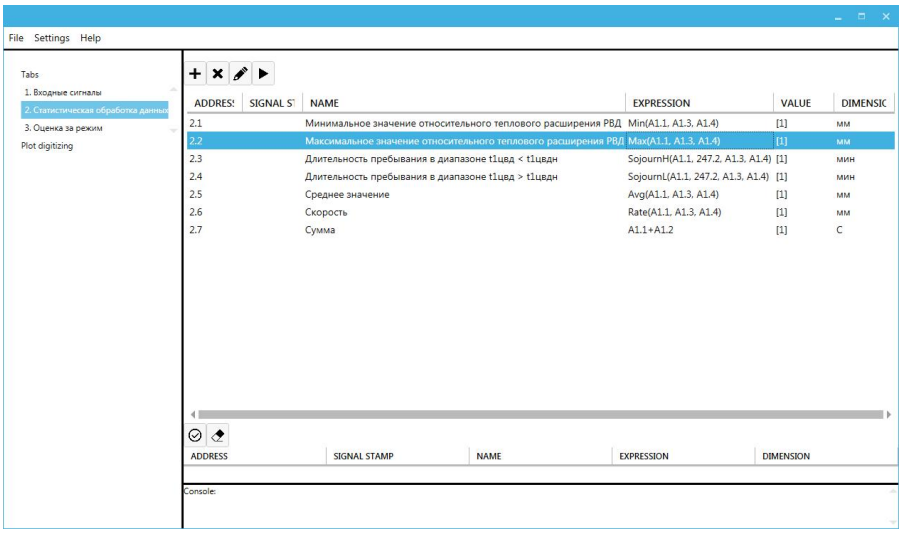


Fig. 5. The software main window screenshot

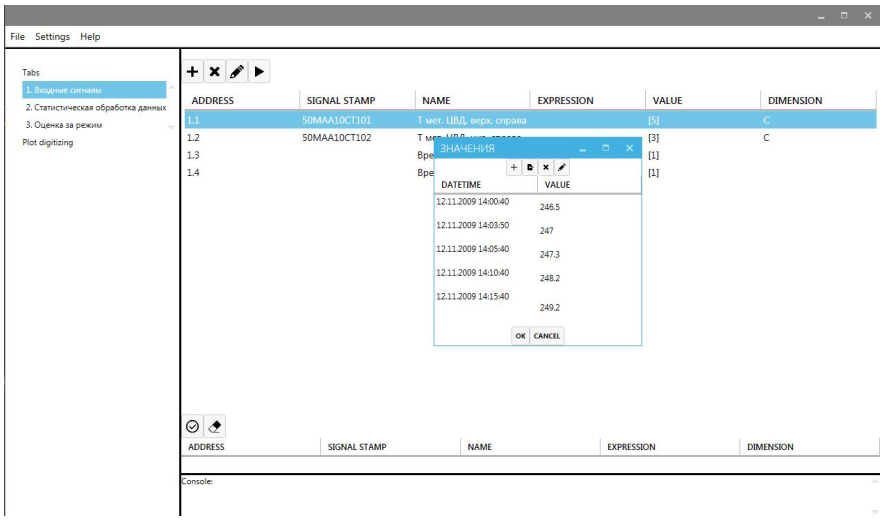


Fig. 6. Parameter values window screenshot

5. CONCLUSION

The results of the research are shown on the screenshots below (fig. 5, fig. 6). The current version of the software is able to carry out process-dependent parameters assessments and meets the requirements. The plot digitizing tool works well and allows getting plot points, the mathematical expression evaluator allows calculations. The further debug and enhancement are to be done.

LIST OF SYMBOLS:

ACS – Automated Control System;

UI – User Interface.

REFERENCES

1. Евсеев, К.В. Проектирование и определение требований к расчётной станции в составе АСУ ТП / К.В. Евсеев, И.А. Болдырев // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Сборник научных статей I Всероссийской научной конференции: 12-14 декабря 2017 г., часть 1. – Тольятти, 2017. – С. 83-88.

2. Стефани, Е.П. Основы построения АСУ ТП: [Учеб. пособие для вузов] / Е.П. Стефани. – М.: Энергоиздат, 1982 – 352 с.

3. Хейлсберг, Андерс. Язык программирования C# / А. Хейлсберг: [пер. с англ. Р. Тетерин]. – 4-е изд. – М.: Питер, 2012. – 773 с.

4. Vassili Kaplan A Split-and-Merge Expression Parser in C# / Kaplan V. // MSDN Magazine. – 2015. – № 10.

УДК 621.313

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.В. Рожков – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье показаны существующие проблемы и направления совершенствования электропривода переменного тока с преобразователем частоты (ПЧ) и асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым ротором.

ВВЕДЕНИЕ

Электропривод переменного тока с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором является наиболее распространенным электроприводом в современном мире. Начиная с последней трети двадцатого века и по нарастающей в первых двух десятилетиях нынешнего века основным типовым решением в технике современного электропривода стал частотно-регулируемый асинхронный вариант. Совершенствование полупроводниковой элементной базы для силовых схем (разработка и массовое производство силовых модулей с *IGBT*), а также микропроцессорных средств управления ими (микроконтроллеров) привело к формированию уже «классического» варианта асинхронного электропривода с ПЧ по схеме «трехфазный неуправляемый выпрямитель (НВ) – звено постоянного тока с тормозной цепочкой – трехфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)» с цифровой скалярной или векторной системой автоматического регулирования (САР).

Скалярная САР определяет управление по хорошо известному в теории электрических машин и электропривода закону М.П. Костенко. В упрощенной форме при постоянной нагрузке на валу АД он устанавливает соотношение между амплитудой и частотой питающего асинхронный двигатель напряжения как постоянное – для обеспечения стабилизации потокосцепления в статорной, роторной цепях или в зазоре АД. В качестве векторной САР используются в основном технологии на принципах системы «Трансвектор», впервые предложенные и отработанные «Сименс», и принципы прямого управления моментом, впервые реализованные фирмой ABB. Эти решения способны обеспечить самые высокие требования к статическим и динамическим характеристикам приводов как общепромышленных, так и специальных механизмов [1], [2]. Наряду с несомненными достоинствами использование асинхронных приводов с ПЧ на основе АИН с ШИМ и современных САР сопровождается и проблемами, неполный перечень которых укрупненно можно представить так:

– несовершенство используемой типовой силовой схемы в энергетическом отношении. Тормозные режимы в ней обеспечиваются тормозной цепочкой с дополнительным *IGB*-транзистором-чоппером и внешним резистором, на котором и рассеивается энергия в генераторном режиме АД;

– применяемая технология управления *IGBT* с ШИМ негативно влияет на изоляцию обмоток машины, снижая надежность изоляции и долговечность работы АД в целом;

– для замкнутых систем, обеспечивающих наилучшие статические и динамические свойства, – наличие дорогих механических датчиков (как правило, скорости), усложняющих кинематическую схему.

Рассмотрим подробнее каждую из этих проблем, способы их решения и обозначим в связи с этим тенденции развития современных ЧРП.

1. КРАТКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ В АСИНХРОННОМ ЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ

1.1. Энергетические свойства применяемых силовых схем

Для электроприводов – механизмов с активной нагрузкой на валу АД (лифты,

подъемные механизмы кранов и т. п.) – использование силовой схемы «трехфазный неуправляемый выпрямитель (НВ) – звено постоянного тока с тормозной цепочкой – трехфазный автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)» нецелесообразно. Производственный цикл подобных механизмов включает как режимы подъема груза, так и равноценные по времени режимы спуска, в которых двигатель может работать в генераторном режиме. При этом значительная доля энергии (до 25-30 %) теряется в виде тепла на внешнем сопротивлении. Разработаны, выпускаются промышленностью и применяются варианты совершенствования энергетических режимов путем модернизации силовой схемы с установкой взамен неуправляемого диодного выпрямителя рекуператора (рис. 1). Последний представляет собой активный выпрямитель – транзисторный мост, структурно подобный АИН. Тогда при организации соответствующего управления рекуператором указанную долю энергии можно возвратить в сеть.

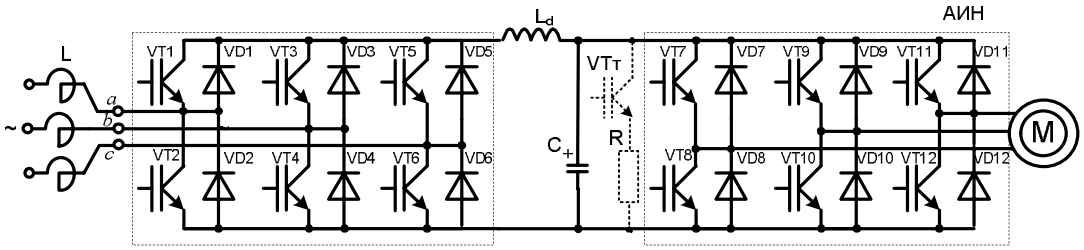


Рис. 1. Схема с активным выпрямителем (собранным на *IGBT VT*1-*VT*6), работающем в режиме рекуператора

В то же время в электроэнергетике активно развиваются и применяются активные фильтры гармоник, работающие по технологии «Статком». Подобные фильтры реализуются на аналогичных транзисторных мостовых схемах активных выпрямителей, со стороны постоянного тока нагруженных на накопительный конденсатор $C_{нак}$.

Он представляет собой узел энергообмена с сетью, предназначенный для улучшения гармонического состава тока, питающего нелинейную нагрузку. Схема подобного устройства, выполняющего функцию так называемого «кондиционера сети», показана на рис. 2.

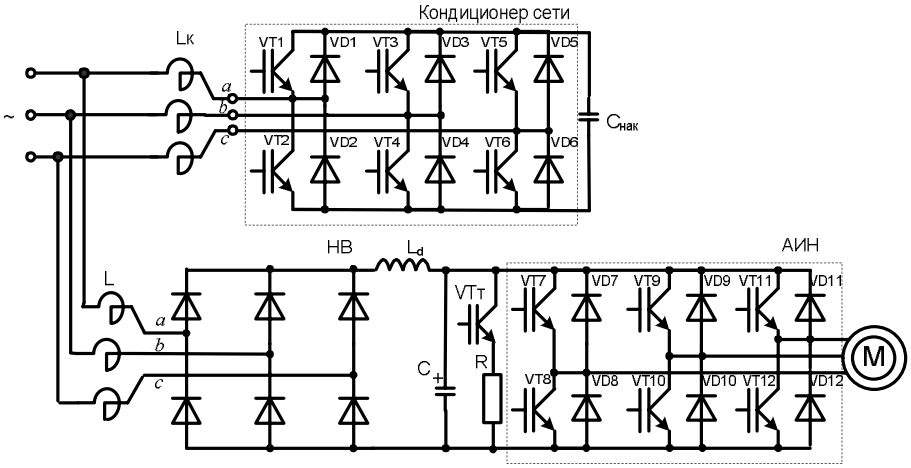


Рис. 2. Схема с активным выпрямителем (собранным на *IGBT VT*1-*VT*6 и накопителе $C_{нак}$), работающем в режиме активного фильтра гармоник

В [3] была предложена схема, совмещающая достоинства двух приведенных схем (рис. 1 и 2) в применении к электроприводу. В особенности это может быть целесообразно для мощных высоковольтных электроприводов (подъемные лебедки буровых установок,

мощные краны, экскаваторы и т. п.). Технологии управления активным выпрямителем в указанных вариантах разные. Однако современные контроллеры вполне способны обеспечить «ветвление» двух алгоритмов и поочередную работу в каждом из них. В основном двигательном режиме (при условном «подъеме» груза) работы можно использовать алгоритм управления активным выпрямителем в режиме «кондиционера сети», обеспечивая потребляемый ток схемы, близкий к синусоидальному. При этом снижается вероятность внезапных ложных срабатываний защит оборудования, подключенного к той же секции питающего трансформатора. В генераторном режиме работы (при условном «спуске» груза) можно применять алгоритм управления активным выпрямителем в режиме рекуператора. При этом обеспечивается возврат энергии в питающую сеть и, дополнительно, при соответствующем построении САР (внешний регулятор напряжения звена постоянного тока, внутренний быстродействующий релейный контур тока статора с заданием нулевой реактивной составляющей) реализуется функция компенсатора реактивной мощности. Вариант предложенной в [3] схемы показан на рис. 3.

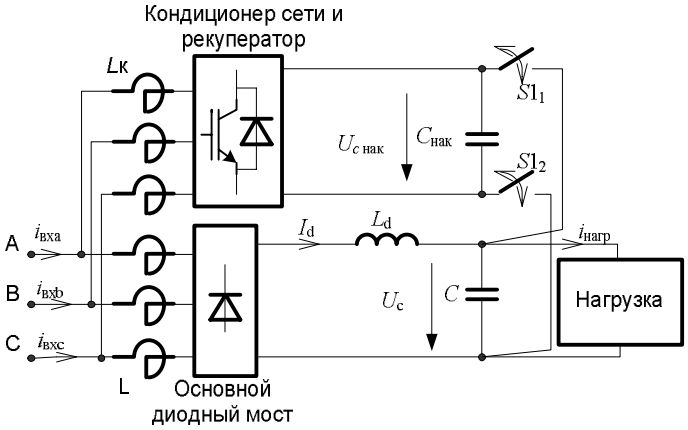


Рис. 3. Универсальная схема с активным выпрямителем, работающим как в режимах рекуператора, так и активного фильтра гармоник – кондиционера сети (с двумя дополнительными ключами $S1_1$ и $S1_2$). АИН с АД представлен эквивалентной нагрузкой

В зависимости от возникающего в схеме режима работы дополнительные ключи $S1_1$ и $S1_2$ (в качестве которых можно использовать два дополнительных транзистора) могут быть разомкнуты (в двигательном режиме АД) и замкнуты (в генераторном режиме АД). Режимы контролируются по уровню напряжения в звене постоянного тока (на конденсаторе U_c). При номинальном уровне используется базовый «двигательный» алгоритм с разомкнутыми $S1_1$ и $S1_2$. При превышении напряжением на U_c определенного выставляемого порога (например, на 10-20 % сверх номинального), что свидетельствует о переходе АД в режим торможения, подключается «генераторный» алгоритм, и ключи $S1_1$ и $S1_2$ замыкаются. Подобное решение позволяет реализовать четырехквадратный энергоэффективный частотный электропривод, обеспечивающий рекуперацию энергии в генераторном режиме АД и щадяще влияющем на сеть в двигательном режиме.

1.2. Влияние ШИМ на изоляцию обмоток АД

Используемые для частотно-регулируемых приводов *IGB*-транзисторы в силовых схемах с АИН управляются при помощи ШИМ, как правило, на частотах 1-20 кГц. На выходе АИН при этом формируется соответствующая «гребёнка» широтно-импульсно-модулированного напряжения. Благодаря ШИМ транзисторов в сочетании с современными САР эти электроприводы обеспечивают широчайший диапазон регулирования скорости (D = 10000 : 1 и выше) и другие необходимые регулировочные свойства – быстродействие, точность стабилизации координат.

Но известна и «обратная сторона медали», которую часто фирмы-изготовители при реализации проектов у потребителей специально замалчивают. При высокочастотной коммутации транзисторов АД питается ШИМ-напряжением с бесконечно большими производными на фронтах импульсов с уровнем напряжения питания (U_d в звене постоянного тока). Это приводит к протеканию паразитных емкостных токов между витками обмоток и между обмотками и корпусом АД. Эти явления при длительном воздействии снижают надежность машины, и ее срок службы при непринятии необходимых мер сокращается минимум вдвое. Пути решения этих проблем могут заключаться в применении специальных выходных фильтров и использовании специальных частотно-регулируемых двигателей с повышенной прочностью изоляции и непроводящим подшипником из высокопрочной керамики. Постоянные времени применяемых выходных фильтров не могут быть слишком большими, так как при этом невозможна реализация быстродействующих глубокорегулируемых структур. Специальный же частотно-регулируемый двигатель минимум в три-четыре раза дороже АД общепромышленного исполнения. С позиций совершенствования электропривода более целесообразным является не применение дополнительного дорогостоящего «навесного» оборудования (фильтров) и спецдвигателей, а модернизация силовых схем и систем управления ими. В качестве такого решения можно упомянуть применение многоуровневых АИН в составе ПЧ, уменьшающих негативное влияние ШИМ на изоляцию. Они обеспечивают не два – «$U_d/2$» и «$-U_d/2$», как в «обычном» мостовом АИН, – а n уровней в выходном фазном напряжении. При этом в линейном напряжении, которым и питается АД по схеме «Y» без вывода нулевой точки, уровней еще больше (для «обычного» двухуровневого АИН – три, для трехуровневого АИН – пять и т. д.).

Применение трехуровневых АИН в ПЧ для высоковольтных электроприводов проработано и применяется достаточно активно.

Большее число уровней в АИН требует скрупулезного технико-экономического обоснования и компромисса между получаемыми преимуществами и дополнительными затратами на усложнение силовой схемы и выходной части системы управления (использование многоуровневой ШИМ). На рис. 4 показана схема четырехуровневого АИН с фиксирующими диодами.

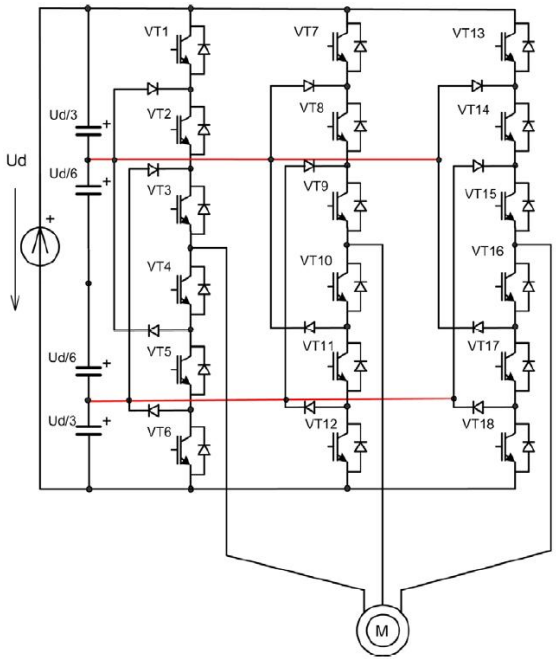


Рис. 4. Схема четырехуровневого АИН с фиксирующими диодами

Такая схема обеспечивает четыре уровня «$U_d/2$», $U_d/6$», «$-U_d/6$» и «$-U_d/2$» в выходном фазном напряжении. Уровни формируются от расщепленного на 3 источника питания (сформировано три источника по «$U_d/3$») общего входного выпрямителя. Осциллограмма линейного напряжения при частоте выходной сети АИН 50 Гц показана на рис. 5.

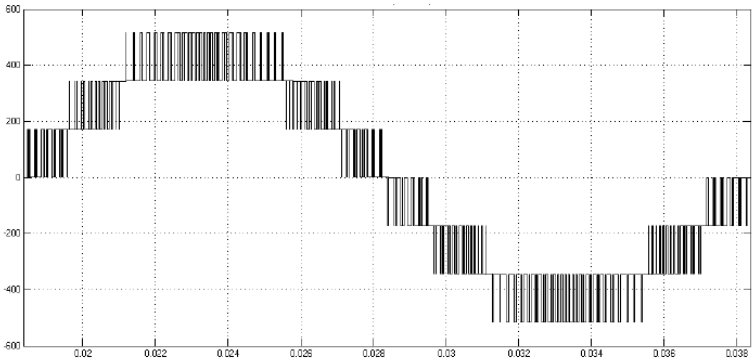


Рис. 5. Линейное напряжение на выходе четырехуровневого АИН с фиксирующими диодами

Видно, что линейное напряжение формируется семью уровнями («U_d», «$2U_d/3$», «$U_d/3$», «0», «$-U_d/3$», «$-2U_d/3$» и «$-U_d$»), и напряжение питания АД уже достаточно близко к синусоидальной форме, для которой и спроектирован общепромышленный АД.

Спектр линейного напряжения при этом показан на рис. 6. Для сравнения: на рис. 7 приведен спектр для линейного напряжения на выходе двухуровневого АИН. Видно значительное уменьшение (примерно в 5 раз) амплитуды высших гармоник в линейном напряжении четырехуровневого АИН.

Помимо схем многоуровневых АИН с фиксирующими диодами, существуют и получают развитие схемы АИН с навесными конденсаторами и каскадные схемы (технология на основе каскадного соединения однофазных АИН). Последний вариант особенно активно развивается зарубежными фирмами.

Некоторые способы расширения возможностей многоуровневого АИН в переменных режимах работы частотно-регулируемого электропривода на основе схем АИН с фиксирующими диодами изложены в [4].

1.3. Построение бездатчиковых электроприводов

Одной из основных проблем в частотном электроприводе (как, впрочем, и в других) является наличие механического датчика (скорости, положения) при реализации замкнутых САР.

Промышленностью выпускается множество современных механических датчиков – импульсных (инкрементальных энкодеров) и абсолютных энкодеров с нанесенной многоразрядной маской. Но эти датчики достаточно дорогостоящи, часто требуют обслуживания и квалифицированного монтажа. Кроме того, при реализации кинематической схемы конкретного механизма иногда отсутствует свободный конец вала ротора АД. При установке датчика на механизм дополнительные трудности вызывает необходимость компенсации люфтов в редукторах и других паразитных зазоров в механизмах. С позиций теории надежности, чем больше дополнительных механических узлов в кинематической схеме, тем менее надежна система электропривода в целом. Устранение же механического датчика требует оценивания скорости по относительно легко измеряемым электрическим переменным (напряжению, току статора АД) и вычисляемым электромагнитным переменным (потокосцепление в различных частях машины).

Существуют, активно исследуются и рекомендуются к применению множество вариантов бездатчиковых электроприводов – на принципах скользящих режимов [5], на базе расширенного фильтра Калмана, всевозможные адаптивные методы и т. д.

К сожалению, универсального решения, способного обеспечить точную идентификацию скорости АД и устойчивость режимов оценивания в том широком диапазоне регулирования, которые реализуются векторными САР, до сих пор не существует. Связано это с принципиальными трудностями работы идентификаторов с изменением параметров схемы замещения (в основном активных сопротивлений статора R_1 и ротора R_2) при работе АД (из-за эффекта вытеснения тока и нагрева обмоток). Разработаны методы с переключающимися алгоритмами, когда на верхних частотах работает один алгоритм, а на нижних – другой.

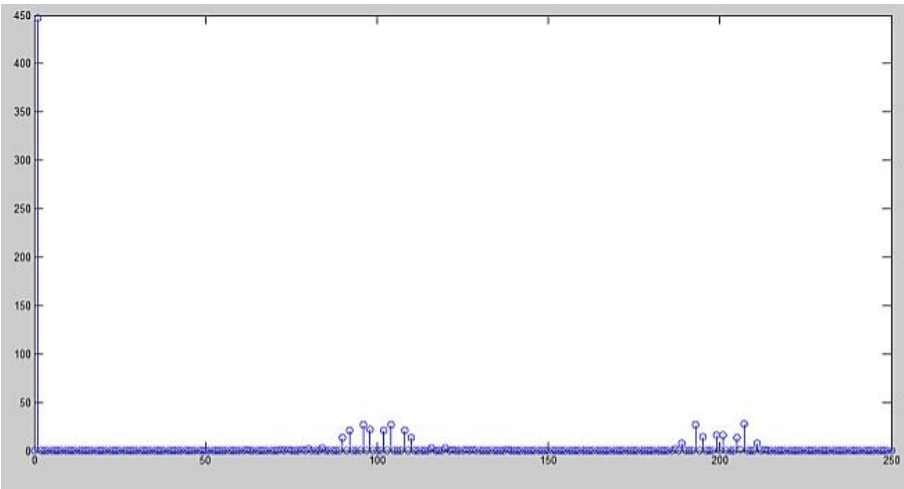


Рис. 6. Спектр линейного напряжения на выходе четырехуровневого АИН с фиксирующими диодами

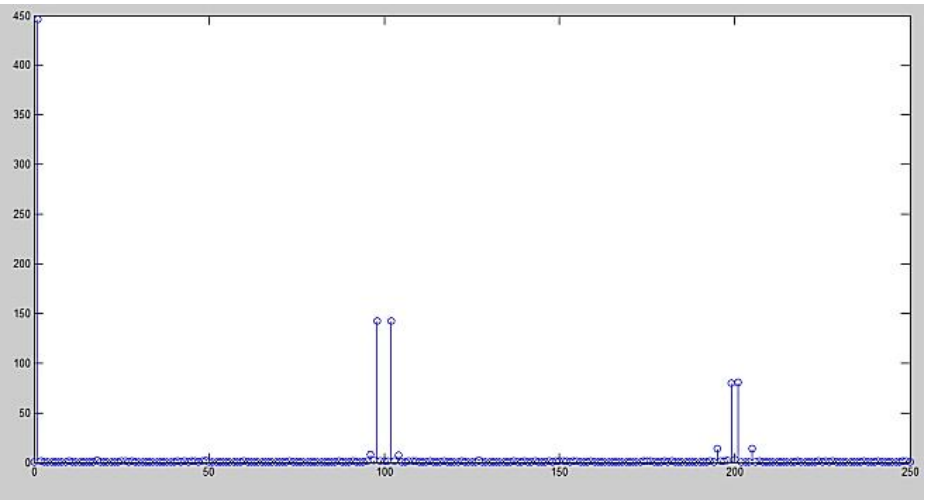


Рис. 7. Спектр линейного напряжения на выходе двухуровневого АИН

Еще одна трудность связана с определением начальных условий при идентификации (если они не нулевые, например при подхвате скорости после кратковременного отключения) и требуемых вычислительных возможностей контроллеров из условия, чтобы математический алгоритм идентификации не слишком загружал процессор. В этом смысле предпочтение следует отдавать наиболее простым структурам, но в то же время обеспечивающим достаточную точность идентификации. Конечно, обеспечить то же качество статических и динамических процессов, как в электроприводе с датчиком, не удастся, но решение может оказаться подходящим для большинства общепромышленных применений.

Как вариант, можно предложить не слишком хорошо известный прием идентификации на основе общих идей П. Эйкхоффа [6].

Структурная схема системы идентификации двух параметров по П.Эйкхоффу показана на рис. 8.

Принцип построения такого идентификатора для АД несложно пояснить следующими соотношениями. Уравнения роторной цепи машины в проекциях на неподвижные оси α, *j*β:

$$0 = \frac{R_2}{L_2}\left(\psi_{2\alpha} - i_{1\alpha}L_\mu\right) + \omega_{врэл}\psi_{2\beta} + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt};$$

$$0 = \frac{R_2}{L_2}\left(\psi_{2\beta} - i_{1\beta}L_\mu\right) - \omega_{врэл}\psi_{2\alpha} + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt}.$$

Вычитая из второго уравнения первое, получим

$$0 = \frac{R_2}{L_2}\left[\left(\psi_{2\alpha} - \psi_{2\beta}\right) - L_\mu\left(i_{1\alpha} - i_{1\beta}\right)\right] +$$

$$+ \omega_{врэл}\left(\psi_{2\beta} + \psi_{2\alpha}\right) + \left(\frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} - \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt}\right).$$

Сформировано уравнение относительно двух неизвестных – R_2, $\omega_{врэл}$.

После обозначений получаем

$$R_2F_1 + \omega_{врэл}F_2 + F_3 = 0\,.$$

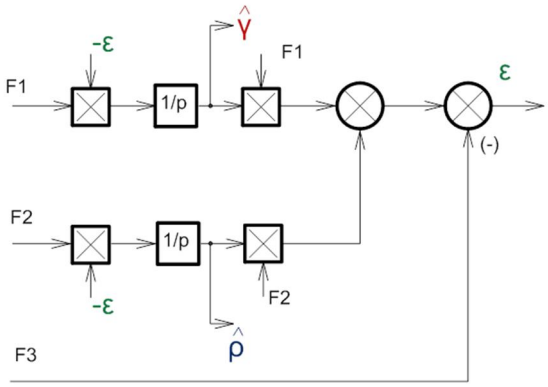


Рис. 8. Структура идентификатора по Эйкхоффу для двух переменных ($\hat{\rho}$ и $\hat{\gamma}$)

Далее можно пользоваться структурой рис. 8. В качестве ε в ней выступает ошибка оценивания.

Для иллюстрации работы системы идентификации на рис. 9 приведен процесс частного пуска АД с выходом на основную скорость при приложении к валу АД номинального момента нагрузки. Опыт проделан на модели АД мощностью 250 Вт.

Видно, что в установившемся режиме на высокой скорости относительная погрешность между оцененной и измеренной скоростью вращения составляет сотые доли процента, а в динамике – не превышает 5 %, и идентификация идет успешно даже на нулевых и околонулевых скоростях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обозначенные проблемы и возможные пути их решения указывают, по мнению авторов, на формирование следующих основных тенденций в совершенствовании схемотехники и алгоритмов управления в частотно-регулируемых электроприводах:

– повышение энергоэффективности используемых схемных решений (путем дополнения полупроводниковых рекуператоров схемами и средствами активной фильтрации, часть идей реализации которых при соответствующей доработке можно заимствовать из схем, уже реализуемых в электроэнергетике). Так как электропривод с АД является основным потребителем вырабатываемой электроэнергии в стране и в мире, вопросы повышения энергоэффективности таких схем являются, по сути, вопросами повышения конкурентоспособности российской экономики;

– более широкое использование схем с многоуровневыми АИН. При этом срок службы относительно недорогих общепромышленных АД без применения дополнительных пассивных средств (выходных фильтров АИН) в составе частотно-регулируемого привода может быть существенно повышен. Постепенное

удешевление IGBT-модулей может приводить к переносу принципов и схем, применяющихся для высоковольтных ПЧ, для систем на 0.4 кВ;

– формирование более значительной доли в применении бездатчиковых частотно-регулируемых электроприводов на различных принципах. Применение относительно простых и надежных средств идентификации скорости АД на фоне изменения параметров схемы замещения для приводов общепромышленных механизмов.

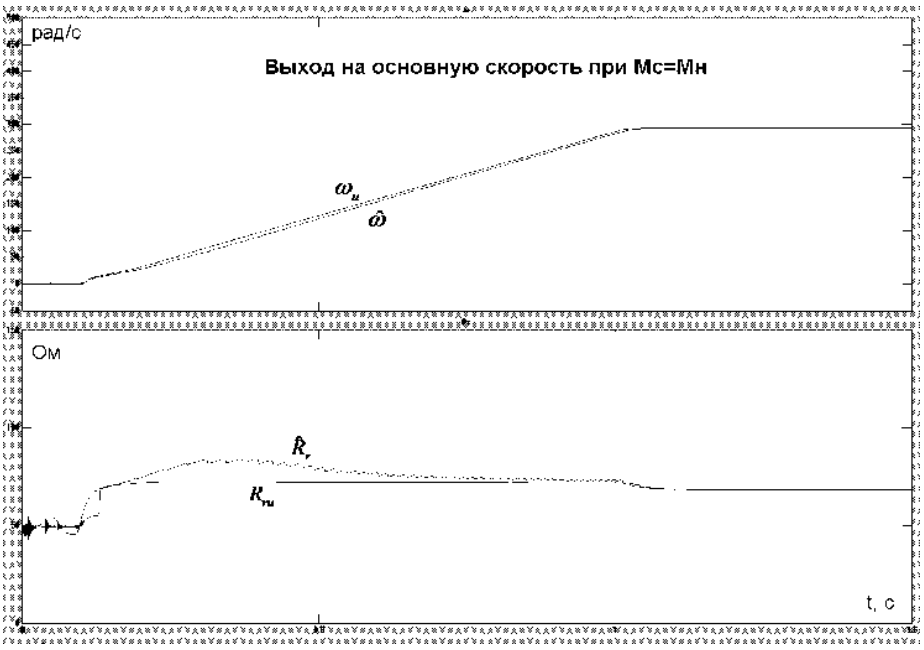


Рис. 9. Работа идентификатора по Эйкхоффу в переходном процессе частотного пуска с оцениванием скорости вращения АД (верхний график) на фоне изменения активного сопротивления ротора R_2 (нижний график)

Все указанные решения требуют значительных интеллектуальных и капитальных затрат, а получаемый эффект на производствах требует дополнительно технико-экономического обоснования в применении к конкретным проектам. Однако удешевление полупроводниковой части силовых схем и перевод алгоритмов управления на программный уровень подтверждают высказанные соображения по основным направлениям развития частотно-регулируемых асинхронных электроприводов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПЧ – преобразователь частоты;

АД – асинхронный двигатель;

НВ – неуправляемый выпрямитель;

АИН – автономный инвертор напряжения;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

САР – система автоматического регулирования;

ЧРП – частотно-регулируемый привод;

IGBT – Insulated-gate bipolar transistor (биполярный транзистор с изолированным затвором);

$S1_1$ и $S1_2$ – дополнительные полупроводниковые ключи в предлагаемой универсальной схеме;

D – диапазон регулирования скорости электропривода, о.е.;

U_d – напряжение звена постоянного тока, В;

U_c – напряжение на конденсаторе звена постоянного тока, В;

$C_{нак}$ – емкость конденсаторного накопителя на выходе активного выпрямителя, Ф;

R_1 – сопротивление обмотки статора АД, Ом;

R_2 – сопротивление обмотки ротора АД, Ом;

α, $j\beta$ – обозначение осей неподвижной ортогональной системы координат в теории обобщенной машины;

$\psi_{2\alpha}$ – проекция потокосцепления ротора по оси α, Вс;

$\psi_{2\beta}$ – проекция потокосцепления ротора по оси β, Вс;

$i_{1\alpha}$ – проекция тока статора по оси α, А;

$i_{1\beta}$ – проекция потокосцепления ротора по оси β, А;

$\omega_{врэл}$ – электрическая скорость вращения ротора АД, рад/с;

L_{μ} – индуктивность цепи намагничивания АД, Гн;

$\hat{\rho}$; $\hat{\gamma}$ – оценки переменных парамеров;

F_1, F_2, F_3 – функциональные зависимости в уравнении идентификатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст]: учебник для студ. вузов / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

2. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов / А.С. Анучин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

3. Крутиков, К.К., Рожков, В.В. Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода / К.К. Крутиков, В.В. Рожков // Электричество. – 2011. – № 2. – С. 32-38.

4. Крутиков, К.К., Рожков, В.В. Схемные решения использования возможностей многоуровневого автономного инвертора напряжения в переменных режимах частотного электропривода / К.К. Крутиков, В.В. Рожков // Вестник Московского энергетического института. – 2017. – № 2. – С. 62-70.

5. Рывкин, С.Е. Регуляризация переключений компонент многомерного разрывного управления в реальном скользящем режиме / С.Е. Рывкин, Д.Б. Изосимов, С.В. Байда // Проблемы управления. – 2006. – Вып. 1. – С. 54-60.

6. Крутиков, К.К., Рожков, В.В. Способ динамической идентификации двух переменных параметров нелинейного объекта / К.К. Крутиков, В.В. Рожков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. – 2015. – С. 6-9.

УДК 62-5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗВЕСТНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТУРБОАГРЕГАТОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ

Е.М. Скопова – магистрант
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье приведены примеры процессов, влияющих на изменение частоты сети энергосистемы, а также рассмотрены динамические характеристики различных регуляторов, используемых в турбоагрегатах. На основе типовых звеньев рассмотрены передаточные функции турбо- и гидроагрегатов, сделаны выводы о значении отслеживания динамических характеристик регуляторов для прогноза ресурса и уменьшения статистики отказов системы регулирования.

Как известно, частота сети энергосистемы России и частота вращения энергомашин электростанций связаны прямой зависимостью, поэтому необходимо поддерживать баланс мощностей на турбине и роторе генератора. При увеличении или уменьшении нагрузки в системе баланс смещается, приводя к изменению частоты вращения агрегата. Опишем уравнение переходного процесса при изменении нагрузки на ротор агрегата:

$$T\frac{d\omega}{dt} + D\Delta\omega = P_{\text{т}} - P_{\text{н}} = \Delta P, \qquad (1)$$

где T – постоянная времени; ω – частота вращения; D – коэффициент демпфирования; ΔP – величина изменения нагрузки; $P_{\text{т}}$ и $P_{\text{н}}$ – мощности (моменты) нагрузки на турбине и роторе соответственно.

При совпадении мощностей $\Delta P = 0$, а значит, ускорения агрегата не происходит. При увеличении нагрузки сети появляется дисбаланс в мощностях, момент турбины уступает моменту нагрузки, тем самым замедляя вращение агрегата ($\Delta P < 0$, отсюда $d\omega/dt < 0$). При уменьшении нагрузки ускорение возрастает, и частота увеличивается, что также недопустимо.

Все потребители энергосистемы классифицируются на несколько групп, у каждой из которых существует определенная зависимость производительности от частоты сети.

Условно выделено пять групп потребителей, каждая из которых имеет степенную зависимость от частоты сети. Степень может быть целым числом или дробью. В зависимости от этого, потребителя относят к номеру группы, близкой к целой степени.

Данная зависимость имеет вид:

$$P_i = P_{i,\text{ном}}\left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^i, \qquad (2)$$

где i – номер группы потребителя (от 0 и выше); P_i – нагрузка потребителя; $P_{i\ \text{ном}}$ – номинальная нагрузка, необходимая для нормальной работы потребителя; f – частота сети; $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота сети (50 Гц).

Чем выше группа потребителя, тем сильнее его производительность зависит от частоты сети энергосистемы. Как правило, к нулевой группе относят осветительную нагрузку и приемники, питаемые через выпрямители тока; к первой группе – станки, компрессоры и др.; к четвертой – насосы с большим статическим напором сопротивления (питательные насосы котлов) и др.

Изменение частоты вращения агрегата приводит к изменению нагрузки потребителей и мощности самой турбины. Это учитывается коэффициентом демпфирования D.

В новом установившемся режиме, когда установится баланс турбины и потребителей с новым значением частоты сети, величина ее отклонения определится выражением

$$\Delta\omega = -\Delta P/D.$$

С учетом наличия всех групп потребителей нагрузка энергосистемы определяется выражением

$$P_c = \alpha_0 P_{c,\text{нно}}\left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^0 + \alpha_1 P_{c,\text{ном}}\left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^1 + \ldots +$$

$$+ \alpha_n P_{c,\text{ном}}\left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^n, \qquad (3)$$

где α_n – коэффициент долевого участия потребителей n-й группы.

Изменение потребления мощности при малых изменениях частоты имеет вид:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta f} \cong \frac{dP}{df} = P_{c,\text{ном}}\left[\alpha_1\left(\frac{1}{f_{\text{ном}}}\right) + 2\alpha_2\left(\frac{f}{f_{\text{ном}}^2}\right) + \right.$$

$$\left. + 3\alpha_3\left(\frac{f^2}{f_{\text{ном}}^3}\right) + 4\alpha_4\left(\frac{f^3}{f_{\text{ном}}^4}\right)\right]. \qquad (4)$$

Учитывая, что отклонения частоты малы и близки к 50 Гц, получаем

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta f} \cong \frac{P_{c,\text{ном}}}{f_{\text{ном}}}\left[\alpha_1 + 2\alpha_2 + 3\alpha_3 + 4\alpha_4\right]. \qquad (5)$$

Таким образом, зная состав потребителей и долю их участия в системе, можно рассчитать, в какой мере изменится потребление при изменении частоты в энергосистеме.

Исходя из обратного, можно рассчитать допустимые отклонения частоты системы, так как при расчете показателей потерь допустимо отклонение производительности, равное 1-3 %:

$$\Delta f_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{доп}}/k_{\text{н}}, \qquad (6)$$

где $k_{\text{н}}$ – регулирующий эффект нагрузки, равный $\frac{\Delta P_c f_{\text{ном}}}{P_{c,\text{ном}}\Delta f}$.

Если для третьей группы принять $\Delta P_{\text{доп}} = 3$ %, а регулирующий эффект нагрузки $k_{\text{н}} = 3$, то $\Delta f_{\text{доп}} = \pm 0{,}01$ %, следовательно $\Delta f = \pm 0{,}5$ Гц.

Для агрегата со статизмом $s = 0{,}04$ при изменении частоты в системе на $\Delta f = 0{,}5$ Гц, изменение мощности определится как $\Delta P = \frac{\Delta f}{s}$ и составит ±25 %, что недопустимо, поэтому к энергосистеме предъявляются жесткие требования к поддержанию частоты, рассчитанные на допустимые отклонения в мощности энергомашин.

В любом из типов систем автоматического регулирования (механической, гидродинамической, гидромеханической, электрогидравлической и электромеханической) в общем случае есть измерительное звено, исполнительное, усилительное и сам агрегат управления (рис. 1).

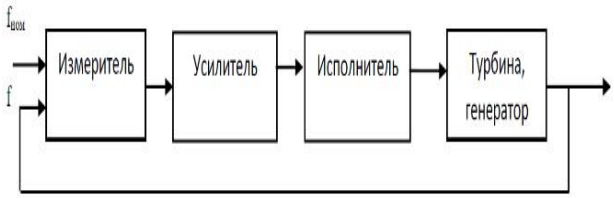


Рис. 1. Структурная схема САР

Регулирование скорости вращения вала турбо- и гидроустановок осуществляется за счет подачи рабочего тела (пара, газа или воды) на лопатки агрегата. Для изменения степени открытия клапана или направляющего аппарата гидротурбины измерительное звено сравнивает сигналы, поступающие с датчика частоты вращения вала турбины и заданного номинального значения частоты (50 Гц), и, при их несовпадении, образует управляющий сигнал. В соответствии с сигналом управления исполнительное звено осуществляет движение на закрытие или открытие клапана (или НА). С помощью усилителя команда на открытие (закрытие) клапана приобретает энергию для сопротивления усилиям, препятствующим изменению степени открытия клапана. Также возможна схема с исполнительным звеном, расположенным после усиливающего.

Для рассмотрения динамики СР необходимо определиться с составом ее элементов. Каждое звено системы относится к одному из типов: безынерционное звено, инерционное, интегрирующее, колебательное.

Для рассмотрения приведем в пример механический регулятор частоты вращения турбины, состоящий из грузов, пружины и рычагов. Входным сигналом регулятора является частота вращения вала турбины, на выходе – перемещение штока клапана.

Введем относительные величины:

$$\varphi = \frac{\omega - \omega_{ном}}{\omega_{ном}}, \quad \eta = \frac{y - y_{ном}}{y_{ном}}, \qquad (7)$$

где $\omega_{ном}$ – номинальное значение частоты вращения; $y_{ном}$ – положение штока клапана при частоте вращения 50 Гц.

Не учитывая веса грузов, уравнение маятника

$$\eta = \frac{\varphi}{\gamma}, \qquad (8)$$

где $1/\gamma$ – неравномерность маятника – коэффициент, устанавливающий соотношение между перемещением штока и скоростью вращения.

Таким образом, передаточная функция механического регулятора вращения в изображениях Лапласа (s) имеет вид:

$$W_{мех}(s) = \frac{\eta}{\varphi} = \frac{1}{\gamma}. \qquad (9)$$

Типовой график переходного процесса в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 2.

Рис. 2. График переходного процесса маятника

Для усиления воздействия маятника на регулирующие клапаны используются усилители в виде гидравлических золотников. Перемещение золотника происходит под действием муфты маятника. Золотник, находящийся в гильзе, перемещаясь, открывает и закрывает окна в гильзе, через которые перетекает масло. Масло является рабочим телом в гидравлической части системы регулирования, передающим давление, поступающее от маслонасоса в гидроцилиндры (сервомоторы), тем самым создавая усилие на клапане. Чем выше давление в системе и больше площадь управляющего цилиндра, тем большее усилие создается при перемещении золотника.

Для рассмотрения динамики и введения относительных величин принимаем входным сигналом золотника перемещение штифта маятника Δy или в относительных величинах η, выходным – открытие окон золотником Ω. В относительных величинах получим $\sigma = \Omega/\Omega_{max}$, где Ω_{max} – максимальное открытие золотником окна в гильзе.

Считая золотник достаточно малым, пренебрегаем инерционностью золотника и определяем, что перемещению штифта маятника соответствует такое же перемещение золотника:

$$\sigma = \eta. \qquad (10)$$

Таким образом, полученное уравнение преобразуем в передаточную функцию золотника:

$$W_{зол}(s) = \frac{\sigma}{\eta} = 1. \qquad (11)$$

График переходного процесса будет иметь вид, аналогичный маятнику.

Уравнение гидроцилиндра, воздействующего на клапан впуска пара, будет зависеть от скорости заполнения маслом и нагрузки на цилиндр. Входным воздействием является открытие окон золотника Ω, выходным – перемещение штока сервомотора μ.

Скорость перемещения штока пропорциональна степени открытия окон золотника. Таким образом, получаем

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\sigma}{T_{серв}}, \qquad (12)$$

в изображениях Лапласа

$$\mu s = \frac{\sigma}{T_{серв}}, \qquad (13)$$

где $T_{серв}$ – постоянная времени сервомотора. Это время, за которое цилиндр прошел путь от нижнего крайнего положения в верхнее при полном открытии окон в гильзе золотника при нормальном давлении масла и отсутствии нагрузки.

Передаточная функция сервомотора будет иметь вид:

$$W_{\text{серв}}(s) = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{1}{T_{\text{серв}} s}. \qquad (14)$$

Таким образом, вид графика переходного процесса изображен на рис. 3.

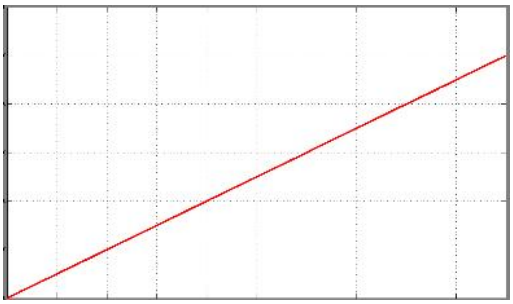


Рис. 3. График переходного процесса сервомотора

При моделировании переходного процесса работы паровой турбины без промежуточного перегрева пара с заводским регулятором передаточная функция имеет вид:

$$W_{\text{турб}}(s) = \frac{P_{\text{т}}}{\mu} = \frac{1}{T_{\text{т}} s + 1}, \qquad (15)$$

где $P_{\text{т}}$ – мощность турбины; μ – степень открытия регулирующего органа; $T_{\text{т}}$ – постоянная времени турбины, зависящая от скорости преобразования энергии пара в механическую энергию.

В данном случае график переходного процесса показан на рис. 4. Красная линия изображает переходный процесс турбины $W_{\text{турб}}(s)$, синяя – показатель открытия регулирующего органа μ.

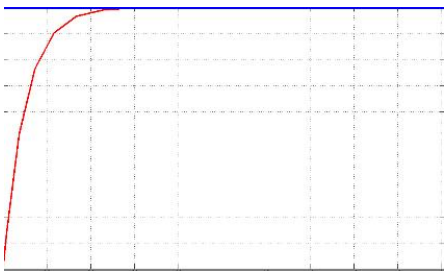


Рис. 4. График переходного процесса турбины без промперегрева

При промежуточном перегреве пар отбирается из турбины при различном давлении, и весовое количество пара, заключенного в промежуточном объеме, может меняться в широких пределах в установках разного типа. Кроме того, давление и весовое количество пара в промежуточном объеме турбины при переходе от холостого хода к полной нагрузке могут меняться значительно. Поэтому при конструировании турбин необходимо иметь ясное представление влияния промежуточного объема на устойчивость и на переходный процесс регулирования.

Для турбин с промежуточным перегревом пара передаточная функция примет вид:

$$W_{ПП}(s) = \frac{1}{T_{\text{т}} s + 1}\left[C + \frac{1 - C}{T_{ПП} s + 1}\right] = \frac{C T_{ПП} s + 1}{(T_{\text{т}} s + 1)(T_{ПП} s + 1)}, \qquad (16)$$

где C – коэффициент, учитывающий долевое участие ЦВД в общей мощности турбины; $T_{ПП}$ – постоянная времени промперегревателя (ПП), зависящая от скорости преобразовании энергии пара в мощность турбины.

Типовой график переходного процесса турбины с ПП показан на рис. 5.

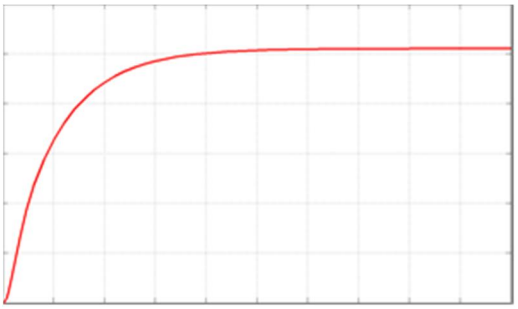


Рис. 5. График переходного процесса турбины с промперегревом

За счет большой инерционности жидкости динамика звеньев у гидротурбин и гидрогенераторов ГЭС будет отличаться от паровых машин большим временем запаздывания, зависящим от скорости воды в водоводе, напором и длиной водовода:

$$W_{ГА}(s) = \frac{\Delta P}{\mu} = \frac{-T_{\text{вод}} s + 1}{0{,}5 T_{\text{вод}} s + 1}, \qquad (17)$$

где $T_{\text{вод}} = vL/gH$ – постоянная времени напорного водовода; v – скорость воды в водоводе; L – длина водовода; g – ускорение свободного падения; H – напор воды.

Таким образом, за счет сильного демпфирования переходного процесса для снижения гидравлического удара при открытии

направляющего аппарата график переходного процесса гидроагрегата имеет вид, показанный на рис. 6.

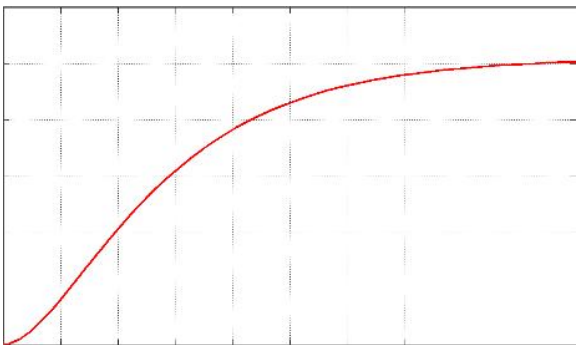


Рис. 6. График переходного процесса гидротурбины

Исследование динамики процессов изменения мощности и частоты вращения турбо- и гидроагрегатов важно для прогноза надежности оборудования при работе в различных режимах. Оно дает возможность определить поведение системы при различных нестационарных режимах работы, скачках нагрузки и забросах частоты в энергосистеме и др. По результатам контроля динамики можно судить о состоянии входящих в систему регулирования узлах и элементах, определять наличие загрязнений в гидравлических частях, износа в местах с механическими связями и выхода из строя элементов электромеханической системы.

При обнаружении причины изменения динамики регуляторов и дальнейшего анализа ситуации это позволит скорректировать график ремонтного облуживания входящих в состав элементов СР, уменьшить затраты на ремонт и обслуживание, спрогнозировать продолжительность стабильной работы узлов при имеющихся условиях, а также уменьшить частоту отказов систем регулирования турбо- и гидроагрегатов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГЭС – гидроэлектростанция;

НА – направляющий аппарат;

САР – система автоматического регулирования;

СР – система регулирования;

ЦВД – цилиндр высокого давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, Г.М., Меркурьев, Г.В. Автоматика энергосистем / Г.М. Павлов, Г.В. Меркурьев. – СПб.: Центр подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2001.

2. Карлинер, В.М. Испытание и настройка автоматического регулирования паровых турбин / В.М. Карлинер. – М.: Энергия, 1974.

3. Герман, Д.Я. Основы теории надежности: Конспект лекций / Д.Я. Герман. – М.: МГТУ им. Баумана, 2005.

4. Лукьянов, В.С., Кузнецова, Е.С. Курс лекций по дисциплине «Надежность АСОИУ»: Учебное пособие / В.С. Лукьянов, Е.С. Кузнецова. – Волгоград: ВолГТУ, 2012.

УДК 621.313

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ВОЛНОВЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯХ

С.С. Гришин – доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

Развитие мирового производства энергии за счёт возобновляемых источников приобрело устойчивый характер и развивается быстрыми темпами. При этом на солнечную и ветроэнергетику сейчас приходится 77 % новых вводов генерирующих мощностей, что является рекордным приростом мощностей.

Из всего установленного объёма мощностей доля электроэнергетики ВИЭ, приходящаяся на энергию ветра, составляет 3,7 %, уступая только гидроэнергетике (16,6 %), величина производства которой определяется в основном традиционной гидроэнергетикой крупных ГЭС, развивающейся уже более века. По данным отчёта Renewables Global Status Report 2016 [3], международной организации REN21, установленная мощность ветрогенераторов в 2015 г. в мире составила 433 ГВт, показав устойчивый относительный прирост по сравнению с 2014 г. (370 ГВт).

В настоящее время в мире более 90 % эксплуатирующихся ветроэнергетических установок (ВЭУ) – это так называемые горизонтально-осевые репеллерные установки. Основная доля ветродвигателей этого вида принадлежит к одноколёсным ветродвигателям, использующим для вращения подъёмную силу, действующую на ведомый винт (репеллер), расположенный параллельно потоку, ещё их называют крыльчатыми ветродвигателями (ВД).

Ветродвигатели с осью, перпендикулярной потоку, также находят применение, как правило, в ВЭУ меньшей мощности. Для ветродвигателей этого класса ось вращения ВД может быть расположена как вертикально (ортогональные ВД), так и горизонтально (коллинеарные ВД) по отношению к поверхности земли. Известным преимуществом ВД с вертикальной осью вращения является независимость их функционирования от направления ветрового потока, в связи с чем отпадает необходимость во всех системах и механизмах ориентации на ветер. В качестве сил, приводящих ВД с осью, перпендикулярной потоку, в движение, также может выступать как подъёмная сила (лифт-машины), так и сила аэродинамического сопротивления (драг-машины).

Несмотря на вполне сложившуюся практику применения ВД, появляются новые конструкции ВД, не укладывающиеся в рамки принятой классификации. Их можно рассматривать как инновационные ВД.

Одним из таких ВД является волновой ветродвигатель, представляющий собой автоколебательную систему для преобразования энергии ветровых и водных потоков [4-12, 14]. Рабочим элементом таких ВД является крыло, которое совершает под действием набегающего потока автоколебательные движения. При этом описываемые им в пространстве траектории аналогичны траектории тела, плавающего на возмущённой границе раздела жидкой и газообразной среды, с той разницей, что колебания совершаются не на границе раздела сред, а внутри потока. Частота и амплитуда совершаемых крылом колебаний определяется параметрами колебательной системы (ВД) и величиной потока энергии, подводимой к крылу [13].

Автоколебания – вид незатухающих колебаний, параметры которых (амплитуда, частота, фаза и т. д.), оставаясь постоянными в течение продолжительного интервала времени, не зависят от начальных условий, а определяются только свойствами самой автоколебательной системы.

Автоколебательная система – система, способная совершать неограниченно долго незатухающие колебания за счёт источника энергии, который может находиться как внутри автоколебательной системы, так и за

её физическими границами, при этом периодический процесс колебаний создаётся за счёт непериодического источника энергии.

При автоколебаниях сама автоколебательная система порождает действующую на неё внутреннюю периодическую силу, действие которой само по себе ещё не приводит к автоколебаниям, если в автоколебательной системе не существует специального механизма, именуемого «обратная связь», который и регулирует периодическое поступление энергии после каждого периода колебаний для компенсации её потери, вызванной диссипацией энергии. Поступление компенсирующей порции энергии должно происходить по определённому закону в такт с собственными колебаниями системы без соответствующей синхронизации поступающей энергии и собственных колебаний существование автоколебаний невозможно.

Таким образом, неотъемлемым условием существования автоколебаний является наличие колебательной системы, источника энергии и механизма обратной связи между ними.

Уравнение, описывающее автоколебания в самом общем виде, можно представить как дифференциальное уравнение второго порядка вида [1]:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = F(x, \dot{x}) - 2h\dot{x} = f(x, \dot{x}). \quad (1)$$

Для существования автоколебаний необходимо, чтобы

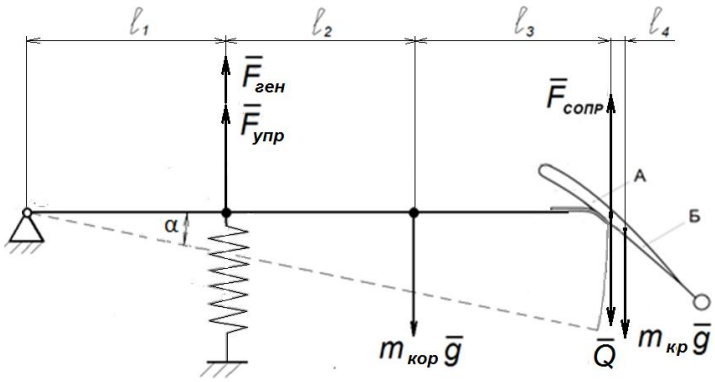
$$h < 0, F > 0, \omega^2 > h^2.$$

В простейшем случае функция $F(x, \dot{x})$ от x может не зависеть, в этом случае

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \psi(x). \quad (1')$$

Для обоснования возможности существования у ветродвигателя автоколебательного режима рассмотрим колебательную систему, кинематическая схема которой представлена на рисунке [8]. Система способна совершать колебания под действием свободного потока газа или жидкости.

Система представляет собой груз, закреплённый на задней кромке крыла и связанный с коромыслом плоским упругим элементом, при этом коромысло опирается на пружину сжатия.



Рисунок

Под действием ветрового потока крыло выходит из состояния равновесия. Если оно занимает положение, при котором угол атаки крыла принимает положительное значение, то происходит подъем крыла вверх. Вместе с ним поднимается коромысло. Ход коромысла вверх ограничен пружиной, и в тот момент, когда оно остановится, крыло будет поворачиваться вокруг центра сопротивления А, так как центр его тяжести Б расположен ниже. В момент, когда угол атаки станет отрицательным, на крыло начнёт действовать сила, перемещающая его вниз. Действие крыла на коромысло будет передаваться опосредованно за счёт силы упругости плоской пружины, связывающей крыло с коромыслом. В результате коромысло будет опускаться вниз, пока пружина, ограничивающая его ход, не сожмётся. В тот момент, когда коромысло перестанет опус-

каться, крыло за счет поворота вокруг точки сопротивления вновь займет положение, при котором угол атаки примет положительное значение, и крыло, а вместе с ним и коромысло, начнут подниматься вверх. Далее цикл повторяется.

Коромысло и крыло показаны в положении равновесия, при их движении вниз.

Для описания системы воспользуемся уравнением Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right)-\frac{\partial T}{\partial \alpha}=-\frac{\partial U}{\partial \alpha}-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\alpha}}+Q(t). \quad (2)$$

В этом уравнении в качестве обобщённой координаты взят угол α отклонения коромысла от положения равновесия.

Кинетическая энергия колебательной системы

$$T=\frac{I\dot{\alpha}^2}{2}, \quad (3)$$

где I – момент инерции коромысла, учитывающий наличие крыла и груза.

Тогда

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}=I\dot{\alpha}, \qquad \frac{\partial T}{\partial \alpha}=0. \quad (4),$$

(5)

Потенциальная энергия колебательной системы

$$U=U_{\text{кор}}+U_{\text{кр}}+U_{\text{ген}}+U_{\text{п}}, \quad (6)$$

где $U=U_{\text{кор}}$, $U_{\text{кр}}$, $U_{\text{ген}}$ – потенциальные энергии коромысла, крыла с грузом и рабочих частей генератора; $U_{\text{п}}$ – потенциальная энергия деформированной пружины.

Общий вид потенциальных энергий, связанных с действующими в колебательной системе силами тяжести и силой упругости деформированной пружины, в процессе колебаний может быть представлен как

$$U_m=mgh=mg\alpha l,$$

$$U_{\text{п}}=\frac{k(x_{\text{ст}}+x)^2}{2}=\frac{k(\alpha_{\text{ст}}l+\alpha l)^2}{2}=\frac{kl^2}{2}(\alpha_{\text{ст}}+\alpha)^2,$$

где $x_{\text{ст}}$ – статическая деформация пружины в положении равновесия коромысла; $\alpha_{\text{ст}}$ – соответствующий ей угол поворота коромысла; x – деформация пружины в процессе колебаний; α – соответствующая ей обобщенная угловая координата; k – коэффициент жёсткости пружины; l – длина коромысла.

Тогда

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha}=\frac{\partial U_{\text{кор}}}{\partial \alpha}+\frac{\partial U_{\text{кр}}}{\partial \alpha}+\frac{\partial U_{\text{ген}}}{\partial \alpha}+\frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial \alpha},$$

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha}=m_{\text{кор}}g(l_1+l_2)+m_{\text{кр}}g(l_1+l_2+l_3+l_4)+$$
$$+F_{\text{ген}}gl_1+k(\alpha_1+\alpha)l_1^2;$$

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha}=m_{\text{кор}}g(l_1+l_2)+m_{\text{кр}}g(l_1+l_2+l_3+l_4)+$$
$$+F_{\text{ген}}gl_1+k\alpha_{\text{ст}}l_1^2+k\alpha l_1^2;$$

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha}=k\alpha l_1^2+\{m_{\text{кор}}g(l_1+l_2)+$$
$$+m_{\text{кр}}g(l_1+l_2+l_3+l_4)+F_{\text{ген}}gl_1+k\alpha_{\text{ст}}l_1^2\},$$

где $m_{\text{кор}}$ – масса коромысла; $m_{\text{кр}}$ – масса крыла с грузом; $F_{\text{ген}}$ – сила, действующая на коромысло со стороны исполнительного устройства.

Выражение, стоящее в фигурных скобках, равно нулю, так как представляет собой выражение суммы моментов сил, действующих на систему в состоянии равновесия, таким образом

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha}=k\alpha l_1^2. \quad (7)$$

$\Phi=\frac{\beta\dot{q}^2}{2}$ – диссипативная функция Рэлея, учитывающая рассеивание энергии, вызванное наличием сил внутреннего и вязкого трения, где β – обобщённый диссипативный коэффициент. В качестве обобщенной координаты q принимаем угл α.

В нашем случае

$$\Phi=\frac{\beta(l_1+l_2+l_3)^2\dot{\alpha}^2}{2} \quad (8)$$

и $$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\alpha}} = \beta(l_1 + l_2 + l_3)^2 \dot{\alpha}. \quad (9)$$

$Q(t)$ – зависящая от времени обобщённая сила, действующая на крыло. Подставляя все производные и функции в уравнение Лагранжа (2), получаем

$$I\ddot{\alpha} = -kl_1^2\alpha - \beta(l_1 + l_2 + l_3)^2 \dot{\alpha} + Q(t) \quad (10)$$

или

$$I\ddot{\alpha} + \beta(l_1 + l_2 + l_3)^2 \dot{\alpha} + kl_1^2\alpha = Q(t), \quad (10')$$

$$\ddot{\alpha} + \frac{\beta(l_1 + l_2 + l_3)^2}{I}\dot{\alpha} + \frac{kl_1^2}{I}\alpha = \frac{1}{I}Q(t) \quad (10'')$$

и, наконец,

$$\ddot{\alpha} + 2h\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = AQ(t), \quad (11)$$

где $2h = \frac{\beta(l_1 + l_2 + l_3)^2}{I}$, $A = \frac{1}{I}$, $\omega_0^2 = \frac{kl_1^2}{I}$, $\omega_0 = l_1\sqrt{\frac{k}{I}}$ – циклическая частота автоколебаний; $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{l_1}\sqrt{\frac{I}{k}}$ – период колебаний.

Нетрудно видеть, что уравнение (11) соответствует общему виду уравнения автоколебаний (1). Таким образом, рассмотренная колебательная система при соблюдении необходимых условий способна совершать автоколебания, а уравнение (11) имеет решение.

Функцию обратной связи в данной конструкции ВД выполняет крыло с грузом, соединённые с коромыслом плоской пружиной и являющиеся частью колебательной системы.

Для синхронизации поступления в автоколебательную систему энергии частота действия обратной связи, то есть частота колебаний крыла с грузом на плоской пружине должна быть близка к частоте собственных колебаний коромысла с крылом и грузом. В этом случае автоколебательная система будет являться источником незатухающих колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А, Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1956.

2. Бать, М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах, т. 3 / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – М.: Наука, 1973.

3. http://reencon-xxi.ru/wp-content/uploads/2016/10/1_Hullin.pdf

4. А. с. 1240949 СССР МПК F03D5. Ветродвигатель / Стрекалов С.Д. // Зарегистрировано 30.06.86. Бюл. № 24.

5. Патент 2293212 РФ МПК F03D5. Устройство для преобразования возобновляемой энергии / Стрекалов С.Д., Мишарев Г.М., Стрекалова Л.П., Тарасов А.Н. Заявл. № 2005124839 от 04.08.2005 // опубл. 2007.

6. Патент 2447320 РФ МПК F03D5. Устройство для преобразования возобновляемой энергии / Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Досаев М.З., Дынникова Г.Я., Симоненко М.М., Стрекалов С.Д., Стрекалова Е.С. // Приоритет № 2010107256 от 27.02.201.

7. Патент на полезную модель 101102 РФ МПК F03D5. Устройство преобразования ветровой энергии / Стрекалов С.Д., Стрекалова Л.П., Поляков В.А., Бормотов А.Л. // Приоритет № 2010111068/06 от 23.03.2010. Зарегистрирован 10.01.2011.

8. Патент на полезную модель 143620 РФ МПК F03D5. Устройство для преобразования ветровой энергии / Стрекалов С.Д., Гришин С.С., Пивченко А.В., Стрекалова А.С. // Приоритет № 20104110577/06 от 19.03.2014. Зарегистрирован 27.07.2014.

9. Стрекалов, С.Д. Волновая техника, принципы функционирования, примеры использования в ветро- и гидропреобразователях / С.Д. Стрекалов // Мат. Межрегионального форума: «Энергосбережение и энергоэффективность». – Волгоград, 2011. – С. 64-68.

10. Андронов, П.Р. Исследование эффективности преобразования энергии в ветродвигателях волнового типа / П.Р. Андронов, С.Д. Стрекалов, Д.А. Григоренко, М.З. Досаев, Г.Я. Дынникова // Тезисы докладов XV школы-семинара «Современные проблемы аэродинамики». – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. – С. 13.

11. http://www.google.com.tr/patents/US7632069

12. http://www.rexresearch.com/kelley/kelley.htm

13. Стрекалов, С.Д. К вопросу создания экологически эффективного волнового автоколебательного ветродвигателя / С.Д. Стрекалов, С.С. Гришин, А.В. Пивченко, А.С. Стрекалова // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 04 (144). – С. 26-31.

14. http://www.gizmag.com/wind-harvester-reciprocating-motion-wind-turbine/21565/

УДК 621.577.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТЕПЛОВОГО НАСОСА

А.В. Бондаренко – магистрант
А.В. Стрижиченко – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. При проектировании вертикальных систем грунтовых теплообменников, состоящих из нескольких рядом стоящих элементов, одной из важнейших задач является определение границ теплового влияния теплообменников друг на друга для адекватного выбора адекватного расстояния между теплообменниками. В работе приведена методика определения расстояния между скважинами грунтового теплообменника по сбору низкопотенциальной теплоты грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Применение теплонасосных установок, использующих низкопотенциальную теплоту грунта, является одним из эффективных способов энергосбережения в жилищном хозяйстве. В справочниках по проектированию теплонасосных систем, использующих теплоту грунта, приводятся рекомендованные расстояния между скважинами грунтового теплообменника 5-8 м, не учитывающие свойства грунта, соответственно тепловой поток грунта и режим эксплуатации теплонасосной установки. При интенсивном теплосъеме рекомендованного расстояния [1] может оказаться недостаточно, что может привести к пересечению зон температурного влияния теплообменников и интенсификации выхолаживания грунтового массива и, как следствие, снижению коэффициента преобразования теплового насоса.

1. МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГРУНТОВЫМ ТЕПЛООБМЕННИКОМ

Исследуемый грунтовый теплообменник представляет собой U-образную трубку.

На рис. 1 приведена такая система вместе с графиком распределения температуры грунтового массива. Температура грунта, лежащего ниже нейтральной зоны, начинает равномерно возрастать, в среднем на 3 градуса каждые 100 м [2]. Применяемая в данной работе модель основана на следующих допущениях: структура грунтового массива однородна во всех направлениях, а его свойства постоянны и не зависят от колебаний температуры; тепловое взаимодействие между нисходящей и восходящей трубами теплообменника отсутствует – теплообмен осуществляется только с грунтом.

На грунтовый теплообменник воздействуют тепловые потоки от поверхности грунта и из областей, находящихся ниже и на удалении от ГТО в горизонтальном направлении. Анализ проведенных исследований [3, 4] в системах с вертикальными теплообменниками показывает преобладание потока тепла в радиальном направлении и незначительность его в осевом.

Математическое моделирование температурного поля грунта в таком случае сводится к решению нестационарной задачи теплопроводности.

Распространение теплоты в грунте вокруг теплообменника в цилиндрических координатах будет иметь вид:

$$\frac{dT_{\text{гр}}}{d\tau} = a\left(\frac{d^2T_{\text{гр}}}{dr^2} + \frac{dT_{\text{гр}}}{dr} + \frac{1}{r}\right) + q, \qquad (1)$$

где $T_{\text{гр}}$ – температура грунта, °С; τ – время; a – температуропроводность грунта, м^2/с; r – радиус-вектор в цилиндрической системе координат, м; q – тепловой поток недр земли, 0,1 Вт/м^2 [2].

Граничные условия для уравнения (1) включают в себя начальные значения температур

грунта по всей его глубине, определяемые по методике, изложенной в [5], а также условия сопряжения между теплоносителем и почвой.

Для решения полученной системы уравнений применим метод конечных разностей [6], позволяющий итерационным методом находить значения в каждой точке по значениям сопряженных точек. В данном методе рассматриваемый объект заменяется сеткой с узлами с определенным шагом. Все производные в дифференциальных уравнениях, описывающих процесс в объекте, заменяются приближенными алгебраическими выражениями, которые позволяют рассчитать значения в узлах сетки. Причем значение в каждом последующем узле рассчитывается по уже известному значению в предыдущем.

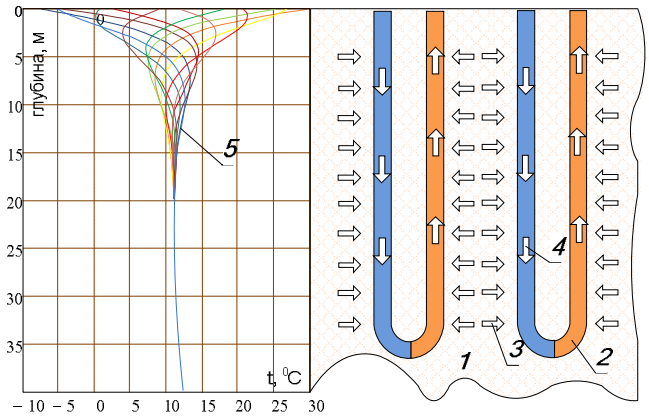


Рис. 1. Схема U-образного теплообменника: 1 – грунтовый массив; 2 – грунтовый теплообменник; 3 – теплоперенос от грунта теплообменнику; 4 – теплоперенос в теплообменнике; 5 – температурное поле нетронутого грунта в годовом цикле

Для описания процессов в грунтовом теплообменнике будем использовать следующую математическую модель. В качестве ГТО используется вертикальный U-образный теплообменник, по которому прокачивается теплоноситель. На наружной стенке трубы принимаются граничные условия 3-го рода, определяемые теплопроводностью прилегающего грунта, стенки трубы, на внутренней стенке трубы принимаются граничные условия 3-го рода, определяемые коэффициентом теплоотдачи от стенки к теплоносителю. Задаются расход теплоносителя и его температура на входе в ГТО. Режим работы теплового насоса принимаем с постоянной, номинальной нагрузкой.

Теплоперенос в ГТО описывается следующей системой уравнений:

$$Q = F\,\Delta t/R;$$
$$Q = \alpha\, F\,\Delta t_{г};\qquad (2)$$
$$Q = G\,c_{рж}\Delta t_{ж},$$

где Q – тепловой поток, Вт; R – термическое сопротивление стенки трубы, м^2 °С/Вт; Δt – разница температур грунта и жидкости вдали от стенки, °С; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; $c_{рж}$ – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·°С; $\Delta t_{ж}$ – разница температур потока на выходе и входе ГТО, °С; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м·°С; F – площадь теплообмена, м^2; $\Delta t_{г}$ – разница температур стенки и жидкости вдали от стенки, °С.

Система уравнений дополняется уравнениями подобия для расчета коэффициента теплоотдачи в зависимости от режима течения потока [7]:

– при вязкостном режиме течения жидкости в вертикальных трубах (Re < 2300, GrPr < 5·10^5):

$$\mathrm{Nu}_{ж} = 4\cdot\left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_{c}}\right)^{0,25};\qquad (3)$$

– при вязкостно-гравитационном режиме течения жидкости в вертикальных трубах (Re < 2300, GrPr > 5·10^5):

$$\mathrm{Nu}_{ж} = 0{,}037\,\mathrm{Re}_{ж}^{0,75}\,\mathrm{Pr}_{ж}^{0,4}\left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_{c}}\right)^{-0,11};\qquad (4)$$

– при переходном режиме (2300 < Re < 10 000):

$$\mathrm{Nu}_{ж} = 0{,}008\,\mathrm{Re}_{ж}^{0{,}9}\,\mathrm{Pr}_{ж}^{0{,}43}\left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_{с}}\right)^{0{,}25}; \quad (5)$$

– при турбулентном режиме (Re > 10 000):

$$\mathrm{Nu}_{ж} = 0{,}0214\,\mathrm{Re}_{ж}^{0{,}85}\,\mathrm{Pr}_{ж}^{0{,}43}\left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_{с}}\right)^{0{,}25}, \quad (6)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; индексы «с» и «ж» означают, что физические свойства берутся при температуре стенки и жидкости соответственно.

Моделирование работы грунтового теплообменника основано на решении системы уравнений (2), дополненной уравнениями подобия (3-6), сопряженное с моделью температурного поля грунта (1) с начальными условиями [5].

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Массив грунта вокруг скважины теплообменника представляет собой цилиндр с высотой, равной глубине скважины (для облегчения расчетов принимаем, что тепло распространяется в горизонтальном направлении), рис. 2.

Соответственно, зная объем и высоту цилиндра, несложно определить его радиус, который в данной задаче и будет границей теплового влияния. В задаче принимается, что температура грунтового массива в междуотопительный период полностью восстанавливается до первоначального значения.

Определяем количество тепла, отдаваемого одной скважиной за период τ:

$$W_{т} = 86\,400 Q_{т}\tau_{от}, \quad (7)$$

где $\tau_{от}$ – продолжительность отопительного периода, ч; $Q_{т}$ – требуемая тепловая мощность скважины, определяемая выше, Вт;

Определяем необходимый объем грунтового массива для покрытия тепловой нагрузки одной скважины:

$$V_{г} = \frac{W_{т}}{c_{ргр}\rho_{гр}\left(t_{гр} - t_{жср}\right)}, \quad (8)$$

где $c_{ргр}$ – удельная теплоемкость грунтового массива, Дж/кг·К; $\rho_{гр}$ – плотность грунта, кг/м^3; $t_{жср}$ – средняя температура низкопотенциального теплоносителя в грунтовом теплообменнике, °С:

$$t_{жср} = \frac{t_{ж1} + t_{ж2}}{2}. \quad (9)$$

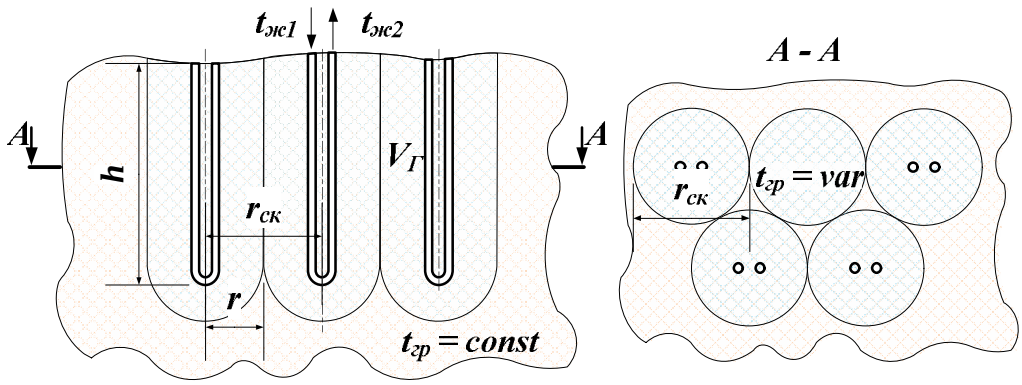


Рис. 2. Схема для расчета зоны теплового влияния системы сбора низкопотенциальной энергии грунта

Определяем радиус зоны теплового влияния грунтового теплообменника:

$$r = \sqrt{\frac{V_{г}}{\pi h}}, \quad (10)$$

где h – глубина скважины.

С учетом (7), (8) формула для определения расстояния между скважинами ГТО будет иметь следующий вид:

$$r_{ск} = \sqrt[2]{\frac{86\,400 Q_{т}\tau_{от}}{\pi h c_{ргр}\,\rho_{гр}\left(t_{гр} - t_{жср}\right)}}. \quad (11)$$

Полученная зависимость позволяет определять зону теплового влияния скважины ГТО и, соответственно, расстояния между скважинами, учитывающие свойства теплоносителя и грунта, требуемый тепловой поток ГТО.

Исходные данные – удельные значения теплофизических свойств грунта – берем в соответствии с [8, 9]. По результатам расчетов грунтов, встречаемых на территории Волгоградской области, получены следующие результаты (таблица). Для части грунтов, имеющих низкие значения теплоемкости и плотности, расчетные расстояния между скважинами превышают 10 м, и применение ГТО в таких условиях может оказаться экономически невыгодным или иметь ограничения по мощности теплового насоса, связанные с отсутствием необходимых площадей под теплообменники.

Расчетные значения расстояний между скважинами в зависимости от тепловой нагрузки и свойств грунта

$\rho_{гр}$, кг/м^3	$c_{ргр}$, Дж/кг·К	$q_{скв}$, Вт/м					
		40	50	60	70	80	90
1700	1186	9,0	10,0	11,2	12,0	12,8	13,6
1800	1431	8,2	9,2	10,2	11	11,6	12,4
1900	1698	7,6	8,4	9,2	10	10,8	11,4
2000	1989	7,0	7,8	8,6	9,2	10,0	10,6
2100	2303	6,6	7,2	8,0	8,6	9,2	9,8
2200	2639	6,0	6,8	7,4	8	8,6	9,2
2300	2998	5,8	6,4	7,0	7,6	8,0	8,6
2400	3381	5,4	6,0	6,6	7,2	7,6	8,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленая методика расчета расстояния между вертикальными грунтовыми теплообменниками теплонасосных систем сбора низкопотенциальной теплоты грунта при проектировании таких систем позволяет определять зону влияния элементов системы, выбрать оптимальный вариант расположения грунтовых теплообменников с учетом месных условий района строительства и теплотехнических свойств грунта.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГТО – грунтовый теплообменник;

$t_{гр}$ – температура грунта, °С;

τ – время;

a – температуропроводность грунта, м^2/с;

r – радиус-вектор в цилиндрической системе координат, м;

q – тепловой поток недр земли, Вт/м^2;

Q – тепловой поток, Вт;

R – термическое сопротивление стенки трубы, м^2·°С/Вт;

Δt – разница температур грунта и жидкости вдали от стенки, °С;

G – массовый расход теплоносителя, кг/с;

$c_{рж}$ – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·°С;

$\Delta t_ж$ – разница температур потока на выходе и входе ГТО, °С;

α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/м·°С;

F – площадь теплообмена, м^2;

$\Delta t_г$ – разница температур стенки и жидкости вдали от стенки, °С.

Nu – критерий Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

Gr – число Грасгофа;

Pr – число Прандтля;

индексы «с» и «ж» в (3-6) означают, что физические свойства берутся при температуре стенки и жидкости соответственно;

$W_т$ – количество тепла отдаваемого одной скважиной за период $\tau_{от}$, Дж;

$\tau_{от}$ – продолжительность отопительного периода, ч;

$Q_т$ – требуемая тепловая мощность скважины, определяемая выше, Вт;

$V_г$ – объем грунтового массива, м^3;

$c_{ргр}$ – удельная теплоемкость грунтового массива, Дж/кг·К;

$\rho_{гр}$ – плотность грунта, кг/м^3;

$t_{гр}$ – температура грунта, °С;

$t_{жср}$ – средняя температура низкопотенциального теплоносителя в грунтовом теплообменнике, °С;

индексы «1» и «2» в (9) означают температуру жидкости на входе и выходе из теплообменника;

h – глубина скважины;

r – радиус зоны теплового влияния, м;

$r_{ск}$ – расстояния между скважинами ГТО, м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buderus, P. Справочник по проектированию и монтажу тепловых насосов. Проектная документация. – 2005. – 142 с.

2. Васильев, Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием тепловой энергии поверхностных слоев Земли / Г.П. Васильев. – М.: Издательский дом «Граница», 2006. – 176 с.

3. Ground-sourse heat pump project analysis / Clean Energy Decision Support Centre / CLEAN ENERGY PROJECT ANALYSIS: RETSCREEN® ENGINEERING & CASES TEXT-BOOK/Minister of Natural Resources. Canada. 2001–2005.

4. Руденко, Н.Н., Фурсова, И.Н. Моделирование температурного поля в грунте / Н.Н. Руденко, И.Н. Фурсова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2.

5. RETScreen®International Ground-source Heat Pump Project Analysis: Chapter // RETScreen®Engineering & Cases Textbook. – Ministry of Natural Sources of Canada, 2005. – 70 p.

6. Поршнев, С.В., Беленкова, И.В. Численные методы на базе Mathcad / С.В. Поршнев, И.В. Беленкова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 464 с.: ил.

7. Юренев, В.Н., Лебедев, П.Д. Теплотехнический справочник. Том 2 / В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.: ил.

8. «Почвоведение» тепловые свойства почв [Электронный ресурс]. – URL: http://racechrono.ru/pochvovedenie/3009-teplovye-svoystva-pochv.html.

9. Алексеев, В.М., Калугин, П.И. Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения / В.М. Алексеев, П.И. Калугин. – Воронеж: Гос. арх.-строит. ун-т, 2009. – 89 с.

УДК 504.06

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Н. Головтеева – магистрант
П.В. Росляков – д-р техн наук, профессор
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены основные вопросы технологического нормирования при переходе на принципы наилучших доступных технологий. Раскрывается необходимость создания программного комплекса для реализации алгоритма оптимального выбора НДТ. Приведен перечень задач программного продукта и описание разработанного алгоритма выбора технологий.

ВВЕДЕНИЕ

Главными целями научно-технической и экологической политики топливно-энергетического комплекса в настоящее время является определение путей надежного энергообеспечения страны и эффективного использования энергетических ресурсов при одновременном снижении уровня воздействия на окружающую среду. Дальнейшее развитие теплоэнергетики в России в значительной степени определяется экологическими требованиями, поэтому задача уменьшения выхода вредных веществ в процессе сжигания на ТЭС весьма актуальна и важна [1]. Последние четыре года в России осуществляется переход к экологическому нормированию воздействия крупных производств на окружающую среду, основанному на принципах наилучших доступных технологий (НДТ). НДТ является инструментом промышленной и экологической политики. При этом особое внимание уделяется экологическим инновационным решениям, которые неразрывно связаны с вопросами внедрения НДТ в различных отраслях промышленности.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ, ОСНОВАННОЕ НА ПРИНЦИПАХ НДТ

ГОСТ Р 54097-2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации» [1] установил, что наилучшая доступная технология (НДТ) «означает наиболее эффективную и передовую стадию в развитии производственной деятельности и методов эксплуатации объектов, которая обеспечивает практическую пригодность определенных технологий для предотвращения или, если это практически невозможно, обеспечения общего сокращения выбросов (сбросов) и образования отходов». К наилучшим доступным технологиям можно относить инновационные решения, отвечающие следующим критериям оценки конечного решения:

- предотвращение негативного воздействия на окружающую среду;
- сокращение (более эффективный контроль) выбросов, сбросов, отходов, других факторов;
- оптимизация использования ресурсов (в частности, энергии).

В соответствии с Федеральным законом от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [2] применение наилучших доступных технологий направлено на комплексное предотвращение и (или) минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. В частности, настоящий ФЗ устанавливает:

- введение технологического нормирования на принципах НДТ;
- разделение предприятий, оказывающих негативное влияние на окружающую среду на I, II, III и IV категории (на основании предварительной постановки на учет данных предприятий);
- разработку и публикацию информационно-технических справочников (ИТС) в

качестве документов национальной стандартизации.

Крупные мазутные и угольные ТЭС установленной электрической мощностью свыше 250 МВт относят к объектам I категории, в связи с тем что на них приходится основная масса валовых выбросов загрязняющих веществ (около 70 %) [3]. В период с 2019 по 2020 год 300 предприятий различных отраслей I категории, в том числе и объекты энергетики, обязаны получить комплексное экологическое разрешение (КЭР) в рамках программы повышения экологической эффективности.

Для получения комплексного экологического разрешения (КЭР) необходимо соответствие предприятий описанным в ИТС НДТ технологиям.

ИТС НДТ разрабатывались в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2014 г. № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» [4]. ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках с целью производства энергии» [3] содержит:

• информацию об отрасли, включая сведения об объемах потребляемого сырья и энергии;

• описание основных экологических проблем энергетики;

• перечень маркерных (загрязняющих) веществ;

• технологические показатели выбросов загрязняющих веществ (ЗВ);

• перечни НДТ, рекомендуемых к внедрению, и их описание с указанием перекрестных эффектов, ожидаемой степенью снижения выбросов ЗВ и наличия эксплуатационного опыта;

• перечни перспективных технологий.

В соответствии с ИТС 38 – 2017, маркерными веществами при сжигании органических топлив на ТЭС являются:

– при сжигании угля: оксиды азота NO_x (в пересчете на диоксид азота NO_2), диоксид серы SO_2, оксид углерода CO, зола твердого топлива;

– при сжигании мазута: оксиды азота NO_x (в пересчете на диоксид азота NO_2), диоксид серы SO_2, оксид углерода CO, зола мазутная (в пересчете на ванадий);

– при сжигании газа: оксиды азота NO_x (в пересчете на диоксид азота NO_2), оксид углерода CO.

В этой связи крайне актуальной задачей является разработка программного комплекса (ПК), позволяющего реализовать расчет выбросов маркерных веществ с последующим их анализом и алгоритм оптимального выбора наилучшей доступной технологии для внедрения на предприятиях топливно-энергетического комплекса.

2. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Задачей разрабатываемого ПК является обеспечение комплексного подхода к расчету вредных выбросов ТЭС в атмосферный воздух и выбору рекомендуемых к внедрению НДТ.

Функционал программного комплекса включает в себя:

1) определение массовых и удельных выбросов маркерных веществ и бенз(а)пирена в атмосферу с уходящими газами котлов: опытные данные или расчет в соответствии с действующими методиками;

2) сравнение расчетных/опытных значений с технологическими нормативами и определение требуемой степени снижения загрязняющих выбросов при необходимости;

3) формирование базы данных на основе информации о типе котла (по ГОСТ или заводскому номеру), которая включает в себя сведения о внедренных на котле мероприятиях, фактической степени снижения выбросов и стоимости реконструкции;

4) реализацию алгоритма оптимального выбора наилучшей доступной технологии в условиях исходных данных с учетом критериев надежности, экономичности, стоимости и др.;

5) формирование сводного перечня мероприятий по снижению вредных выбросов;

6) расчет выбраных НДТ и формирование сводного отчета.

ПК реализуется на языке программирования C#, в среде разработки Visual Studio 2013. Он является универсальным и может работать под управлением ОС серии

«WINDOWS – 2000/XP/VISTA/7/8/10» без установки дополнительных компонентов.

Расчет вредных выбросов производится в соответствии с действующими методиками на основании имеющихся исходных данных: вида сжигаемого топлива, конструктивных и режимных параметров.

Разработанный на основе опытных данных от уже внедренных технологий алгоритм обеспечивает возможность оптимального выбора НДТ. Перечень рекомендуемых технологий составляется с учетом вида сжигаемого топлива (уголь, газ или мазут), мощности котла и требуемой степени снижения выбросов маркерных веществ.

В частности, на рисунке приведен фрагмент данного алгоритма для случая сжигания в котле твердого топлива.

Твердое топливо

%	Снижение выбросов NO_x	Снижение выбросов So_x	Снижение выбросов золы
0-10	-сжигание пыли высокой концентрации -нестехиометрическое сжигание -малые избытки воздуха	-скруббер с трубой Вентури (дополнительно, но как основное при снижении выбросов золы)	-батарейные циклоны -электрофильтры -рукавные фильтры -батарейные циклоны -скруббер с трубой Вентури -эмульгаторы -комбинированные золоуловители
10-20	-малые избытки воздуха -нестехиометрическое сжигание -двухступенчатое сжигание без реконструкции	Эмульгатор (дополнительное, но основное при снижении выбросов золы)	
20-30	-нестехиометрическое сжигание -двухступенчатое сжигание -переход с ЖШУ на ТШУ -малотоксичные горелки -концентрическое сжигание	-метод LIFAK	
40-50	-переход с ЖШУ на ТШУ -двухступенчатое сжигание с реконструкцией -трехступенчатое сжигание -малотоксичные горелки -концентрическое сжигание - комплекс мероприятий	-упрощенная мокросухая очистка -скруббер Вентури по двойному щелочному способу -метод LIFAK	
50-60	-трехступенчатое сжигание -переход с ЖШУ на ТШУ -СНКВ -комплекс мероприятий -малотоксичные горелки	-упрощенная мокро-сухая очистка -мокро-сухая сероочистка -метод NID	
60-70	-переход с ЖШУ на ТШУ -комплекс мероприятий -малотоксичные горелки	-мокро-сухая сероочистка -метод NID	
70-80	-комплекс мероприятий	-мокро-сухая сероочистка -метод NID	
80-90	-комплекс мероприятий -СКВ	-мокрая известняковая сероочистка -метод NID -аммиачно-сульфатная сероочистка	
90-100	-комплекс мероприятий -СКВ	-мокрая известняковая сероочистка -аммиачно-сульфатная сероочистка -метод NID	

Рисунок. Сводная таблица НДТ при сжигании твердого топлива с разделением по степеням снижения выбросов

Данная таблица позволяет судить о рекомендуемых к внедрению НДТ в зависимости от степени снижения выбросов при сжигании в котле ТЭС твердого топлива. Стоит заметить, что при требуемой степени снижения ниже 10 % добиться уменьшения выбросов

маркерных (загрязняющих) веществ можно, проведя наладочные и ремонтные работы установленного на станции основного и воздухоохранного оборудования.

Очевидно, что весь алгоритм является достаточно массивным и трудоемким, так как обязан учитывать множество сопутствующих факторов, таких как:

• экономическая приемлемость для отрасли (желание минимизации капитальных затрат при прочих равных условиях);

• импортозамещение (использование российского оборудования);

• увеличение эффективности и надежности производства энергии и др.

Разрабатываемый ПК позволяет решить эту проблему и обеспечивает реализацию данного алгоритма с минимальными трудозатратами пользователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая разработка является универсальным средством по выбору наилучших доступных технологий. Широкий функционал программного комплекса обеспечивает востребованность данной работы на рынке инновационных решений. Его предполагается использовать:

• в качестве «помощника» для специалистов экологических служб на ТЭС для оптимального выбора НДТ при реконструкции или модернизации действующих котлов;

• при проектировании новых станций для предварительного расчета и оценки выбросов вредных веществ, эффективности внедрения НДТ и экономической целесообразности ее установки;

• в вузах в качестве методического ПО при выполнении типовых и расчетных заданий, курсовых проектов и выпускных работ студентами, магистрами, с целью подготовки высококвалифицированных кадров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды: Учебник для вузов / П.В. Росляков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 336 с.

2. ГОСТ Р 54097-2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации».

3. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». http://base.garant.ru/70700466/

4. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. – М.: Бюро НДТ, 2017. http://docs.cntd.ru/document/556173718

5. Постановление Правительства РФ от 23 декабря 2014 г. № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 28.12.2016 г. № 1508). URL: http://www.pravo.gov.ru, 28.12.2016.

УДК 658.58

CONCEPTUAL BASICS OF MANAGING PRODUCTION ASSETS IN THE ENERGY SECTOR

V.S. Kuponosova – postgraduate
A.V. Andryushin – Doctor of Engineering Sciences
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

ANNOTATION. Now in heat power engineering much attention is paid to coordination of conditions for trouble-free and effective work of the heattechnical equipment. This article shows that the management of production assets of the company is necessary to improve the performance of equipment. Analyzed are the existing ways of managing production assets. The need has been identified to develop the simplest and most accessible control method that can be used without stopping the process. This is the multicriteria selection method described by the Pareto set.

The notion of «asset management» becomes relevant for capital-intensive enterprises, a large part of whose costs are associated with maintaining a large volume of complex equipment that is constantly in need of maintenance. The search for ways to increase labor productivity and improve product quality by reducing repair costs and costs leads to the need to use a production asset management system [1].

Such activities are carried out within the framework of strict requirements: on the one hand, timeliness, timeliness and quality of maintenance and repair, on the other – to the volume of financial and human resources. In accordance with the standard [2], asset management provides a balance of costs, productivity and risks.

Optimization of expenses for equipment operation allows improving technical and economic indicators. The main goal of all enterprises is to ensure a constant working capacity and to prevent wear and tear of equipment, by timely repair and maintenance. To achieve this, different strategies are used: time to failure; preventive maintenance; repair of the technical condition, ensuring the reliability of equipment and information technology support.

Taking into account the capabilities of modern diagnostic tools, for a number of devices it is possible to switch from maintenance service to service according to the state [3]. But the adoption of an appropriate decision may require large financial costs.

Analyzing the existing methods of managing production assets, the need has been identified for developing the simplest and most accessible control method, which can be used without stopping the technological process. Thus, the subject of research are methods, models and algorithms for managing production assets based on cost and reliability characteristics using optimization methods and artificial intelligence.

For this purpose, it is proposed to develop a methodology based on a multi-criteria choice, without which it is impossible to solve many strategic tasks. The most suitable method is the choice based on the generalized criterion. For some combinations of criteria, one can describe the entire Pareto set. The Pareto set forms a set of such objects that the transition will increase the value of one criterion and worsen the value of another criterion. One of the criteria characterizes the reliability indicator, and another value indicator. The simplest and most understandable is the linear convolution of the criteria [4]:

$$\sum_{i=1}^{m} \omega_i f_i(x).$$

It is important to note that any maximum point on the set X of the linear convolution of the criteria for $\omega_i > 0$, $i = 1, 2,..., m$, is Pareto-optimal. $f_i(x)$ − reliability and cost characteristics. That is, to select options it is necessary to simply select the coefficients of linear convolution.

Often these coefficients are interpreted as both weights (or «importance ratios») of the

relevant criteria, i. e. they determine the degree of influence of individual criteria on the final choice (final or summary evaluation): the larger the coefficient, the greater the contribution the corresponding criterion makes.

The development of modern methods and systems for managing industrial assets of the energy enterprise will allow to improve the efficiency of their operation and reduce the cost of operation throughout the life cycle.

REFERENCES

1. Dmitry Tanasichuk // Production Assets Management // Journal «Managing the Enterprise». – № 6 (41). – June, 2014.

2. GOST R 55.0.01-2014 / ISO 55000: 2014 Asset management. National system of standards. General idea, principles and terminology.

3. Yashchura, A.I. Sistema maintenance and repair of common industrial equipment: Handbook / A.I. Yashchura. – Moscow: Publishing house NC ENAS, 2006. – 360 p.

4. Nogin, V.D. Linear convolution in multi-criteria optimization / V.D. Nogin // Artificial intelligence and decision-making. – 2014. – № 4. – P. 73-82.

УДК 539.67

УШИРЕНИЕ ПИКОВ ЗЕРНОГРАНИЧНОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

В.Г. Кульков – д-р физ.-мат. наук, профессор
А.А. Сыщиков – ассистент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье выявлены некоторые причины, которые помогут корректно описывать релаксационные процессы, происходящие на границах зерен.

ВВЕДЕНИЕ

Работа теплоэнергетического оборудования имеет особенности, связанные с тем, что детали и конструкции находятся в условиях высоких температур и давлений. Кроме того, вредно воздействующим фактором является также повышенный уровень вибрации. В таких тяжелых условиях работы от конструкционного материала, используемого при изготовлении оборудования, требуются характеристики, позволяющие сохранять ему высокие механические свойства. На первый план здесь выходят такие свойства, как жаропрочность и достаточно высокая демпфирующая способность. Последний параметр определяет уровень шумового загрязнения окружающей среды при работе энергетических объектов. Подавляющее большинство конструкционных материалов, используемых в оборудовании теплоэнергетики, имеет поликристаллическое строение. Основным элементом структуры таких материалов являются границы зерен и фаз. Релаксационные процессы, происходящие на них, вносят основной вклад в рассеяние энергии колебаний. Количественно последний показатель можно определять путем измерения уровня внутреннего трения.

Кроме того, метод внутреннего трения является очень информативным при исследовании микроструктуры поликристаллических материалов и их физических свойств. В некоторых случаях он является практически единственно возможным для получения информации о некоторых свойствах твердых тел [1]. Примером может являться исследование характеристик диффузионных процессов с участием примесных атомов при низких температурах, когда диффузионные пути настолько малы, что они не поддаются экспериментальному измерению [2]. В общем случае спектр рассеяния энергии колебаний состоит из монотонно возрастающей функции температуры, а также серии максимумов (пиков) различной высоты. Существование таких максимумов свидетельствует о различных физических процессах, происходящих в твердом теле, приводящих к преобразованию энергии колебаний во внутреннюю энергию [3]. Взаимное проскальзывание сопрягающихся кристаллитов по сегментам границ приводит к появлению в спектре внутреннего трения пиков.

ПРОБЛЕМА ШИРИНЫ ПИКОВ

Впервые такой пик в поликристаллическом алюминии экспериментально исследовал Тин Суем Кё [4]. В отличие от поведения стандартного неупругого тела пик имеет значительно большую ширину. В логарифмическом масштабе по частоте ширина пика Дебая стандартного неупругого тела равна 1,14, в то время как Кё наблюдал пик примерно в три раза более широкий. Линейное уравнение деформации для стандартного неупругого тела имеет вид:

$$J_R\sigma + \tau J_U \frac{d\sigma}{dt} = \varepsilon + \tau \frac{d\varepsilon}{dt}, \qquad (1)$$

где J_R и J_U – релаксированная и нерелаксированная податливость; τ – время релаксации; σ – напряжение; ε – деформация.

Решением (1) в случае динамической нагрузки [3] является переменная деформация, запаздывающая на фазу, равную по величине

$$\varphi \approx A\frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}, \qquad (2)$$

где ω – частота приложенного напряжения; A – степень релаксации.

Функция, описываемая (2), называется дебаевским пиком.

Рассмотрение проскальзывания [5-7] по сегментам таких границ зерен, ограниченных тройными стыками, приводит к выражению множителя в (2) и времени релаксации:

$$Q^{-1} = \frac{p\pi(1-\nu)lE}{RG}\frac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2},$$

$$\tau = \frac{(1-\nu)\lambda^2 S^2 nl}{4GDkT}; \quad \tau = \tau_0 \exp(E/kT), \quad (3)$$

где E и G – упругие модули; R, l – размеры зерна и сегмента границы; D – зернограничный коэффициент самодиффузии; k – фактор Больцмана; T – температура; ν – коэффициент Пуассона. При получении такого аналитического выражения предполагалось, что скорость межзеренного проскальзывания линейно связана с непряжением, действующим вдоль плоского сегмента границы. Проскальзывание ограничено по краям тройными стыками зерен. В области стыков образуются так называемые стыковые дислокации. Полное напряжение на сегменте оказывается суперпозицией внешнего напряжения и появляющегося напряжения внутри дислокационного диполя.

Время релаксации, согласно (3), определяется геометрическими размерами зерен и сегментов границ, а также коэффициентом зернограничной самодиффузии. Для его логарифма можно записать выражение

$$\ln\tau = \ln\tau_0 + \frac{E}{kT}, \quad (4)$$

где первое слагаемое определяет частотный фактор без термического влияния, а второе связано с энергией активации процесса. Геометрические параметры зерен, упругий модуль и концентрация вакансий в границе определяют величину первого слагаемого, а коэффициент самодиффузии и атомная структура границы – второе слагаемое. Размеры зерен и сегментов границ в реальном материале имеют некоторое распределение. Чаще всего его можно описывать нормальным или логарифмически нормальным законом. Числитель второго слагаемого представляет собой среднюю величину энергии активации диффузионных скачков атомов. Характерным для произвольных границ является то, что эта энергия различна для различного типа границ. Распределение границ по этому параметру определяется деталями энергетического рельефа, в котором находятся приграничные атомы смежных кристаллитов. Все это приводит к тому, что имеется непрерывный спектр времен релаксации с некоторой функцией распределения. При моделировании процесса распределение часто выбирают в виде логарифмически нормальной функции

$$\Phi(z) = \left(\beta\sqrt{\pi}\right)^{-1}\exp\left(-(z/\beta)^2\right),$$

где $z = \ln(\tau/\tau_m)$, τ_m – среднее время релаксации, β – параметр. Этим отчасти можно объяснить наблюдаемое в эксперименте уширение зернограничного пика в три и большее число раз [8].

Линейная связь скорости с полным напряжением характерна как для беспримесных границ [9], так и для границ зерен, содержащих примесные атомы [10]. Большинство границ зерен в поликристаллическом металле относится к разряду произвольных или неспециальных. Их атомное строение образует так называемые несоразмерные структуры [11]. Для каждого атома в таких структурах имеется определенное местоположение. Если на систему осуществляется внешнее воздействие, например в виде приложенного сдвигового напряжения, то для атомов возникают двухъямные энергетические конфигурации. Частота перескоков атомов в новые устойчивые положения определяет результирующую скорость проскальзывания [12, 13]. Нелинейность скорости проскальзывания в них объясняется тем, что частота перескоков граничных атомов каждого из зерен через энергетические барьеры, а также доля таких атомов зависят от величины напряжений. Известно, что зависимость скорости проскальзывания от напряжения далеко не всегда является линейной. В этом случае справедливо соотношение $v = \sigma^n$. Показатель степени может принимать значения, равное и больше единицы.

Известны наблюдаемые величины n = 1, n = 2, n = 3 и промежуточные значения [14]. В литературе обратная к нему величина известна как коэффициент скоростной чувствительности напряжений [15].

Нахождение величины внутреннего трения при наличии нелинейности связано с решением дифференциального уравнения для взаимного сдвигового смещения сопрягающихся зерен u:

$$\frac{du(t)}{dt} = I_n \left|\sigma_0 \sin \omega t - Mu(t)\right|^n \times$$

$$\times \sin\left(\sigma_0 \sin \omega t - Mu(t)\right). \qquad (5)$$

В случае $n = 1$ уравнение (3) решается точно. В других случаях точного решения нет. Приближенное решение для $n = 2$ имеет вид:

$$Q_{(2)}^{-1} = \frac{64\sqrt{2}\gamma G}{3\pi^2 Md} F_2\left(\frac{4\omega}{\pi I_2 M \sigma_0}\right),$$

$$F_2(x) = \sqrt{x}\left(x + \sqrt{x^2 + 4}\right)^{-3/2}. \qquad (6)$$

Результаты численного расчета [16] частотной зависимости внутреннего трения в установившемся режиме колебаний, основанные на решении нелинейного дифференциального уравнения (5), приведены на рисунке. Здесь по оси абсцисс отложено значение десятичного логарифма произведения ωτ.

Спектральные кривые имеют вид пиков, ширина которых возрастает по мере увеличения степени нелинейности n. Здесь же приведена кривая с $n = 1$, являющаяся дебаевским пиком. Полуширина пиков для разных значений показателя степени равна следующим величинам: 1,14; 1,75 и 2,1 при n = 1, n = 2, n = 3 соответственно. Если представлять эти пики в виде суперпозиции дебаевских с логарифмически нормальным распределением, то необходимо параметр β считать равным соответственно β = 0; β = 1,57 и β = 2,63. Однако в случае нелинейности такая полуширина пиков появляется без использования указанного распределения. Если же учесть его наличие, то полуширина пиков будет еще больше. По-видимому, этим объясняются достаточно большие значения полуширины, наблюдаемые в эксперименте.

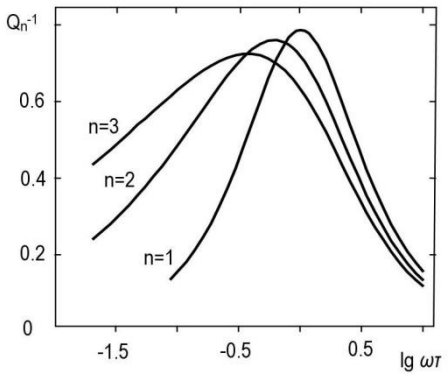


Рисунок. Частотная зависимость величины внутреннего трения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительное уширение пиков зернограничного внутреннего трения по сравнению с дебаевским связано с действием двух основных причин. Это распределение сегментов границ, по которым происходит проскальзывание, по размерам, а также распределение энергии активации в зависимости от размеров и атомного строения этих сегментов. Второй причиной, обычно не учитываемой, является наличие нелинейности в зависимости скорости проскальзывания от напряжения. Учет этих факторов поможет проектировать материалы для теплоэнергетики с заданными механическими и физическими свойствами.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

J_R – релаксированная податливость;
J_U – нерелаксированная податливость;
τ – время релаксации;
σ – напряжение;
ε – деформация;

φ – фаза переменной деформации;

ω – частота приложенного напряжения;

A – степень релаксации;

E и G – упругие модули;

R, l – размеры зерна и сегмента границы;

D – зернограничный коэффициент самодиффузии;

k – фактор Больцмана;

T – температура;

ν – коэффициент Пуассона;

τ_m – среднее время релаксации;

β – параметр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blanter, M.S. Internal Friction in Metallic Materials / M.S. Blanter, I.S. Golovin, H. Neuhauser, H.-R. Sinning. – A Handbook. – Springer, 2007.

2. Криштал, М.А., Головин, С.А. Внутреннее трение и структура металлов / М.А. Криштал, С.А. Головин. – М.: Металлургия, 1976. – 376 с.

3. Новик, А., Берри, Б. Релаксационные явления в кристаллах / А. Новик, Б. Берри. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.

4. Kê, T.S. Experimental Evidence of the Viscous Behavior of Grain Boundaries in Metals / T.S. Kê // Physical Review. – 1947. – V. 71, No. 8. – P. 533-546.

5. Кульков, В.Г. Спектр внутреннего трения в поликристаллических материалах с фасетированными границами / В.Г. Кульков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т. 2, № 1. – С. 70-72.

6. Кульков, В.Г. Внутреннее трение в поликристалле с фасетированными границами / В.Г. Кульков // Вестник МЭИ. – 2005. – № 3. – С. 120-123.

7. Кульков, В.Г. Внутреннее трение на фасетированных границах зерен с примесями / В.Г. Кульков // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – Т. 48, № 4. – С. 93-94.

8. Головин, И.С. Зернограничная релаксация в меди до и после равноканального углового прессования и рекристаллизации / И.С. Головин // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т. 110, № 4. – С. 424-432.

9. Глейтер, Г., Чалмерс, Б. Большеугловые границы зерен / Г. Глейтер, Б. Чалмерс; Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 375 с.

10. Даринский, Б.М., Кульков, В.Г. Межкристаллитное скольжение вдоль границ, содержащих примеси / Б.М. Даринский, В.Г. Кульков // Письма в Журнал технической физики. – 1992. – Т. 18, № 2. – С. 65-68.

11. Даринский, Б.М. Несоразмерные межкристаллитные границы. 1. Геометрическая классификация / Б.М. Даринский, С.В. Муштенко, Д.С. Сайко // Конденсированные среды и межфазные границы. – 1999. – Т. 1, № 1. – С. 43-50.

12. Даринский, Б.М., Кульков, В.Г. Межкристаллитное скольжение вдоль границ, образованных плотноупакованными плоскостями / Б.М. Даринский, В.Г. Кульков // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. № 5. – С. 153-156.

13. Кульков, В.Г. Межзеренное проскальзывание по границе, сопрягающей плотноупакованную и некристаллографическую плоскости / В.Г. Кульков // Вестник МЭИ. – 2005. – № 5. – С. 96-100.

14. Кульков В.Г. Релаксационные процессы на границах зерен в металлах. – Волжский: Филиал МЭИ, 2015. – 162 с.

15. Мулюков, Р.Р. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии / Р.Р. Мулюков, Р.М. Имаев, А.А. Назаров и др. – М.: Наука, 2014. – 284 с.

16. Кульков, В.Г. Внутреннее трение на границах зерен с нелинейной вязкостью / В.Г. Кульков // Металлы. – 2005. – № 4. – С. 69-73.

УДК 621.187.12

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИОНИТОВ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Р.В. Гурин – студент
Л.К. Гончарова – канд. хим. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрены особенности эксплуатации ионитов на атомных электрических станциях. Показаны принципиальные различия в использовании ионообменных смол на атомных и тепловых электрических станциях.

ВВЕДЕНИЕ

Заключительная стадия подготовки воды, связанная с изменением ее ионного состава, вплоть до полного удаления растворенных примесей, реализуется с помощью ионообменной технологии.

Сущность ионного обмена заключается в способности специальных материалов изменять в желаемом направлении ионный состав обрабатываемой воды. Иониты представляют собой нерастворимые высокомолекулярные вещества, которые благодоря наличию в них специальных функциональных групп способны к реакциям ионного обмена [1].

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНООБМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Для очистки вод реакторных контуров АЭС используют иониты в больших количествах. Несмотря на большой ассортимент выпускаемых смол, выбор наиболее подходящей смолы для конкретной задачи связан с определенными трудностями. При выборе типа смол руководствуются обычно тремя основными критериями:

– типом ионогенных групп и их ионной формой;

– видом каркаса, степенью его поперечного связывания и пористостью;

– размером и однородностью зерен смолы (для негранулированных смол – формой материала).

Дополнительными критериями при выборе смолы являются монофункциональность ионита, его чистота, механическая, химическая, термическая и радиационная устойчивость, осмотическая стабильность и т. п. [2].

Катиониты и аниониты, применяемые на АЭС

Особенность применения ионообменных материалов в атомной энергетике обусловлена их недостаточной стойкостью к действию ионизирующих излучений, более жестким требованиям к водному режиму первого контура АЭС, в частности, к содержанию ионов Cl^-, а также необходимостью переработки и захоронения отработанных смол и продуктов их регенерации [2].

На практике отдают предпочтение смолам на основе сополимера стирола с дивинилбензолом. Сильнокислотные катиониты содержат 8 % ДВБ, а сильноосновные аниониты – 4-6 %. Промышленностью также выпускаются смолы, содержащие 2-16 % ДВБ (смолы с более низким содержанием ДВБ подвергаются окислительному разложению в большей степени) [2].

В условиях ионизирующих излучений используются только особо чистые иониты в водородной и гидроксильной форме (КУ-2-8 чс, АВ-17-8 чс), которые предварительно подготавливаются – замачиваются в целях набухания и отмываются от мелкой фракции [2].

Отличие КУ-2-8 чс от обычного КУ-2-8 заключается в том, что для получения катионита ядерного класса катионит тщательно отмывают от примесей, особенно от ионов хлора, тяжелых металлов [2].

Технические характеристики ионитов, используемых на АЭС и ТЭС, представлены в табл. 1 [2].

На ТЭС, вследствие менее жестких условий, применяется широкий спектр ионитов, таких как: ТОКЕМ 800, АВ-17-8, А847/845,

А-100С, КУ-2-8, сульфоуголь, КБ-4 и другие, как отечественного производства, так и зарубежного [1].

В установках обработки радиоактивных вод используются разные формы ионитов в зависимости от принятого водного режима первого контура, не применяемые или мало применяемые на ТЭС: NH_4^+ – OH^-, N_2H^+ – OH^-, Li^+ – OH^-, K^+ – OH^-, K^+ – $H_2BO_3^-$ [3].

Учитывая специфику загрязнений 1 контура реактора ВВЭР-1000, системы очистки реакторной воды базируются, главным образом, на ионообменных фильтрах, сочетающих одновременно функции механических фильтров [1].

При истощении иониты установок СВО на АЭС регенерируются: катиониты – азотной (HNO_3) и серной кислотой (H_2SO_4), аниониты – едким натром (NaOH) или едким калием (KOH), а также в установках обработки радиоактивных вод регенерация идет раствором NaOH высшего качества, содержание хлоридов в котором не превышает 1 % [3].

На ТЭС регенерация Na-катионитного и Н-катионитного фильтров идет 6-10 % раствором NaCl для Na-катионитного фильтра и 1-1,5 % H_2SO_4 для Н-катионитного фильтра соответственно [1].

В табл. 2 представлены показатели качества технологических вод АЭС и ТЭС [1-4].

Таблица 1

Технические характеристики катионитов и анионитов

Показатель	КУ-2-8	КУ-2-8 чс	АВ-17-8	АВ-17-8 чс
Размер зерен, мм	0,315-1,250	0,40-1,250	0,315-1,25	0,315
Объемная доля рабочей фракции, % не менее	95	96	95	95
Эффективный размер зерен, мм	0,35-0,55	0,45 – 0,65	0,40-0,60	0,40-0,60
Коэффициент однородности, не более	1,8	1,7	1,7	1,8
Массовая доля влаги, %	43-53	50-60	35-50	35-50
Удельный объем в Н-форме (ОН для анионита), $см^3/г$	2,8	2,7	2,7-3,3	3,0
Полная статическая объемная емкость, $моль/см^3$, не менее	1,80	1,80	1,15	1,15

Таблица 2

Показатели качества технологических вод

Показатели качества вод	Типы реакторов			Типы котлоагрегатов			
	Реактор РМБК	1 контур ВВЭР	2 контур ВВЭР	Прямоточный котел (до 140 атм)	Котел с естественной циркуляцией		
	Питательная вода				Пит. вода (40 $кг/см^2$)	Пит. вода (100 $кг/см^2$)	Пит. вода (140 $кг/см^2$)
pH при температуре 25 °С	6,8-7,1	5,7-10,2	9,1	7-9,1	8,5-9,5	9,1	9,1
Максимальная удельная электропроводность при 25 °С, мкСм/см	0,1	–	0,4	0,3	–	–	1,5
Концентрация хлорид-ионов+ фторид-ионов, мкг/кг	4	100	3,0	–	–	–	–
Жесткость, мг-экв/кг	1	–	0,5	0,02	0,005* 0,01**	0,001* 0,003**	0,001
Концентрация кремниевой кислоты, мкг/кг	–	500	25	15	80	80	30
Концентрация кислорода, мкг/кг (после деаэратора)	20	5	10	10	20	10	10
Концентрация натрия, мг/кг	–	–	–	0,005	–	–	0,05
Содержание продуктов коррозии железа, мкг/кг	10	200-1000	20	10	50* 100**	20* 30**	20
Содержание продуктов коррозии меди, мкг/кг, не более	2	20	20		10	5	5
Содержание масла, мкг/кг	100	–	100	100	500	300	300

Примечания:
* при работе на жидком топливе; ** при работе на других видах топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из табл. 2, питательная вода на атомных электростанциях отличается по показателю pH от питательной воды тепловых станций. Также видно, что на АЭС более пристально следят за такими показателями, как максимальная удельная электропроводность и концентрация хлорид-ионов и фторид-ионов, однако на тепловых станциях установлены более жесткие требования к жесткости воды из-за опасности образования отложений на внутренних поверхностях трубок котлов.

Содержание соединений кремния и растворенного кислорода контролируется как на атомных, так и на тепловых электростанциях, а концентрацию натрия нормируют только для котлов с давлением 140 кт/см^2..

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС – атомная электростанция;

ДВБ – дивинилбензол;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

КУ-2-8 чс – марка катионита (особо чистый);

АВ-17-8 чс – марка анионита (особо чистый);

ТОКЕМ 800 – марка анионита;

А847/845 – марка анионита;

А-100С – марка анионита;

КБ-4 – марка катионита;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

РМБК – реактор большой мощности канальный;

СВО – спецводоочистка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике: учебное пособие для вузов / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 310 с.: ил.

2. Рощектаев, Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РМБК-1000: Учебное пособие / Б.М. Рощектаев. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.

3. Воронов, В.Н. Химико-технологические режимы АЭС с водно-водяными реакторами: учебное пособие для вузов / В.Н. Воронов, Б.М. Ларин, В.А. Сенина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 390 с.: ил.

4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утверждены Приказом Минэнерго России от 19.06.2003 № 229.

УДК 574.2

ОЦЕНКА РИСКА ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Г.И. Проскунина – ст. преподаватель
И.А. Карпенко, Т.И. Бекметов – студенты
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье обсуждается влияние тепла и энергетики на здоровье человека и окружающую среду. Сделан вывод о том, что использование современных теплоэнергетических технологий должно максимально поддерживать риск в разумных пределах. Развитие современного производства невозможно представить без электричества, что обеспечивает бесперебойную работу транспорта, промышленности, коммунальных услуг, сельского хозяйства.

Существует неразрывная взаимосвязь условий обеспечения теплоэнергетического потребления и загрязнения окружающей среды. В условиях постоянного роста теплоэнергетического потребления современным обществом проблема взаимодействия теплоэнергетики и окружающей среды становится все острее и требует постоянного контроля, научного анализа в целях уменьшения негативного воздействия на компоненты окружающей среды.

Развитие современного производства невозможно представить без электроэнергетики, которая обеспечивает бесперебойную работу транспорта, промышленности, коммунальных служб, сельского хозяйства. Управление рисками в области промышленной безопасности (ПБ), охраны труда (ОТ) и окружающей среды (ОС), экологическими аспектами является неотъемлемой частью деятельности предприятий теплоэнергетики. Целью оценки риска является исключение или поддержание рисков на приемлемом уровне при эффективном использовании материальных и нематериальных ресурсов, компетентного персонала, знаний и информационных ресурсов. Проводится своевременное и полное выявление опасностей и рисков, объективная оценка, своевременное реагирование на выявленные риски, ограничение негативного воздействия рисков на работников, население и окружающую среду.

Выделяют несколько способов реагирования на риск: исключение опасности как источника риска, экологического аспекта, ввод запрета на использование опасных веществ, технологии, оборудования, исключение применения оборудования устаревшего, несоответствующего оборудования, оборудования, не входящего в утверждённую технологическую схему, внедрение технологии с меньшими воздействиями на персонал и окружающую среду, исключение опасных операций или их части. Существуют следующие мероприятия снижения вероятности (предупреждения) рисковых событий:

– замена опасностей на другие, с меньшим уровнем риска;

– изоляция опасностей и применение инженерных решений;

– организационные мероприятия и документированные процедуры;

– применение средств индивидуальной защиты (СИЗ).

Мероприятия снижения потенциального ущерба (реагирования) на случай реализации происшествия позволяют:

– своевременно обнаружить (выявить) происшествие, определить первичные масштабы его последствий и возможности (сценарии) развития рисковой ситуации, распространения ущерба;

– своевременно оповестить о происшествии и возможном развитии его последствий людей, которые могут быть подвержены воздействию поражающих факторов и работников, задействованных в мерах по реагированию и ликвидации последствий;

– своевременно локализовать распространение поражающих факторов от происшествия и предупредить увеличение масштабов негативных воздействий (ущерба);

– смягчить оказанные воздействия поражающих факторов и восстановить исходные безопасные условия.

Снижение вероятности и возможных последствий риска путем его передачи частично или целиком иным лицам, которые смогут обеспечить наиболее результативные и эффективные мероприятия воздействия на риск – страхование риска и использование в контрактах обеспечительных мер, штрафных санкций.

Процесс управления рисками (рисунок) в области промышленной безопасности (ПБ), охраны труда (ОТ) и окружающей среды (ОС) включает следующие этапы:

– идентификация опасностей и потенциальных происшествий/рисковых событий;

– описание, качественная и/или количественная оценка рисков и экологических аспектов;

– выявление существенных рисков и существенных экологических аспектов;

– определение способов реагирования на существенные риски, экологические аспекты и разработка дополнительных мероприятий по воздействию на существенные риски, экологические аспекты.

– реализация мероприятий по воздействию на риски и экологические аспекты, включая мероприятия по реагированию на происшествия/реализовавшиеся риски;

– мониторинг рисков и экологических аспектов и реализации мероприятий по воздействию на риски и экологические аспекты;

– переоценка рисков и экологических аспектов с учётом реализовавшихся рисков и мероприятий по воздействию на риски, экологические аспекты.

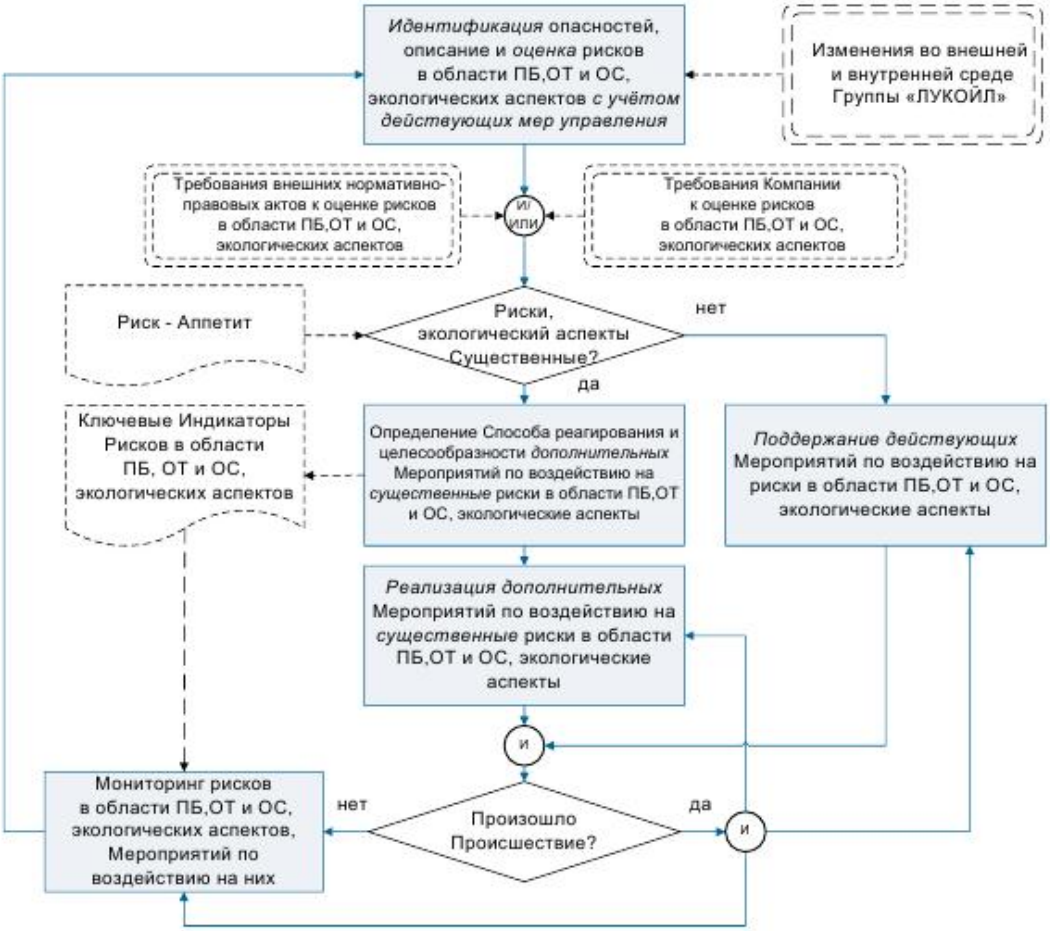


Рисунок. Общая схема процесса управления рисками и экологическими аспектами

При идентификации опасностей и оценке рисков в области ПБ, ОТ и ОС, экологических аспектов необходимо рассматривать следующие факторы.

Все виды деятельности, осуществляемые под управлением предприятия теплоэнергетики:

– деятельность, осуществляемая непосредственно;

– закупка продукции и услуг поставщиков;

– производство продукции, производимой предприятиями теплоэнергетики.

Деятельность в штатных условиях, предусмотренных технологическими процессами и порядком ведения работ, включая:

– рутинную деятельность, выполняемую регулярно или часто (в том числе техобслуживание и ремонты, накопление и удаление отходов и др.);

– нерутинную деятельность, выполняемую редко (зачистка или пропарка емкостей из-под нефтепродуктов, работы по ликвидации последствий аварий и др.).

Возможные нештатные (аварийные и чрезвычайные) ситуации природного и техногенного характера в близко расположенных промышленных объектах.

Возможное наличие «старых/исторических» источников опасности (мест загрязнений, хранения неиспользуемых опасных веществ, опасных оборудования или отходов и др.).

Человеческие факторы: состояние здоровья (слух, зрение, заболевания, самочувствие); поведение человека, его психофизиологические возможности и возможности ошибок; осведомлённость и осознание рисков; мотивы безопасного или опасного поведения и другие человеческие факторы.

Типовой перечень опасностей содержит шесть типов опасностей, которые при определённых условиях могут привести к происшествиям или рисковым событиям и связанным с ними негативным последствиям:

– физические и химические;

– биологические и психофизиологические;

– социальные;

– изменения законодательства.

Некоторые опасности могут относиться одновременно как к физическому, так и к химическому типу (например, опасные жидкости под давлением могут оказать как физическое воздействие при разгерметизации, так и химическое). При этом в первом случае их воздействие следует рассматривать как воздействие опасного фактора, могущее привести к несчастному случаю, а во втором – и как опасного фактора (при разовом воздействии с возможностью острого отравления), и как вредного (при наличии вредных и (или) опасных условий труда по данному фактору).

Прямые экологические аспекты – оказывающие непосредственное негативное воздействие на окружающую среду: образование и выброс загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных и передвижных объектов, образование и сброс загрязнённых сточных вод, образование, накопление и размещение отходов производства и потребления, загрязнение, нарушение почв, водных объектов, повышенный уровень шума и излучений, воздействие на биоразнообразие.

Косвенные экологические аспекты – потребление топливно-энергетических и природных ресурсов:

– потребление электроэнергии;

– потребление тепловой энергии;

– потребление минерального топлива (сырой нефти, мазута, дизельного топлива и бензина, природного газа);

– потребление воды из подземных и поверхностных источников, систем водоснабжения сторонних организаций.

По условиям возникновения экологические аспекты подразделяются на экологические аспекты, связанные со штатными условиями (нормальными), – это аспекты, наличие которых предусмотрено проектной, технологической и разрешительной документацией, которые неизбежно проявляются в повседневной деятельности предприятий теплоэнергетики, и на экологические аспекты, связанные с нештатными условиями – реализацией происшествий, проявления которых необходимо избегать.

Основным фактором коммерческого успеха энергетического предприятия является построение эффективной и комплексной системы управления рисками. В настоящее время реструктуризация российского рынка энергетики обусловливает появление

новых рисков для его участников и зачастую приводит к необратимым изменениям. В конкурентных рыночных условиях принятие управленческих решений предприятиями энергетической отрасли требует тщательного анализа возможных рисков и выработки основных направлений их минимизации.

С целью совершенствования управления рисками в энергетической отрасли необходимы такие мероприятия, как организация полноценного процесса выявления и оценки рисков взаимодействия между потребителями, энергетическим предприятием и государством, уход руководства предприятий данной отрасли от автономного мышления при проведении процедуры оценки рисков, качественное улучшение государственного регулирования деятельности предприятия энергетической отрасли, позволяющее в том числе существенно снизить риск недобросовестной конкуренции поведения экономических агентов в данной отрасли.

Таким образом, комплексная реализация указанных мероприятий позволит существенно улучшить управление рисками в энергетической отрасли, будет способствовать повышению ее финансовой устойчивости в условиях мировых энергетических рынков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность жизнедеятельности. Производственная безопасность и охрана труда: Учеб. пособие для студентов средних проф. учеб. заведений / П.П. Кукин, В.Л. Лапин, Н.Л. Пономарев и др. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 439 с.: ил.

2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 2003. – 304 с.

3. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – СПб.: ДЕАН, 2014. – 176 с.

4. Повышение экологической безопасности ТЭС: учеб. пособие для вузов / А.И. Абрамов, Д.П. Елизаров, А.Н. Ремезов и др.; под ред. Седлова А.С. – М.: МЭИ, 2002. – 376 с.

УДК 621.314.222.6

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Д.С. Гомазков, М.С. Кирносов – студенты
Е.Г. Зенина – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В исследовании проведен анализ влияния факторов, определяющих остаточный ресурс силовых трансформаторов при дефекте обмотки. Рассмотрены методы и приемы, которые используются для диагностики остаточного ресурса трансформаторов. Большое внимание в работе уделено рекомендациям, обеспечивающим улучшение контроля технического состояния обмоток силовых трансформаторов и вывод данного энергетического оборудования в ремонт.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из основных особенностей парка силовых трансформаторов в России является большая доля трансформаторов 110 кВ и выше, отработавших минимальный срок эксплуатации в 25 лет.

В силу высокого качества изготовления данного оборудования в большинстве случаев замена трансформаторов после истечения нормативного срока службы является технически и экономически нецелесообразной, поскольку основные элементы продолжают функционировать.

Тем не менее для обеспечения требуемого уровня надежности как электрооборудования, так и энергосистемы в целом трансформаторы, отработавшие свой ресурс, должны быть подвержены тщательному контролю технического состояния. В связи с этим в данный момент все больше внимания уделяют вопросам, связанным с диагностикой силовых трансформаторов, а также проведением капитальных ремонтов. Так, причина отказа примерно 85 % трансформаторов – это своевременно не выявленные дефекты различного рода, что в первую очередь обусловлено низкой эффективностью схем диагностики. Однако необоснованное решение о проведении капитального ремонта, его объеме и технологии в лучшем случае приводит к неоправданным затратам, в худшем – к снижению надежности, ресурса и даже отказам, а в итоге – к значительным материальным потерям.

Ввиду этого возникает проблема диагностики силовых трансформаторов на предмет возникновения дефектов в ходе эксплуатации, которая является актуальной для решения и обуславливает актуальность научной работы.

В связи с этим была выбрана цель данной работы: составить ряд критериев, обеспечивающих контроль технического состояния трансформаторов при повреждении обмотки и вывод данного энергетического оборудования в ремонт.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1) проанализировать влияние факторов, определяющих остаточный ресурс силовых трансформаторов при дефекте обмотки;

2) ознакомиться с существующим перечнем диагностируемых параметров и методов диагностики остаточного ресурса трансформаторов;

3) определить недостатки схемы принятия решения о выводе трансформатора в ремонт (если они есть);

4) сформулировать рекомендации, направленные на устранение недостатков.

1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ОБМОТОК

Следует отметить, что совокупность параметров, которые определяют остаточный ресурс, изменяется в зависимости от того, на

какой стадии жизненного цикла находится силовой трансформатор, так как износ систем в составе объекта происходит с разной скоростью. В данной ситуации целесообразно использовать метод декомпозиции – представить силовой трансформатор в виде совокупности систем и агрегатов и рассматривать ресурс отдельно для каждой системы. Остаточный ресурс трансформатора как системы в целом будет определяться как остаточный ресурс наиболее уязвимого элемента этой системы, отказ которого приведет к отказу всей системы. Однако точное определение элемента, который первым выйдет из строя, практически невозможно.

Во время эксплуатации силового трансформатора в нем могут развиться различные дефекты. Эти дефекты могут привести к нарушению работы трансформатора, сокращению его остаточного ресурса и даже выходу из строя.

Среди них следует отметить те, которые возникают в обмотке трансформатора:

• выгорание витковой изоляции и витков обмотки. Данная неисправность возникает вследствие длительного протекания сквозного тока короткого замыкания на стороне низкого напряжения трансформатора и может привести к выгоранию витковой изоляции, разложению масла, расплавлению и разбрызгиванию меди и разрушению изоляции;

• деформация обмотки. Возникает при недостаточной электродинамической стойкости обмоток по отношению к токам КЗ. При этом происходит повреждение изоляции из-за деформации обмоток с возможным повреждением трансформатора;

• увлажнение и загрязнение изоляции обмоток. Происходит при нарушении герметичности трансформатора. Приводит к снижению электрической прочности маслобарьерной изоляции и пробою первого масляного канала, что может вызвать: развитие ползущего разряда, ионизационный пробой витковой изоляции за счет вытеснения масла водяным паром из капилляров изоляции.

Таким образом, видно, что практически любой дефект, если его своевременно не устранить, может привести к серьезному нарушению работы трансформатора или выходу его из строя.

В разных источниках авторы приходят к различным выводам касательно того, повреждение какого из элементов и систем приводит к отказу трансформатора.

Так, в работе Ермакова Е.Г. анализ повреждений оборудования показывает, что более половины отказов было связано с повреждением их изоляции [1].

В исследовании Львова М.Ю. выявлено, что наиболее опасными повреждениями с точки зрения восстановления трансформатора являются внутренние повреждения обмоток, обусловленные пробоем вследствие старения изоляции и частичных разрядов [2].

Алексеев Б.А. подчеркивает, что повреждения обмоток являются наиболее часто проявляющимися, поэтому и нормативный срок службы трансформаторов основан на основе возможного износа изоляции обмоток [3].

Несмотря на то что в настоящий момент не существует единой системы оценки дефекта по степени опасности, к наиболее тяжким последствиям можно отнести деформацию обмоток и повреждение изоляции.

Рассмотрев наиболее тяжелые дефекты, возникающие в обмотке во время эксплуатации, следует проанализировать диагностируемые параметры и методы диагностики остаточного ресурса трансформаторов при дефекте обмотки.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ ДИАГНОСТИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ДЕФЕКТЕ ОБМОТОК

Руководящим документом, используемым для оценки технического состояния трансформатора, является РД-34.45-51.300-97 «Объемы и нормы испытаний электрооборудования». Согласно данному документу, в перечень диагностируемых параметров при повреждении обмотки входят следующие электромагнитные параметры трансформатора:

• измерение коэффициента трансформации;

• измерение тока и потерь холостого хода;

• измерение сопротивления и потерь короткого замыкания трансформатора;

• измерение сопротивления обмоток постоянному току;

• измерение коэффициента трансформации;

• измерения влагосодержания твердой изоляции с помощью измерения частотной зависимости tg δ.

1. Коэффициент трансформации

Является первым критерием оценки технического состояния трансформатора. Результаты измерения коэффициента трансформации сравниваются с паспортными данными или с данными, полученными на основании электромагнитного расчета. В случае если отклонение значений составляет величину, не превышающую 2 %, результаты измерений принято считать удовлетворительными.

Стандарт IEEE определяет допустимое отклонение коэффициента трансформации от исходного значения как ±0,5 %.

2. Ток и потери холостого хода (х.х.)

Измерение потерь холостого хода производится с целью выявления такого рода дефектов, как старение магнитной системы, нарушение изоляции пластин магнитопровода, образование короткозамкнутых контуров в магнитопроводе [4]. Величина тока и потерь х.х. при рабочем напряжении являются важными критериями для оценки качества изготовления и ремонта трансформатора. Значение данного критерия сравнивается с аналогичным параметром, указанным в паспорте трансформатора (исходным). Данное значение не должно отличаться от исходного параметра на величину, превосходящую 5 %, – для трехфазных, и превосходящую 10 %, – для однофазных трансформаторов.

3. Сопротивление и потери короткого замыкания

Изменение сопротивления короткого замыкания (Zk) является одним из основных параметров, характеризующих деформацию обмоток [5].

Оценка состояния обмоток трансформаторов производится путем сопоставления измерений данных по фазам с данными ранее производимых измерений. Относительное изменение сопротивления короткого замыкания возникает, как правило, при деформации обмоток и определяется конструкцией трансформатора. Предельно допустимое значение отклонения составляет 3 %. С помощью анализа потерь от потока рассеяния возможно определить наличие замыкания параллельных проводников в обмотках, деформацию обмотки или ее частей.

4. Сопротивление обмоток постоянному току

Данное измерение дает возможность выявить ухудшение контактов, преимущественно в местах размыкаемых контактов устройства РПН, а также в местах присоединения отводов к вводам. Измерения в процессе эксплуатации производятся при комплексных испытаниях трансформатора [6].

Сопротивления обмоток трехфазных трансформаторов, измеренные на одинаковых ответвлениях разных фаз при одинаковой температуре, не должны отличаться более чем на 2 %. Если из-за конструктивных особенностей трансформатора это расхождение может быть большим и об этом указано в заводской технической документации, следует руководствоваться нормой на допустимое расхождение, приведенное в паспорте трансформатора. Значения сопротивления обмоток однофазных трансформаторов после температурного пересчета не должны отличаться более чем на 5 % от исходных значений.

Для определения остаточного ресурса трансформатора используются различные приемы диагностики.

• Сравнение с исходными данными. Данный прием предпочтительнее использовать для тестирования бездефектного оборудования. Для анализа трансформаторов применяются: измерения по методу анализа частотных характеристик, определение переходных функций при подаче на вход обмотки импульсов ЧР, импульсного напряжения или напряжения переменной частоты широкого спектра, спектр вибрационных характеристик и спектральный анализ масла.

• Анализ тенденции измерения характеристик. В ходе этого измерения можно получить ценную характеристику – скорость измерения какого-либо параметра во времени, но в то же время отсутствие какого-либо изменения во времени не является показателем нормального состояния.

• Статистический метод. Выделяется оборудование, количественное значение характеристик которого попадает в 10- или 5-процентный статистический интервал нормального распределения. Соответственно 90 или 95 % выборки относится к нормальному состоянию.

• Ранжирование оборудования по состоянию. Этот метод используется для оценки остаточного ресурса трансформаторов и включает количественную градацию признаков возможного состояния, определенных на основании экспертных оценок на базе анализа особенностей конструкции, условий и опыта эксплуатации.

• Составление модели дефектов. Вероятность возникновения и развития дефекта зависит от особенностей конструкции, поэтому данный метод включает в себя перечень возможных повреждений и дефектов в данном функциональном узле трансформатора и вероятный сценарий вплоть до отказа оборудования.

• Анализ конструкции. Он является ключевой процедурой для понимания структуры трансформатора и основных функций его компонентов, оценки чувствительности к возможному ухудшению состояния в процессе эксплуатации, а также определения модели вероятных дефектов, позволяющей оптимизировать программу диагностических испытаний и выбрать наиболее эффективные методы.

Кроме основных приемов диагностики, существуют менее распространенные дополнительные методы диагностики.

1. Метод измерения характеристик частичных разрядов.

В основном срок службы высоковольтного оборудования определяется ресурсом изоляции. Одной из главных причин старения изоляции является действие частичных разрядов (ЧР).

В настоящее время наиболее развиты следующие методы ЧР [7]:

• электрический;

• СВЧ-метод;

• акустический.

Электрический метод регистрации ЧР предполагает наличие непосредственного электрического контакта измерительного прибора и объекта измерения, что является существенным недостатком.

Однако именно при использовании данного метода возможно получить наибольшее количество характеристик частичных разрядов, что в конечном итоге дает возможность для всестороннего изучения ЧР. Поэтому данный метод получил широкое распространение на практике [8].

СВЧ-метод обнаружения позволяет найти ЧР при помощи направленного действия СВЧ-антенны. Основное преимущество данного метода заключается в отсутствии электрического контакта измерительного прибора с объектом измерения. Это позволяет использовать его при любых классах напряжения. Однако данный метод не позволяет получить количественную оценку многих характеристик частичных разрядов и отличается большой погрешностью из-за сильной подверженности влиянию других приборов посредством электромагнитного излучения.

Акустический метод регистрации частичных разрядов первоначально разрабатывался для обнаружения места возникновения ЧР в электрооборудовании, в частности в оборудовании с элегазовой изоляцией, однако позволяет регистрировать ЧР во всех частях трансформатора.

2. Определение влагосодержания с помощью измерения частотной зависимости tg δ.

Увлажнение изоляции является одним из решающих факторов, определяющих ухудшение ее параметров. В качестве основного источника увлажнения выступает атмосферная влага, которая под влиянием давления проникает внутрь трансформатора, как правило, через разуплотнения.

Неравномерное увлажнение изоляции наблюдается в течение всего срока эксплуатации. Влага, выделяющаяся из-за старения, тоже распределяется неравномерно. Одновременно с этими процессами происходит «миграция» влаги с наиболее изношенных участков в области пониженной температуры.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ВЫВОДЕ ТРАНСФОРМАТОРА В РЕМОНТ

Определение критериев вывода трансформатора в ремонт связано, в первую очередь, с определением вида, объема и периодичности профилактических испытаний, необходимых для определения технического состояния трансформатора.

Несколько типов нормативных испытаний нуждаются в доработке, в частности, измерение коэффициента трансформации, а также величины потерь и тока х.х. В исправно функционирующем трансформаторе они не только не позволяют получить никакой полезной информации, но и приводят к дополнительным затратам времени и средств.

Поскольку ряд критериев оценки технического состояния трансформатора определяется конструкцией трансформатора, то такие критерии нельзя считать универсальными. К ним относится сопротивление короткого замыкания Zk.

Также в данный момент ограничены возможности определения загрязнения поверхности изоляции; отсутствует методика определения степени старения бумаги в наиболее нагретой зоне.

На основании вышеизложенных недостатков критериев авторы предлагают следующий список рекомендаций.

1. Проводить измерение коэффициента трансформации и потерь холостого хода только во время монтажных и предремонтных испытаний, так как для этого необходимо отключение рабочего трансформатора.

2. Использовать измерение ЧР в качестве метода дополнительной диагностики для трансформаторов, который показывает симптомы разрядов или значительное снижение электрической прочности.

3. Использовать определение влагосодержания с помощью измерения частотной зависимости tg δ в качестве метода, дополняющего определение влагосодержания.

4. Проведение дополнительных профилактических испытаний в период межсезонья, так как перепады температур и нагрузок, характерные для данного периода, могут спровоцировать отказ трансформатора. Это позволит своевременно выявлять дефекты и предупреждать повреждение трансформатора. Однако проведение дополнительных испытаний предполагает значительные дополнительные материальные затраты на их проведение. Это делает целесообразным проведение дополнительных испытаний лишь для наиболее ответственных трансформаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследовательской работы был проведен анализ влияния факторов, определяющих остаточный ресурс силовых трансформаторов при дефектах обмотки. Обмотка силового трансформатора является одной из его уязвимых частей, дефекты в которой могут привести к нарушению работы трансформатора, сокращению его остаточного ресурса и даже выходу из строя. Среди таких дефектов выделяют: выгорание витковой изоляции и витков обмотки; деформацию обмотки; увлажнение и загрязнение изоляции обмоток.

При изучении дефектов, возникающих в обмотке во время эксплуатации, были проанализированы диагностируемые параметры и методы диагностики остаточного ресурса трансформаторов: метод сравнения с исходными данными; анализ тенденции измерения характеристик; статистический метод; ранжирование оборудования по состоянию; составление модели дефектов; анализ конструкции; метод измерения характеристик частичных разрядов; определение влагосодержания с помощью измерения частотной зависимости tg δ.

Были сформулированы критерии оценки технического состояния силовых трансформаторов при повреждении обмотки. В результате проведенного анализа удалось установить, что часть критериев, использующаяся при оценке технического состояния, нуждается в дополнении, а некоторые определяются конструкцией трансформатора, и их нельзя считать универсальными. Для разработки универсальной системы оценки технического состояния необходимо проводить дальнейшие исследования, развивая существу-

ющие и разрабатывая новые системы оценки технического состояния.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КЗ – короткое замыкание;
х.х. – холостой ход;
РПН – регулирование под нагрузкой;
ЧР – частичный разряд;
СВЧ – сверхвысокие частоты;
tg δ – тангенс угла диэлектрических потерь;
Zk – сопротивление короткого замыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков, Е.Г. Оптимизация схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжений [Электронный ресурс]: автореф. дис. … канд. тех. наук / Е.Г. Ермаков; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Электрон. текстовые дан. – СПб., 2010. URL: http://elib.spbstu.ru/dl/1951.pdf

2. Львов, М.Ю. ОАО «Холдинг МРСК». Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше / М.Ю. Львов // Электроэнергетика. – 2012. – № 1. – С. 71-74.

3. Алексеев, Б.А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии / Б.А. Алексеев. – М.: Энергопрогресс, 2010. – С. 64-68.

4. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97 – 6-е изд. – М.: ЭНАС, 2001. – 256 с.

5. Хренников, А.Ю., Киков, О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самарэнерго методом низковольтных импульсов / А.Ю. Хренников, О.М. Киков // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 47-51.

6. Тубо, Ж.П. Современные проблемы эксплуатации электроэнергетического оборудования / Ж.П. Тубо, Т. Ломан, А. Райхерт, А.Е. Монастырский, С.А. Николова // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования, Выпуск 2. «Технологии координации изоляции и эксплуатация современных технических средств от перенапряжений в сетях с изолированной и резонансно заземленной нейтралью»: Материалы международной научно-технической конференции, 31 марта – 05 апреля 2003 года. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – С. 4-12.

7. Андреев, А.М. Частичные разряды и методы их измерения / А.М. Андреев, А.Е. Монастырский, Ю.В. Соловьев; под ред. А.И. Таджибаева. – СПб.: ПЭИПК, 2010. – С. 36-37.

8. Вдовико, В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 25-26.

УДК 621.18-6

ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕХОДА ОТ ТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ К ВОДОРОДНОЙ

Д.И. Миронов – магистрант
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются проблемы традиционной энергетики и перспективы, связанные с использованием водорода как энергоносителя. Определено место водородной энергетики и систем энергообеспечения на основе водородных топливных элементов в структуре российской энергетики. Разработаны предложения по совершенствованию стратегического управления водородной энергетикой и внедрению государственных инструментов стимулирования применения водородного топлива и топливных элементов для энергоснабжения потребителей в различных отраслях промышленности и сферах хозяйствования.

Как известно, наша сегодняшняя энергетика – углеводородная. Сотни миллионов лет эволюция планеты копила доступные топливные реагенты в земной коре и атмосфере. Нефтяные топлива содержат 85-87 % углерода. Дизельный смрад и бензиновый перегар заложены в самой основе углеводородной теплотехники. Энергозатраты на добычу и переработку нефти только возрастают, доступные запасы ископаемого сырья – уменьшаются, а экологический ущерб возрастает.

Развиваемые с конца 1970-х гг. идеи водородной энергетики (ВЭ), напротив, основаны на использовании оборотного водорода (H_2), выделяемого из воды с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В рамках ВЭ соединения углерода либо не используются, либо являются оборотным рабочим телом между биосферой и атмосферой. Способы получения дешёвого водорода сегодня известны и достаточно разнообразны. Однако хранить и транспортировать самый летучий и легчайший элемент крайне небезопасно и нетехнологично. Диапазон взрывоопасных концентраций водорода с воздухом в 7 раз шире, чем для природного газа, а минимальная энергия воспламеняющей искры – в 16 раз меньше. Водород имеет высокую энергоемкость, которая в 3-5 раз превышает аналогичный показатель для бензина и нефти. В энергетическом плане ему присущи универсальные свойства: он является восстановителем, энергоносителем и топливом.

Потребность в высокоэнергетическом и экологически чистом топливе привела к возникновению водородной энергетики, быстрое развитие которой позволяет утверждать, что водород является горючим будущего. Водород, с точки зрения сохранения окружающей среды, – это идеальное топливо. Сгорая в чистом кислороде, он превращается в воду. Если его получать из воды путём электролиза, то процесс замыкается: вода – водород – вода. Ресурсы этого топлива колоссальные и постоянно возобновляются. Водород может стать универсальным топливом, вот почему его называют топливом будущего. Для получения водорода могут быть применены различные термохимические, электрохимические или биохимические методы с использованием энергии Солнца, атомных и гидравлических электростанций и пр. Газообразный, даже сильно сжатый водород невыгоден, так как для его хранения нужны баллоны большой массы. Более реальный вариант – использование жидкого водорода, но для этого необходимо устанавливать дорогие криогенные баки со специальной термоизоляцией. Возможна еще одна форма хранения водорода – в твёрдой фазе в составе некоторых металлогидридов.

Классическая ВЭ – это романтическая иллюзия без широкой практической реализации.

Однако связанный водород предельно безопасен в недефицитных носителях на основе N-атомов. Плотность водорода в таких азотно-водородных топливах (АВТ) близка

к плотности жидкого водорода. Продукты сгорания АВТ (парогаз) более чистые, чем в случае сжигания спиртов или метана.

Главное термодинамическое качество АВТ – присутствие встроенного окислителя в жидкой фазе, что делает горючую смесь частично топливом-порохом. Рост газообразования при пороховом сгорании зарядов АВТ действует как химический наддув рабочих газов. Плотность, энергосодержание и расширяемость рабочих зарядов воздух + АВТ превосходят показатели штатных зарядов воздух + углеводороды в тех же условиях, что компенсирует меньшую калорийность альтернативных носителей.

Львиная доля теплоты сгорания водородоносителей АВТ обеспечена окислением химически связанного водорода. Основной продукт сгорания АВТ – пары воды. На фоне общего снижения тепловых выбросов эквивалентный выход углекислого газа уменьшается в разы, а эмиссия других углеродистых вредностей – на порядок, при полном исключении оксидов серы и резком снижении выбросов оксидов азота.

Азотно-водородные топлива нетоксичны и неопасны для человека, не выделяют паров, биоразложимы и практически пожаробезопасны в обращении, если топливные растворы содержат добавку воды.

Имеются перспективы применения АВТ в оборонных отраслях. Например, для двигателей негорючих танков, бронетехники и автотранспорта. Негорючесть топлива – существенный фактор повышения живучести боевых машин.

Автономные мини-ТЭС в жилых районах не будут загрязнять воздух, при этом теплота конденсации парогаза будет утилизирована в локальных теплосетях и теплоаккумуляторах.

Основа сырьевой базы АВТ – газы воздуха, вода и ВИЭ. Сегодня необходимый для синтеза компонентов АВТ водород выделяют в процессах паровой конверсии метана (ПКМ). Общее производство водорода в мире превышает 50 млн т/год. Примерно 50 % водорода расходуется в азотной промышленности, 30 % – в нефтехимии, 10 % – в органическом синтезе, а также в металлургии, пищевой промышленности и др. По аналогии с процессами ПКМ для производства водорода сегодня доступно органическое сырьё и биомасса, в том числе с использованием ВИЭ.

Стоимость синтеза АВТ, как и обычных азотных продуктов, лимитирована дешевизной водорода. Рентабельное производство компонентов АВТ целесообразно на базе штатных процессов крупнотоннажных азотных производств. Стоимость 1 кг водорода сегодня ($2-3) позволяет синтетическим АВТ конкурировать со светлыми моторными нефтепродуктами. Как и в современных азотных производствах, промышленный цикл синтеза АВТ – замкнутый. Все необходимые органические полупродукты синтезируются из доступного биосырья. Стадии сушки и ректификации веществ исключаются. В дальнейшем, с удешевлением производства водорода, стоимость АВТ будет уменьшаться.

В XXI веке азотная промышленность будет развиваться параллельно решению задач выделения водорода из воды для нужд ВЭ. Мощность азотных производств можно наращивать почти неограниченно. Для этой цели могут быть использованы освободившиеся из добывающих отраслей ресурсы.

Технологии АВТ – реальный шанс стать безусловным лидером в практической водородной энергетике.

В будущем водород станет частью решения проблемы загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВТ – азотно-водородное топливо;
ВЭ – водородная энергетика;
ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
ПКМ – паровая конверсия метана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузык, Б.Н., Яковец, Ю.В. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, Ю.В. Яковец. – М.: Институт экономических стратегий, 2007.

2. Кузык, Б.Н. На пути к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, В.И. Кушлин, Ю.В. Яковец. – М.: ИНЭС, 2005.

3. Коробцев, С.В. Безопасность водородной энергетики / С.В. Коробцев, В.Н. Фатеев // Энергия: Экон., техн., экол. – 2013.

УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ПРЕДОЧИСТКИ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТРУБОПРОКАТНОГО СТАНА SR-9 АО «ВОЛЖСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД»

Ю.В. Гусева[1] – канд. физ.-мат. наук
В.В. Водопьянов[1,2] – магистрант, нач. смены ЭНЦ-2
[1]Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия
[2]АО «Волжский трубный завод», г. Волжский, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены вопросы совершенствования существующей схемы очистки системы оборотного охлаждения трубопрокатного стана SR-9 АО «Волжский трубный завод» и выполнена оценка режимов работы технологического оборудования. Предложены рекомендации по выбору необходимого оборудования для непрерывной очистки отстойников на основании результатов численного моделирования, позволяющие осуществить оптимальный выбор химических реагентов для эффективного осаждения окалины и шлама в отстойниках. Улучшение очистки оборотной воды способствует снижению интенсивности загрязнения насосных емкостей и охлаждающей градирни, снижению износа перекачивающих агрегатов, повышению надежности системы.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодный рост производительности трубопрокатного стана в ТПЦ-3 АО «ВТЗ» приводит к увеличению количества шлама в сточных водах системы оборотного охлаждения SR-9 и повышению ее температуры. Существующая технология очистки воды не обеспечивает требования качества водоподготовки, это влечет за собой значительные проскоки шлама и осаждение его в каналах и элементах оборудования, что приводит к загрязнению и возникновению локальных перегревов, преждевременному износу и производственным простоям трубопрокатного стана.

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ

Согласно проведенному на базе предприятия лабораторному исследованию, состав примесей допускает их выделение на первой ступени обработки только посредством механической очистки. На рисунке представлена классическая схема устройства горизонтального отстойника.

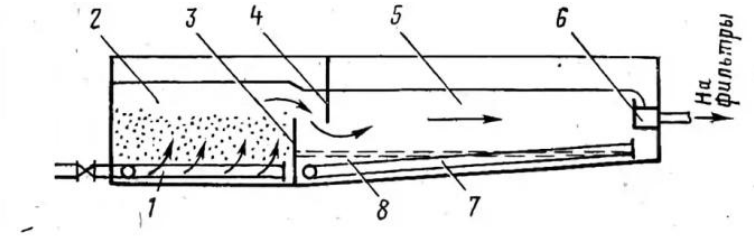


Рис. 1. Схема устройства горизонтального отстойника:
1 – дырчатые распределительные трубы; 2 – нижняя часть камеры хлопьеобразования; 3 – водослив; 4 – перегородка; 5 – зона осаждения; 6 – водосборный желоб; 7 – система дырчатых труб; 8 – зона накопления и удаления осадка [1]

В реальных условиях позиции 1, 2 и 7 отсутствуют. Очистка сточных вод системы оборотного охлаждения SR9 от грубодисперсных примесей производится гравитационной сепарацией в двух горизонтальных отстойниках, геометрические размеры которых – в плане 21 × 6 м. Поскольку размер частиц примесей составляет более 10^{-4} мм, воды осветляют без применения коагулянта. Флокулянт NALCO(R)9909 дозируется в лотки

для сбора и подачи оборотной воды в отстойники и непосредственно в отстойник, что не обеспечивает надежного контакта между флокулянтом и сточными водами. Механизированный способ сухого шлакоудаления осуществляется грейфером.

Отстойные сооружения должны осуществлять процесс осветления под действием сил тяжести, направленной вертикально вниз, гидродинамической силы, связанной с направлением основного потока и взвешивающей силы, которая зависит от гидродинамических характеристик потока и пульсации скоростей. Имеющиеся на предприятии отстойники не обеспечивают 50-60%-ную очистку, согласно технологическим требованиям, поскольку произошло увеличение размеров производства. Запроектированные на расход 500 $м^3$/ч отстойники вынуждены принимать 1500 $м^3$/ч. Эффект осветления в них – около 20 %, режим движения жидкости – турбулентный, характеризующийся наличием высоких пульсационных скоростей. Наличие взвешенных веществ в отстойных сооружениях вызывает различие в плотности жидкости по глубине. Движение жидкости следует рассматривать как движение стратифицированного потока. Неоднородность плотности приводит к появлению Архимедовой силы, способной перемещать частицы в общем объеме [1]. Наблюдается вынос твердых частиц из отстойника. Ситуация значительно осложняется наличием нефтепродуктов в сточной воде до 60 мг/л. Нефтеловушки не осуществляют достаточную очистку из-за увеличения объема обрабатываемых вод. В результате образовавшийся нерастворимый конгломерат из твердых веществ, флокулянта и нефтепродуктов попадает на песчаные фильтры, где забивает верхний слой, препятствуя дальнейшей фильтрации.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предварительный анализ показал необходимость в доочистке. В качестве дополнительных мероприятий можно рекомендовать увеличение цикла отстаивания за счет создания необходимых дополнительных емкостей-отстойников, создания резервных отстойников для обеспечения непрерывности обработки вод. Доочистку сточных вод от взвешенных частиц можно также производить в поле действия центробежных сил. Этот процесс осуществляется в открытых или напорных гидроциклонах и центрифугах [2].

Оптимизировать работу уже используемых сооружений можно путем создания математической модели расчета дозы флокулянта и автоматизирования его подачи в зависимости от объема и качества сточной воды, поступающей в горизонтальный отстойник.

Нефтеловушки обычно применяются для удаления плотной нефтяной плёнки, что более характерно для нефтеперерабатывающих предприятий. В данном случае, как элемент механической очистки сточных вод, может применяется мембранный метод очистки, который является эффективным способом очистки. Нефтепродукты и прочие мелкодисперсные вещества из воды можно выделить флотацией или на установках адгезионно-каскадной сепарации, а также разрушать биохимическими методами. Биологические методы очистки нефтесодержащих сточных вод включают обработку биологически активной средой, которая поглощает или ускоряет распад определённых соединений и нефтепродуктов.

Эффективное выделение нефтепродуктов может обеспечить метод электрофлотационной очистки. Недостатком метода является повышенный расход металла и электроэнергии. Инновацией этого метода стала возможность подбора раствора с такими характеристиками, которые позволяют получать коагулянт из отходов металла, а не из дорогостоящей стали. При концентрации нефтепродуктов в воде на уровне 30-50 мг/л или несколько более нерентабельно использование центробежных способов. Высокий показатель очистки воды от нефтепродуктов достигается сорбционными методами. В качестве поглотителей нефтепродуктов широко используют отходы деревообрабатывающей и целлюлозной промышленности, растительные отходы костров, пакли, мха и лишайника. Иногда, для того чтобы дочистить сточную воду, используют активированные угли. Для того чтобы собрать нефтепродукты, учитывают следующие параметры, такие как

нефтепоглощение, водопоглощение и степень отжима [3]. Примером использования коалисцентной и сорбционной техники могут быть локальные очистные сооружения – сепараторы нефтепродуктов.

Двухступенчатая технология предусматривает на первом этапе удаление из воды водомасленых эмульсий экстракцией маслами, оставшееся количество нефти (2-5 мг/л) удаляется из воды на специальных сорбентах, гидрофобизированных древесных опилках. Древесные опилки предварительно активировали, в результате раскрывали межфибрилярные полости, куда по специальной технологии внедряли парафины (С30 и выше). Такие гидрофобизированные сорбенты не набухали в воде и обладали сорбционной емкостью 5–7 г/г. Остаточное содержание нефти после сорбционной очистки – не менее 0,1 мг/л [4].

ВЫВОДЫ

По результатам анализа режимов работы технологической схемы очистки системы оборотного охлаждения трубопрокатного стана SR-9 АО «Волжский трубный завод» установлен повышенный расход воды на стадию предочистки, что затрудняет работу всей технологической цепочки.

На основании результатов исследования предложены рекомендации по выбору оборудования системы охлаждения для непрерывной очистки отстойников, позволяющие осуществить оптимальный выбор химических реагентов для эффективного осаждения окалины и шлама в отстойниках. Приведено описание технологических решений по удалению из технологических вод грубодисперсных примесей, оказывающих дополнительное негативное воздействие на эффективность работы системы предочистки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев, С.В., Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2004. – 704 с.

2. Хенце, М. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван; пер. с англ. – М.: Мир, 2006. – 480 с.

3. Кузнецова, В.М., Овсянкина, А.В. Современный взгляд на методы очистки сточных вод на нефтеперерабатывающих заводах и предприятиях / В.М. Кузнецова, А.В. Овсянкина // Молодой ученый. – 2017. – № 32. – С. 4-9.

4. Будиловскис, Д. Составы и свойства осадков, полученных при очистке сточных вод ферроферригидрозолем / Д. Будиловскис, П. Балтренас, Д. Щупакас, Л.С. Ещенко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 36-38.

УДК 620.9(043.3)

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С АМОРФНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С.А. Чепрасов – магистрант
Е.Г. Зенина – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты исследования по внедрению новых типов энергосберегающих силовых трансформаторов в распределительных сетях 10/0.4 кВ взамен устаревшим аналогам традиционного исполнения. Для определения величины денежного баланса между получаемой выгодой от экономии электроэнергии в аморфном трансформаторе (70-80 %) и его более дорогой себестоимостью (в 1,5-3 раза по сравнению с обычным трансформатором) выполнен технико-экономический расчет, по которому можно провести полный анализ сравниваемых вариантов электроснабжения.

Одним из наиболее важных моментов при проектировании электрических сетей является выбор числа и мощности силовых трансформаторов. При рациональном выборе мощности силовых трансформаторов необходимо учитывать перспективы развития и будущие нагрузки на данном объекте, их динамику с течением времени (увеличение или снижение энергопотребления), а также объективно оценить категорию потребителя с целью выбора правильного числа трансформаторов на подстанциях для возможности надежного общего резервирования.

При проектировании районной электрической сети Суровикинского района Волгоградской области в одном из населенных пунктов была учтена потребляемая мощность сельскохозяйственного предприятия – комбикормового завода. Следует отметить, что данный потребитель электроэнергии относится ко второй категории электроснабжения, перерыв в работе которого приведет к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта. По максимальной нагрузке производственной базы и графикам нагрузки комбикормового завода было выбрано количество и мощность трансформаторов. Так как предприятие относится ко второй категории, то на подстанции установлено два трансформатора номинальной мощностью 630 кВА каждый. На рис. 1 представлена однолинейная электрическая схема электроснабжения комбикормового завода.

С учетом технических требований рассматриваются два возможных варианта по выбору трансформаторов, оптимальность которых определяется на основании технико-экономического расчета:

I вариант – два трансформатора ТМГ – 630/10/0.4;

II вариант – два аморфных трансформатора АТМГ – 630/10/0.4.

Из приведенных выше вариантов следует, что производится сопоставление трансформатора традиционного исполнения и энергосберегающего трансформатора нового поколения с аморфным магнитопроводом.

Для определения наиболее эффективного варианта электроснабжения промышленного предприятия выполняют экономическую оценку каждого из приведенных вариантов. Необходимые данные по основным техническим параметрам силовых трансформаторов были выбраны из соответствующего данной тематике исследования по энергосбережению в распределительных установках [1].

Первоначальным этапом при выполнении технико-экономического расчета является определение капитальных вложений ($K_в$), которые формируются из расходов на приобретение ($З_п$), транспортировку ($З_т$) и монтаж самих трансформаторов ($З_м$).

Ко второму этапу определения наиболее рационального варианта электроснабжения относят определение годовых эксплуатационных затрат ($Э_з$), которые учитывают стоимость годовых потерь электроэнергии в трансформаторах ($C_{Δэ}$), которая имеет чрезвычайно важное значение при оценке вариантов, так как данная составляющая представляется косвенным показателем технической стороны сравниваемых вариантов. Помимо этого, данная составляющая включает в себя и другие показатели, такие как амортизационные отчисления ($A_о$), прочие затраты ($П_р$), расходы на ремонт и техническое обслуживание ($P_{т.о}$). Условием выбора наиболее эффективного варианта являются приведенные затраты [3]. Помимо приведенных затрат, экономическое обоснование инвестиций могут дать простые и дисконтированные сроки окупаемости капитальных вложений [2], [3]. Для наглядности выбора варианта электроснабжения результаты расчетов основных видов затрат и различные сроки окупаемости сведены в таблицу.

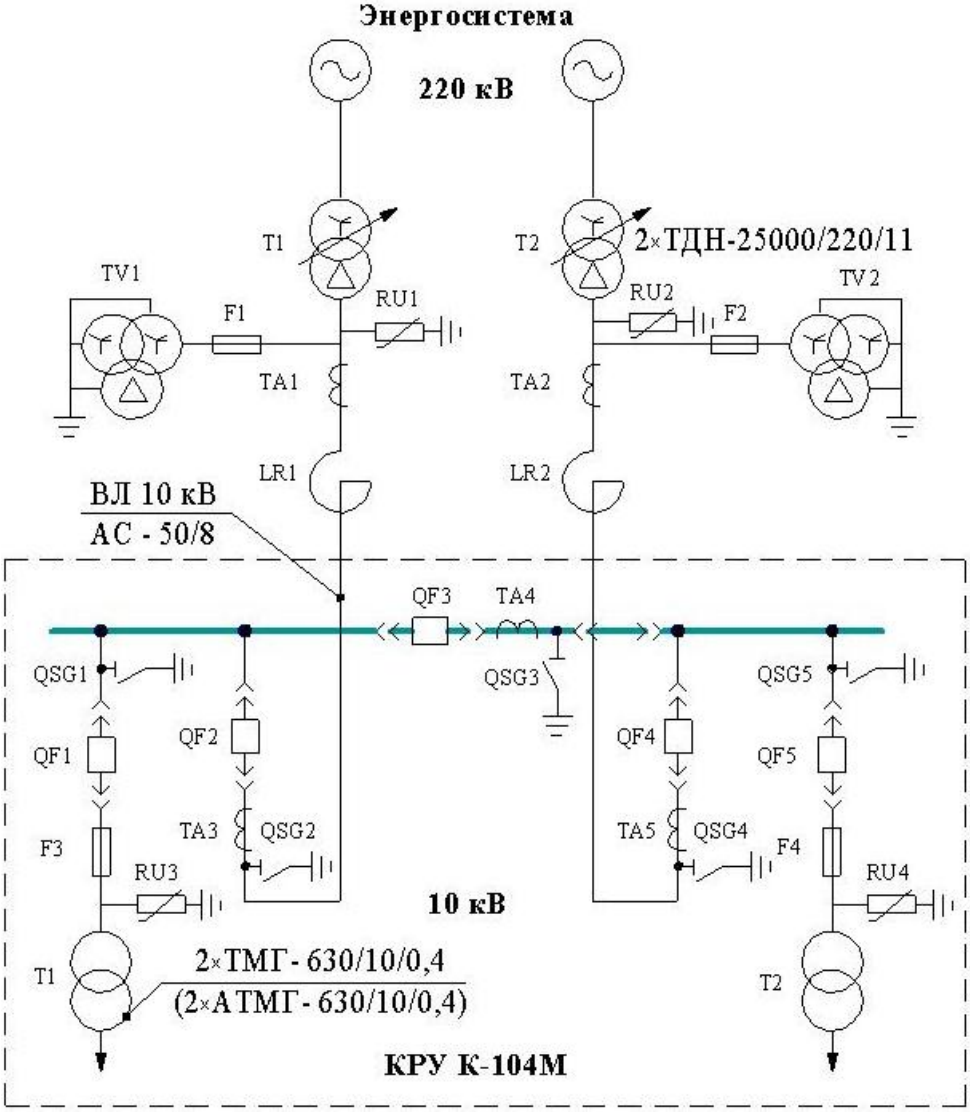


Рис. 1. Однолинейная электрическая схема электроснабжения промышленного предприятия:
T1, T2 – силовой трансформатор; TV1, TV2 – трехфазный трехобмоточный трансформатор напряжения;
F1, F2, F3, F4 – предохранитель плавкий; RU1, RU2, RU3, RU4 – ограничитель перенапряжений;
TA1, TA2, TA3, TA4, TA5 – трансформатор тока измерительный; LR1, LR2 – реактор токоограничивающий;
QSG1, QSG2, QSG3, QSG4, QSG5 – разъединитель заземляющий; QF1, QF2, QF3, QF4, QF5 – выключатель автоматический в силовых цепях и цепях управления

Основные виды затрат и сроки окупаемости двух вариантов электроснабжения промышленного предприятия

Показатель	ТМГ – 630/10/0.4	АТМГ – 630/10/0.4
Затраты на капитальные вложения, тыс. руб.	871,32	1132,72
Затраты на покупку, тыс. руб.	636,00	826,80
Затраты на монтаж, тыс. руб.	190,80	248,04
Затраты на транспортные расходы, тыс. руб.	44,52	57,88
Эксплуатационные затраты, тыс. руб.	545,13	447,18
Эксплуатационные затраты (без учета зарплаты ремонтно-обслуживающего персонала), тыс. руб.	344,49	246,55
Амортизационные отчисления, тыс. руб.	30,50	39,65
Расходы на текущий ремонт и техническое обслуживание трансформаторов, тыс. руб.	25,27	32,85
Стоимость потерь электроэнергии, тыс. руб.	280,02	162,73
Прочие расходы, тыс. руб.	8,71	11,33
Приведенные затраты, тыс. руб.	632,26	560,45
Срок окупаемости с учетом перерывов в электроснабжении, год (лет)	3	6
Простой срок окупаемости, год (лет)	3	5
Дисконтированный срок окупаемости, лет	11	7

Проведя сравнение представленных вариантов, можно дать экономическую оценку каждому способу электроснабжения промышленного предприятия. Анализ основного критерия по выбору наиболее экономически эффективного варианта – приведенные годовые затраты – показал, что, несмотря на большие капитальные вложения и затраты на эксплуатацию электрооборудования, второй вариант развития с аморфным трансформатором АТМГ-630/10/0.4 является предпочтительнее. Однако данный критерий имеет недостаток, который актуален в нынешних экономических условиях России. Дело в том, что значение нормативного коэффициента экономической эффективности капитальных вложений является дифференцированным по отраслям народного хозяйства и он может быть заниженным в периоды финансовых кризисов [3].

Согласно п. 7.10 Положения по формированию программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности дочерних и зависимых обществ ПАО «Россети» (протокол от 29.05.2014 № 156), простой срок окупаемости силовых трансформаторов не должен превышать 10 лет. Для дополнительного сравнения каждого варианта электроснабжения на рис. 2-3 представлены графики зависимости сроков окупаемости от величин капитальных вложений.

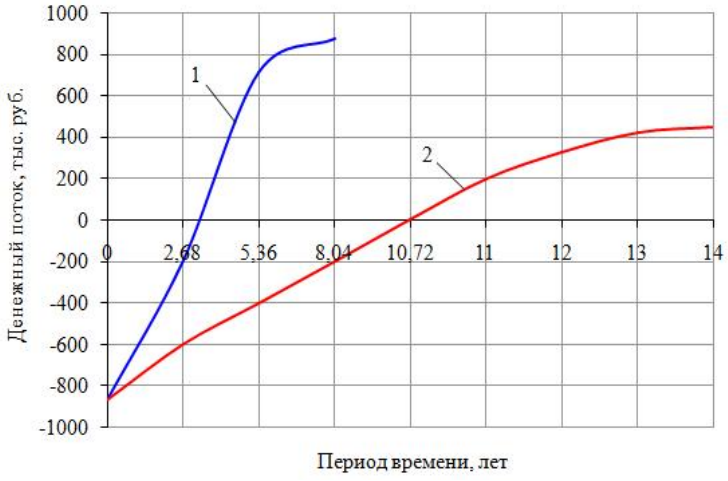


Рис. 2. Графики зависимости сроков окупаемости от денежных потоков для трансформатора ТМГ-630/10/0.4: 1 – обычный срок окупаемости; 2 – дисконтированный срок окупаемости

Следует заметить, что при технико-экономических расчетах обоих вариантов экономия денежных средств происходит только во втором варианте электроснабжения с аморфным трансформатором относительно первого, тогда при вычислении дисконтированного срока окупаемости трансформаторов ТМГ-630/10/0.4 вместо разницы приведенных годовых затраты применяется годовой экономический эффект от перерывов в работе трансформатора. Из-за этого графики на рис. 2 расположены более неравномерно относительно друг друга по сравнению с графиками, изображенными на рис. 3.

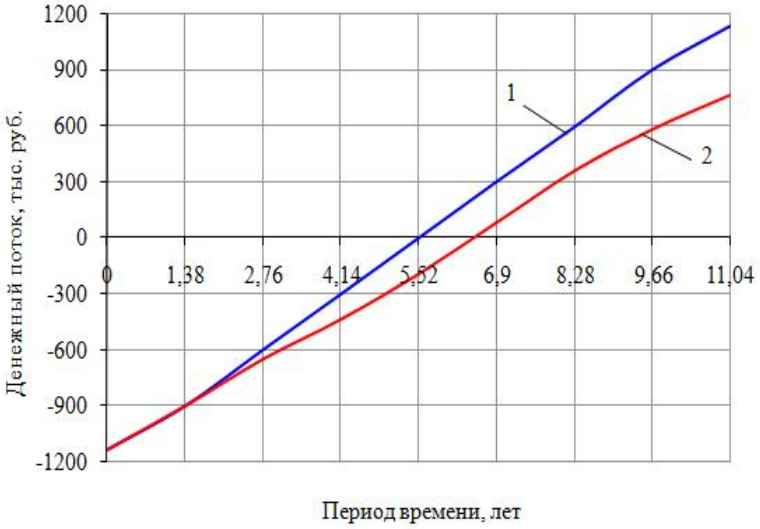


Рис. 3. Графики зависимости сроков окупаемости от денежных потоков для трансформатора АТМГ-630/10/0.4: 1 – обычный срок окупаемости; 2 – дисконтированный срок окупаемости

Анализ таблицы и рис. 2, 3 показывает, что второй вариант развития с трансформатором АТМГ-630/10/0.4 наиболее целесообразен как по дисконтированным показателям окупаемости, так и по основному условию выбора наиболее эффективного варианта – приведенных годовых затрат. Однако вопрос об окончательном выборе второго варианта электроснабжения завода остается открытым. Как показывает практика, обычные силовые трансформаторы имеют значительно меньший срок окупаемости за счет меньших капитальных вложений в них, поэтому их приобретение электроснабжающими организациями и энергетическими предприятиями является пока более предпочтительным, несмотря на бесспорные технические преимущества трансформаторов с аморфным магнитопроводом.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТМГ – трехфазный трансформатор с естественной циркуляцией масла и воздуха при герметичном исполнении;

АТМГ – трехфазный трансформатор с аморфным магнитопроводом, естественной циркуляцией масла и воздуха при герметичном исполнении;

ТДН (Т1, Т2) – трехфазный трансформатор с естественной циркуляцией масла и принудительной циркуляцией воздуха с регулировкой напряжения под нагрузкой (обозначение на схеме рис. 1);

ВЛ 10 кВ – воздушная линия номинальным напряжением 10 кВ;

АС-50/8 – сталеалюминевый провод, площадь поперечного сечения алюминиевой части провода 50 мм^2, площадь стальной части 8 мм^2;

КРУ (К-104М) – комплектное распределительное устройство (серия шкафа КРУ);

TV1, TV2 – трехфазный трехобмоточный трансформатор напряжения;

F1, F2, F3, F4 – предохранитель плавкий;

RU1, RU2, RU3, RU4 – ограничитель перенапряжений;

TA1, TA2, TA3, TA4, TA5 – трансформатор тока измерительный;

LR1, LR2 – реактор токоограничивающий;

QSG1, QSG2, QSG3, QSG4, QSG5 – разъединитель заземляющий;

QF1, QF2, QF3, QF4, QF5 – выключатель автоматический в силовых цепях и цепях управления;

$К_в$ – капитальные вложения, тыс. руб.;

$З_п$ – расходы на приобретение, тыс. руб.;

$З_т$ – расходы на транспортировку, тыс. руб.;

$З_м$ – расходы на монтаж трансформаторов, тыс. руб.;

$Э_з$ – годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб.;

$С_{Дэ}$ – стоимость годовых потерь электроэнергии в трансформаторах, тыс. руб.;

$А_о$ – амортизационные отчисления, тыс. руб.;

$П_р$ – прочие затраты, тыс. руб.;

$Р_{т.о}$ – расходы на ремонт и техническое обслуживание, тыс. руб.;

ПАО «Россети» – Публичное акционерное общество «Российские сети».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чепрасов, С.А., Зенина, Е.Г. Экономия электроэнергии в силовых трансформаторах / С.А. Чепрасов, Е.Г. Зенина // Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий: сб. науч. тр. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2015. – С. 9-13.

2. Климова, Г.Н., Кабышев, А.В. Элементы энергосбережения в электроснабжении промышленных предприятий: учебное пособие / Г.Н. Климова, А.В. Кабышев. – Томск: Томский политехнический университет, 2008. – 189 с.

3. Хорольский, В.Я. Технико-экономические расчеты распределительных электрических сетей / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, Д.В. Петров. – Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2009. – 132 с.

УДК 621.18-987

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ТЭЦ НА ОРЭМ

П.А. Абрамов, Ю.В. Абрамова – студенты
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» г. Волжского, Россия

Неизменной целью энергетической политики России является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и всего потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики и качества жизни населения страны и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций.

Энергетическая стратегия определяет цели и задачи долгосрочного развития энергетического сектора страны на предстоящий период; приоритеты и ориентиры, а также механизмы государственной энергетической политики на отдельных этапах ее реализации, обеспечивающие достижение намеченных целей.

В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2020 года (Стратегия-2020) снижение энерго- и электроемкости экономики и повышение эффективности использования энергоносителей являются важнейшим стратегическим направлением.

На данный момент в России и в мире сложилась крайне неблагоприятная экологическая обстановка, обусловленная тем, что деятельность человека формирует существенное превышение допустимых нагрузок на природные комплексы.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (Стратегия-2030), являясь преемственной по отношению к Стратегии-2020, обеспечивает расширение временного горизонта до 2030 года в соответствии с новыми задачами и приоритетами развития страны.

Положения Стратегии-2030 используются при разработке и корректировке энергетических стратегий и программ субъектов Российской Федерации [1].

Обслуживание высокопроизводительного котла обходится недешево. Любая организация, использующая их, выбирает оптимальный режим работы котла, при котором имеется максимально возможный КПД.

КПД брутто котлов, %, по обратному балансу определяется по формуле

$$\eta_{к}^{бр(обр)} = 100 - q_3 - q_3 - q_4 - q_5^{(н)} - q_{6шш}^{(н)} - q_{6ооx}^{(н)}, \quad (1)$$

где q – потери тепла в %: q_2 – с уходящими газами; q_3 – из-за химического недожога горючих газов (CO, H_2, CH_4); q_4 – с механическим недожогом; $q_5^{(н)}$ – от наружного охлаждения.

Фактические потери тепла от наружного охлаждения котла $q_5^{(н)}$ с физическим теплом шлака $q_{6шш}^{(н)}$ и потери $q_{6ооx}^{(н)}$, связанные с охлаждением конусов горелок, мазутных форсунок, леток, течек дробеочистки, панелей и балок топки, в эксплуатационных условиях не измеряются. Поэтому при определении фактического КПД брутто котла используются номинальные значения упомянутых потерь.

В инструкции к котлу указывается номинальный КПД, составляющий 92-95 %, реальный показатель ниже. Также КПД снижается из-за теплопотерь [2]. Изменение КПД котельных агрегатов представлено на рисунке. Из рисунка видно, что при повышении нагрузки свыше 370 т/ч и включении вторых скоростей тягодутьевых механизмов на каждый котельный агрегат данное переключение воздействует по разному. На котлоагрегатах № 6 и № 10 КПД начинает уменьшаться, а на котлоагрегате № 1 практически остаётся неизменным, но, в свою очередь, КПД котла № 1 является не столь высоким в сравнении с двумя другими

рассматриваемыми котлами. Становится необходимым поиск решения по оптимальному выбору работающего состава котельного оборудования ТЭЦ в рамках ВСВГО.

Задачи, поставленные в исследовании:

– анализ опытов и направлений развития рынков электроэнергии в мировой практике с позиции решения задачи ВСВГО;

– разработка алгоритма выбора состава включенного котельного оборудования на основе нелинейной оптимизации с использованием характеристик относительного прироста расхода топлива (ХОП) и метода «динамических переходов».

Результатом исследования является внедрение системы эффективного выбора работающего состава котельного оборудования ТЭЦ в рамках ВСВГО.

КПД брутто котлов, %, по прямому балансу определяется по формуле

$$\eta_{к}^{бр(пр)} = \frac{Q_{к}^{бр}}{BQ_{ут} + Q_{вн}} \cdot 10^{2}, \qquad (2)$$

где $Q_{к}^{бр}$ – выработка тепла брутто, Гкал; B – количество топлива, т; $Q_{ут}$ – теплота сгорания условного топлива, Гкал/т; $Q_{вн}$ – количество тепла, Гкал [3].

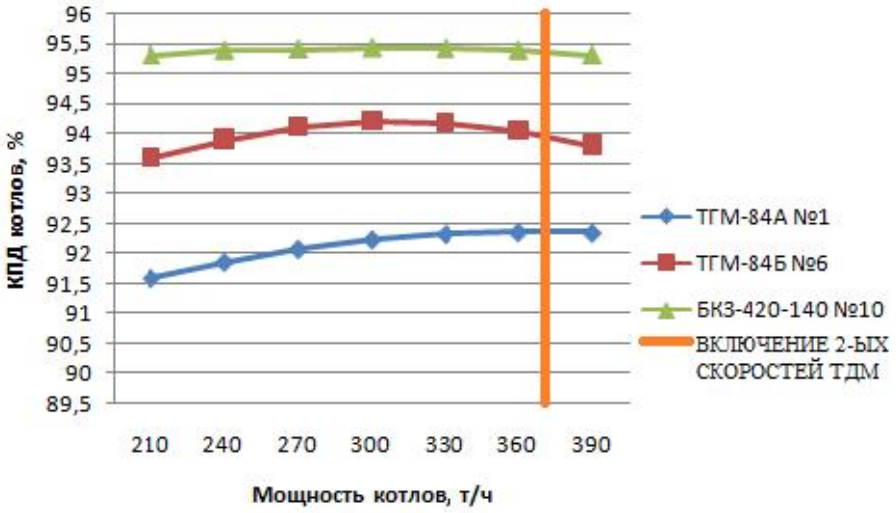


Рисунок. Зависимость коэффициента полезного действия котлов от тепловой мощности

Параметры паровых котлов ТЭЦ представлены в таблице.

Сравнение характеристик котельных агрегатов

Наименование котельных агрегатов	Паропроизводительность котла, т/ч							
	210	240	270	300	330	360	390	420
	КПД котла брутто							
ТГМ-84А № 1	91,25	91,59	91,86	92,08	92,24	92,33	92,36	92,35
ТГМ-84Б № 5	92,99	93,23	93,41	93,56	93,70	93,77	93,85	93,88
ТГМ-84Б № 6	92,25	93,60	93,90	94,10	94,20	94,18	94,05	93,80
ТГМ-84Б № 7	92,97	93,60	93,98	94,17	94,28	94,28	94,08	93,50
ТГМ-84Б № 8	92,88	93,15	93,40	93,52	93,50	93,23	92,80	92,25
ТГМ-84Б № 9	91,60	92,10	92,60	92,75	92,84	92,91	92,63	92,50
БКЗ-420-140 № 10	95,21	95,31	95,39	95,41	95,43	95,42	95,39	95,31
	Расход газа (по прибору), м^3/ч							
ТГМ-84А № 1	16 500	18 000	19 900	21 600	23 500	25 400	27 400	29 300
ТГМ-84Б № 5	15 000	17 000	19 400	21 500	24 000	26 100	28 400	30 500
ТГМ-84Б № 6	16 700	19 000	21 000	23 000	25 400	27 600	30 000	32 500
ТГМ-84Б № 7	17 000	19 200	21 000	23 000	25 400	27 600	30 000	32 500
ТГМ-84Б № 8	16 800	19 000	21 200	23 100	25 300	26 900	30 200	32 800
ТГМ-84Б № 9	15 100	17 400	19 000	21 200	23 500	26 400	27 800	29 200
БКЗ-420-140 № 10	15 800	16 000	19 950	22 200	24 000	26 200	28 200	30 250

При анализе таблицы выявлены закономерности параметров: зависимость расхода топлива и КПД котлов от тепловой нагрузки. По полученным в исследовании значениям разрабатывается методика нагрузки паровых котлов, что приведёт к значительной выгоде вследствие экономии топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение. Котельные установки / Ю.А. Рундыгин, Е.Э. Гильде, А.В. Судаков; под ред. Ю.С. Васильева, Г.П. Поршнева. – М.: Машиностроение, 2009.

2. Султанов, М.М. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ по энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук / М.М. Султанов. – М., 2010. – 173 с.

3. Чалбышев, А.В. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом современных условий их функционирования в составе электроэнергетической системы: дис. … канд. техн. наук / А.В. Чалбышев. – Иркутск, 2015. – 158 с.

УДК 620.9

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.А. Бешкарева, Д.Ю. Ретивов – магистранты
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Главным источником загрязнения среды являются предприятия тепловой энергетики. Одним из основных условий обеспечения жизнедеятельности человека в бытовых условиях является стабильное снабжение населения теплом и горячей водой. В системе теплоснабжения используется горячая вода, которую нагревают в котлах отопительных котельных. Питание систем водоснабжения происходит путем использования свежей воды из природных источников. В большинстве случаев природные источники имеют высокое содержание растворенных солей кальция и магния, что приводит к образованию накипи.

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНГИБИТОРОВ НАКИПИОБРАЗОВАНИЯ И КОРРОЗИИ В СИСТЕМЕ ВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ, ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ И ГВС

Большинство природных источников содержат большое количество солей кальция и магния, что приводит к образованию накипи. Накипь отлагается на стенках водогрейного оборудования и остальных тепловых установках. Отложения могут достигать 10 мм, а могут и просто забивать трубы в котлах и водонагревателях. Образовавшиеся отложения на поверхности нагрева труб относятся к низкотемпературным. Слои накипи имеют очень низкую теплопроводность. Отложение накипи на стенках трубопровода приводит к снижению передачи тепла в котельном оборудовании, а также к снижению их мощности и теплопроизводительности. Накипь приводит к перерасходу топлива, тем самым увеличивается количество продуктов сгорания, выбрасываемых в атмосферу.

Для борьбы с накипеобразованием в тепловых системах энергетики страны применяются различные методы обработки воды. В данном докладе авторы рассматривают метод использования ингибиторов накипеобразования и коррозии. В качестве объектов возможного применения ингибиторов рассматриваются теплогенерирующие установки, закрытые и открытые системы теплоснабжения и системы ГВС, параметры которых допускают использование ингибиторов с их физико-химическими характеристиками.

Ингибиторы рекомендуются к применению: а) при отсутствии деаэрации или неудовлетворительной работе деаэраторной установки; б) при отсутствии водоподготовки; в) при отложении накипи и отложений в трубных системах котлов, трубопроводных тепловых сетей свыше 0,2 мм образования шлама в котлах; г) при гидравлическом сопротивлении водогрейного котла выше нормативного, уменьшении расхода воды через котел; д) при скорости коррозии в котлах, трубопроводах тепловых сетей, внутридомовых систем отопления свыше 0,085 мм/год. Опасность внутренней коррозии в тепловых сетях поддается оценке по показателю агрессивной сетевой воды со ссылкой на Методические указания по оценке интенсивности процессов внутренней коррозии в тепловых сетях РД 153-34.1-17.465-00 [1]. В указаниях по оценке указаны ингибиторы накипеобразования и коррозии, допущенные к использованию, а также указаны граничные параметры их использования.

Перед тем как применить ингибиторы, проводится обязательное предварительное обследование тепловых энергоустановок специальной организацией и исследование используемой воды. В инструкции указаны шаги специализированной организации по выбору и применению ингибиторов, проведение исследования используемой воды.

При выборе ингибиторов необходимым условием является: а) ингибиторы должны обеспечивать необходимый технологический эффект: минимальную скорость

накипеобразования и (или) коррозии; б) термическая устойчивость применяемого ингибитора не должна быть ниже максимальной проектной температуры рабочей среды тепловой энергоустановки; в) дозировка в сетевую и подпиточную воду открытых систем теплоснабжения и систем горячего водоснабжения производится при условии, что ингибитор дозируется в концентрации, допускаемой гигиеническим заключением, и при этом обеспечивает водно-химический режим в соответствии с требованиями нормативной документации; г) ингибиторы в рекомендованной концентрации не должны вызывать коррозию металла тепловой энергоустановки, для которой используются ингибиторы, со скоростью более 0,085 мм/год; д) ингибитор должен производиться на промышленной основе по утвержденным в установленном порядке техническим условиям. Контроль водно-химического режима при использовании ингибиторов накипеобразования и коррозии должен обеспечить надежную, безопасную и экономичную эксплуатацию тепловых энергоустановок и ее отдельных элементов.

При использовании ингибиторов накипеобразования и коррозии химические подразделения (цех, лаборатория) должны быть доукомплектованы необходимым минимумом оборудования, приборов и химических реактивов. Эксплуатация установок дозирования ингибиторов без химического контроля не допускается. По принципу действия дозаторы подразделяются на две основные группы: инжекционные, в которых для подачи ингибитора используется насос, работающий от внешнего источника энергии; и эжекционные, в которых используется энергия потока подпиточной воды. Дозаторы различных типов имеют свои преимущества и недостатки.

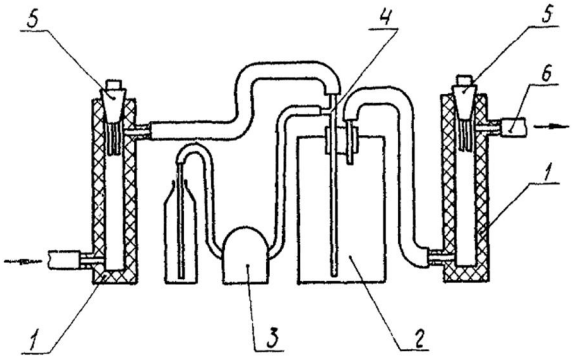


Рисунок. Схема установки испытаний ингибиторов коррозии: 1 – проточная ячейка; 2 – смеситель; 3 – дозирующее устройство; 4 – система подвода реагента; 5 – датчик; 6 – отводной патрубок

В инструкции, которая выдается после исследования использования ингибиторов, изложены требования, которые должны применять теплоэнергетические организации к оборудованию при внедрении водоподготовки ингибиторами. Представлены устройства установок дозирования ингибиторов, а также технологические схемы дозирования реагентов в сетевую воду систем теплоснабжения.

Пример популярных наиболее эффективных ингибиторов коррозии и накипеобразования, допущенных к применению: 1) цинковый комплекс ОЭДФ (ОЭДФ-Zn) ТУ 2439-001-242-10860-97; 2) цинковый комплекс НТФ (НТФ-Zn) ТУ 2439-002-24210860-99.

2. МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ИНГИБИТОРОВ

В системе отопления при нагреве воды в процессе работы получается термический распад имеющихся в составе у нее гидрокарбонат-ионов с образованием карбонат-ионов. Карбонат-ионы, взаимодействуя с присутствующими в избытке ионами кальция, образуют зародыши кристаллов карбоната кальция. На зародыше осаждаются все новые карбонат-ионы и ионы кальция,

вследствие чего образуются кристаллы карбоната кальция, в котором часто присутствует карбонат магния в виде твердого раствора замещения. Оседая на поверхности теплоэнергетического оборудования, он образует непосредственно саму накипь.

Самыми важными компонентами рассматриваемых ингибиторов против накипи являются органофосфонаты – соли органических фосфоновых кислот. При добавлении в воду органофосфонаты, содержащие ионы кальция, магния и других металлов, вместе образуют довольно прочные химические соединения – комплексы. Эти образовавшиеся комплексы органофосфонатов адсорбируются на зародыше кристаллов карбонатов кальция, препятствуя дальнейшей кристаллизации карбонатакальция. Поэтому при введении в воду 1-10 г/м^3 органофосфонатов накипь не образуется даже при нагревании очень жесткой воды.

В настоящее время современные препараты на основе органофосфонатов не только ингибируют солеотложения и коррозию, но также разрушают застарелые отложения накипи и продуктов коррозии. Это объясняется образованием в порах накипи поверхностных адсорбционных слоев органофосфонатов, структура и свойства которых отличаются от структуры кристаллов накипи. При эксплуатации системы отопления возникающие колебания и градиенты температуры приводят к расклиниванию кристаллических сростков накипи. В результате разрушившаяся накипь выходит из системы, превращаясь в тонкую взвесь. Поэтому при введении препаратов, содержащих органофосфонаты, в системы отопления с большим количеством застарелых отложений накипи и продуктов коррозии, необходимо регулярно спускать отстой из фильтров и грязевиков, установленных в нижних точках системы. Необходимо отметить, что при повышении концентрации ингибитора свыше 10-20 г/м^3 накипь разрушается с образованием весьма грубых взвесей, способных забить узкие места системы отопления. Поэтому передозировка ингибитора в этом случае грозит засорением системы. Наиболее эффективная и безопасная очистка систем отопления от застарелых отложений накипи и продуктов коррозии достигается при использовании препаратов, содержащих поверхностно-активные вещества, например композиции «ККФ».

3. ОПЫТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНГИБИТОРОВ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ И КОРРОЗИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В промышленной и жилищно-коммунальной теплоэнергетике активно ведутся исследования по освоению ингибиторов накипеобразования и коррозии. Из опыта работы основным направлением использования комплексонов в промышленной и жилищно-коммунальной теплоэнергетике является не очистка оборудования от уже имеющейся накипи и продуктов коррозии, а предотвращение коррозии и накипеобразования в процессе эксплуатации оборудования. Произведен очень большой объем исследований ингибиторов в области механизма действия накипеобразования.

Исследования дали результаты: а) разработаны теоретические модели ингибирования роста кристаллов, в области значений относительного пересыщения раствора от долей единицы до сотен. Модели учитывают статистическое распределение частиц ингибитора на террасах кристалла методами интегральной геометрии с использованием теории континуального протекания в случайном потенциальном рельефе. Модели приводят к нелинейным зависимостям скорости роста кристалла от степени покрытия поверхности и концентрации ингибитора и позволяют определить критические степень покрытия поверхности и концентрацию ингибитора, при которой кристаллизация полностью прекращается. Результаты компьютерного моделирования с использованием предложенной модели согласуются с экспериментальными данными; б) дана оценка относительного пересыщения раствора, при котором предотвратить образование твёрдой фазы путём введения ингибиторов невозможно; в) получены экспериментальные данные по образованию твёрдых фаз в системе вода – карбонат кальция – ингибитор.

Экспериментально подтверждён немонотонный характер зависимости относительного сечения твёрдой фазы от концентрации ингибитора в системе; г) разработана математическая модель конкурентного фазообразования в системе вода – соль щёлочноземельного металла – ингибитор, согласующаяся с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее правильная подготовка воды для теплоэнергетической системы даст уменьшение затрат на топливо, что приведет к экономии денежных средств и незасорению окружающей среды продуктами сгорания, вбрасываемыми в атмосферу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по оценке интенсивности процессов внутренней коррозии в тепловых сетях. РД 153-34.1-17.465-00, Москва, 2001.

2. Методические указания по коррекционной обработке питательной воды паровых котлов, подпиточной воды систем теплоснабжения водогрейных котлов комплексонатами ОЭДФ-Zn, НТФ-Zn. МУ 1-321-03, Ростов-на-Дону, 2003.

3. Методические указания по стабилизационной обработке подпиточной воды систем теплоснабжения водогрейных котлов комплексонатами ОЭДФ-Zn, НТФ-Zn. МУ 1-322-03, Ростов-на-Дону, 2003.

4. Лапотышкина, Н.П., Сазонов, Р.П. Водоподготовка и воднохимический режим тепловых сетей / Н.П. Лапотышкина, Р.П. Сазонов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 249 с.

5. Тебенихин, Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках / Е.Ф. Тебенихин. – М.: Энергия, 1977. – 312 с.

УДК 66

ПРИМЕНЕНИЕ БЕССИТОВОГО МЕТОДА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

Н.В. Байдакова – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

Актуальной проблемой в современном производстве является использование вторичного сырья, отходов производства и отработанной продукции.

В настоящее время из-за зарубежных санкций по новейшим технологиям и оборудованию и в связи с импортозамещением абразивная отрасль начинает «испытывать голод» на абразивные материалы, что в настоящее время сводится к повышению цен на них и, следовательно, к повышению себестоимости абразивов, при этом в значительной степени возрастает острая необходимость и большая значимость научных исследований и опытно-конструкторских работ в целях реализации проекта по созданию новых абразивных материалов из вторичного сырья.

Следует отметить, что отсутствие научных основ и технико-технологических принципов создания новых абразивных материалов из вторичного сырья, получаемого на предприятиях области, осуществляющих термическую обработку угля, кокса и других материалов в процессе создания основного продукта, не позволяет создавать их с новыми функциональными свойствами и целенаправленно регулировать и стабилизировать их структурными характеристиками. Прикладные научные исследования позволят повысить качество и эффективность новых шлифовальных материалов за счет использования вторичного сырья и улучшить экологическую обстановку в области.

Автором предлагается применение промышленного виброклассификатора типа ВДК для классификации шлаковых отходов как по размеру, так и по форме частиц. Предлагаемый новый технологический процесс разделения сыпучих материалов по размеру зерен на основе бесситовых классификаторов существенно отличается от традиционной классификации на ситовых грохотах схемой цепи аппаратов и функциями каждой единицы технологического оборудования.

Если традиционная схема представляет каскад сит, где на каждом последующем сите материал делится на два продукта «плюсовой» (+) и «минусовой» (–), то бесситовой процесс является двухстадийным. На первом классификаторе производится предварительная классификация на 3÷5 номеров зернистости с последующей доводкой их на аппаратах для «окончательной» классификации (рисунок).

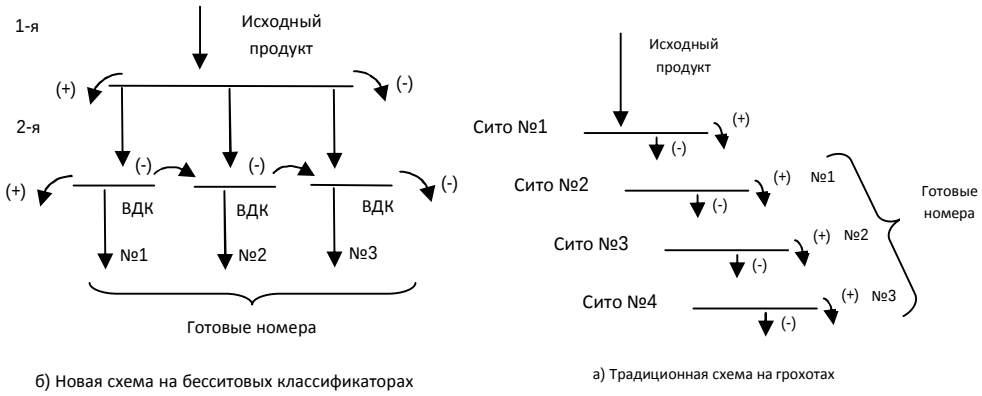


Рисунок. Схемы цепи аппаратов рассева по номерам зернистости:
а) ситовой способ; б) бесситовой способ

В процессе виброклассификации сыпучих материалов бесситовым методом одновременно существует два процесса – деление зерен по размеру и по форме, при этом, как правило, удаляются из смеси зерна игольчатой и тонкопластинчатой формы из мелких и смежной фракций. Нужно также отметить, что вся пылевидная компонента исходого материала концентрируется во фракции, выход которой не превышает 1-2 %. Остальные фракции практически полностью обеспылены. Это существенно уменьшает запыленность воздуха при использовании таких материалов в дальнейших технологических операциях.

Целенаправленное применение абразивного зерна, классифицированного по форме, позволяет повысить ряд показателей шлифования и ведет к повышению экономического эффекта.

Автор полагает, что такой подход окажется достаточно продуктивным и позволит с наименьшими затратами времени разрабатывать технологические процессы бесситовой вибросепарации сухих смесей из вторичного сырья, получаемого на предприятиях области, осуществляющих термическую обработку угля, кокса и других материалов в процессе создания основного продукта с необходимой производительностью и качеством готовых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишняков, В.А., Назаренко, В.А. Исследование процесса вибросепарации на вибрирующих поверхностях с переменным углом вибрации / В.А. Вишняков, В.А. Назаренко // Вибрационная техника в машиностроении и приборостроении. – Львов, 1973. – С. 131-132.

2. Плис, Д.А. Способ разделения материалов и машина для его осуществления.

3. Байдакова, Н.В., Шумячер, В.М. Повышение эффективности абразивной обработки за счет применения инструмента с классифицированным по форме зерном / Н.В. Байдакова, В.М. Шумячер // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сб. статей. – Волжский: ВИСТех, 2004.

4. Блехман, И.И., Джанелидзе, Г.Ю. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964.

УДК 62-68

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

А.А. Пруцков – магистрант
М.В. Одоевцева – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе рассматриваются различные способы применения вторичного тепла промышленного предприятия г. Волжского. На основании численных экспериментов выявлено, что комплексное внедрение методов рекуперации тела позволит снизить потребление теплоэнергоресурсов на 753-2156 кВт в месяц.

Вторичное тепло – это ресурс, получаемый в ходе любого технологического процесса в результате недоиспользования первичной энергии или в виде побочного продукта основного производства. Вторичные энергетические ресурсы в большинстве случаев либо не используются предприятием, либо используются в очень маленьком объеме, следовательно, большая часть тепла сбрасывается в атмосферу. Таким образом, предприятия несут экономические потери, увеличиваются затраты на приобретение энергетических ресурсов, снижаются экономические показатели работы предприятия. Поэтому полезное использование вторичных энергетических ресурсов и, следовательно, снижение энергозатрат предприятий – одно из важнейших направлений развития энергетики.

На территории Волгоградской области функционирует ряд промышленных предприятий, выпускающих резинотехнические изделия для нефтяной, горной, горнодобывающей промышленности и сельхозтехники.

Анализ одного из действующих производств позволил выявить следующие источники вторичных энергоресурсов этих предприятий:

– тепло периодической и непрерывной продувки 3-10 % от производительности котельного оборудования;

– тепло уходящих газов, образующихся от сжигания топлива в летний и зимний период 16-21 %;

– тепло конденсата с основного производства с учетом потерь.

В связи с этим представляет интерес произвести комплексную оценку эффективности применения выявленных ВЭР.

Целесообразность использования тепла продувочной воды

На действующем производстве накапливающиеся в котловой воде минеральные примеси выводят из котла по трубопроводу продувочной воды в сепаратор непрерывной продувки, образующийся пар направляют в деаэратор, неиспарившуюся часть воды и воду периодической продувки подают в теплообменники-охладители и затем сливают в канализацию.

По предлагаемой схеме установка теплообменника на неиспарившуюся часть воды продувки позволит в зимний период осуществить подогрев воды перед стадией её умягчения на 15 °С, что позволит повысить эффективность процесса умягчения воды и исключит дополнительные расходы питьевой воды на охлаждение периодической и непрерывной продувки котла [1].

Предлагаемое решение позволит повысить экономичность теплоэнергетической установки за счет снижения тепловых потерь с водой продувки котла. Результаты проведенных расчетов предоставлены в табл. 1.

Таблица 1

Утилизируемое тепло продувочной воды

Месяц	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Август	Сент.	Окт.	Ноябрь	Дек.
Расход греющей среды, $G_{гр}\cdot10^{-3}$, кг/с	75	69	60	47	50	48	37	32	36	50	70	95
Расход нагреваемой среды, $G_{наг}\cdot10^{-3}$, кг/с	43	60	67	170	244	185	52	64	66	157	59	30
Утилизируемое тепло продувочной воды, Q, кВт	36,2	33,3	28,9	22,7	24,2	23,2	17,8	15,5	17,4	24,1	33,8	45,9

На рис. 1 представлено количество возвращающегося тепла по месяцам.

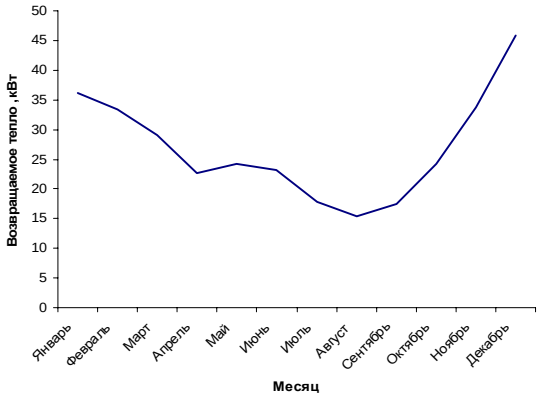


Рис. 1. Количество утилизируемого тепла по месяцам

На многих предприятиях дымовые газы не используются и сбрасываются в атмосферу, нанося вред окружающей среде. Также дымовые газы при низких скоростях конденсируются, что приводит к образованию влаги. В зимний период это приводит к промерзанию стенок оборудования.

Для использования теплоты уходящих газов используются теплоутилизаторы. Целесообразность использования тепла уходящих газов, образующихся от сжигания топлива в летний и зимний период, – 16-21 % [2].

Результаты численных экспериментов предоставлены в табл. 2.

Таблица 2

Энергетический ресурс для утилизации тепла дымовых газов расходом 1 м^3/с за счет конденсации водяных паров

	Тепловая мощность при работе 1 котла			Тепловая мощность при работе 2 котлов			Тепловая мощность при работе 3 котлов		
Коэффициент избытка воздуха	1	1,2	1,4	1	1,2	1,4	1	1,2	1,4
Начальное влагосодержание, d_1, г/кг с.г	150	129	108	150	129	108	150	129	108
Начальная температура точки росы, t_{1s}, °С	59,5	56,4	53,7	59,5	56,4	53,7	59,5	56,4	53,7
Энтальпия насыщенных водяных паров при температуре, h_1, кДж/кг	2608	2603	2569	2608	2603	2598	2608	2603	2598
Массовый расход сухих дымовых газов, $G_s\cdot10^{-3}$, кг/с	1012	1041	1091	2024	2082	2182	3036	3123	3273
Массовый расход водяных паров, $G_w\cdot10^{-3}$, кг/с	150	120	108	300	240	216	450	360	324
Расход конденсата, $G_k\cdot10^{-3}$, кг/с	144	130	110	288	260	220	432	390	330
Максимальная теоретическая мощность конденсатора, Q_k, кВт	444	363,5	331	888,2	727	662	1332	1090	993
% от тепловой мощности котла (паспортные данные)	21,7	17,8	16,2	21,7	18,7	16,2	21,7	17,7	16,2
Экономия топлива, E, м^3/ч	12,7	10,4	9,5	25,4	20,8	18,9	36	30	27,2

На рис. 2 представлено количество тепла по месяцам.

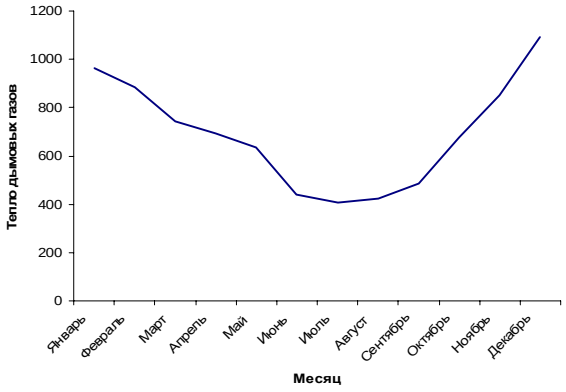


Рис. 2. Количество утилизируемого тепла уходящих газов по месяцам

Возвратный конденсат на большинстве предприятий резиновой группы не используется в связи с его загрязнением в процессе вулканизации резинотехнических изделий. Целесообразность использования тепла конденсата с основного производства: решается задача по подбору оборудования, позволяющего использовать получившиеся в результате (ВЭР) на собственные нужды предприятия завода по производству резинотехнических изделий. Результаты численного эксперимента показали, что для утилизации тепла конденсата необходимо установить теплообменник типа «труба в трубе» [1].

Результаты проведенных расчетов предоставлены в табл. 3.

Таблица 3

Величина тепла конденсата

Месяц	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноябрь	Дек.
Производительность котла, *G*, Гкал/ч	885	745	715	603	603	574	451	404	458	609	900	1208
Расход греющей среды, $G_1 \cdot 10^{-3}$, кг/с	370	340	290	260	250	245	186	167	196	252	380	500
Тепловой баланс, *Q*, кВт	830	763	651	583	561	550	418	375	440	565	853	1122

На рис. 3 представлено изменение количества утилизируемого тепла конденсата по месяцам.

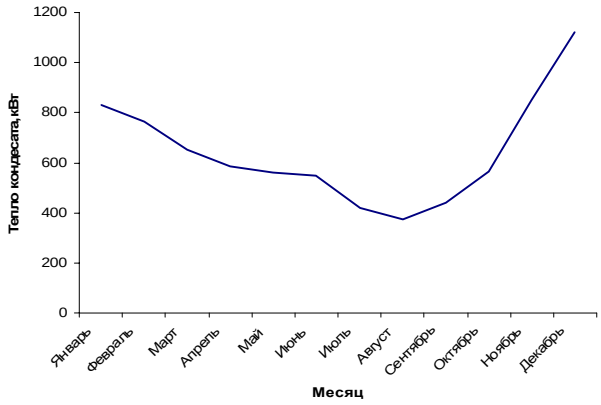


Рис. 3. Количество утилизируемого тепла конденсата по месяцам

ВЫВОД

Комплексное внедрение дополнительного теплообменного оборудования в схему производства позволит использовать утилизируемое тепло в количестве 753-2156 кВт в месяц на собственные нужды предприятия, сократив потребление теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / О.Л. Данилов. – М.: Московский энергетический институт (Технический университет), 2010. – 188 с.

2. Беспалов, В.В. Повышение эффективности глубокой утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе / В.В. Беспалов. – ТомПУ, 2017. – 119 с.

УДК 620.4

RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SIGNALS FOR CALCULATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS AND INCREASE IN POWER EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT OF THERMAL POWER PLANT

Yu.A. Gorban – postgraduate,
Volzhsky branch of the MPEI

This paper is devoted to questions of effective management of the power equipment of a thermal power plant in the conditions of quickly changing operating modes of power systems. The results of a research of dynamic characteristics of the signals used for calculation of technical and economic indicators of the generating sources are given. The analysis is carried out and an assessment of a possibility of increase in efficiency of updating of the current values of technical and economic indicators on the example of package boilers of block and not block thermal power plants is given. The practical recommendations of use of a new approach of measurement of dynamic characteristics of signals for calculation of efficiency of the boiler and change of parameters of operation of the power equipment are formulated.

Analysis of the averaging period of initial parameters for calculation of technical and economic indicators

Calculation of TEI with use of instant values of the parameters of technological process entering them is incorrect. Between the warmth introduced in a copper fire chamber with the burned fuel, and thermal power of primary and secondary steam there is a time shift because of thermal inertia of the boiler. Averaging of controlled parameters which enter settlement formulas of assessment of TEI is made for compensation of the specified shift. According to [7] calculation of TEI it is made on the values of quick and adjustable parameters average in 15 minutes.

In the analysis of a mismatch the value of the period of averaging two minutes has been determined by time of the current values of technological parameters of the power unit of Konakovo state district power plant for power units with direct-flow coppers optimum [6]. The research of values of parameters of work of a not block thermal power plant with drum coppers conducted on the example of the Volzhskiy TPP shows (see fig. 1) existence of a mismatch on time bigger, than for direct-flow package boilers.

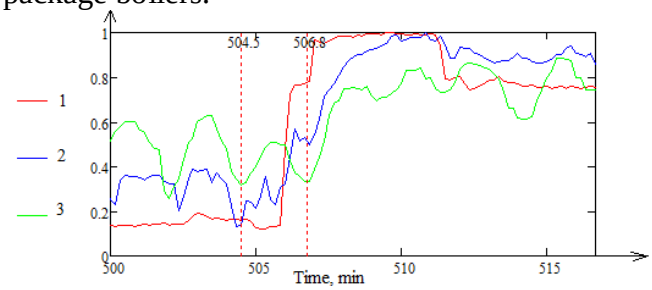


Fig. 1. Account characteristics of the boiler, Art. No. 7 of the Volzhskiy TPP: 1 – gas consumption; 2 – the consumption of superheated steam; 3 – a feed water expense

Apparently from fig. 1, account characteristics of fuel and steam at change of loading of the boiler have a mismatch (see the period 504,5 – 507,8 minutes). The analysis of signals shows that time of a mismatch of input and output parameters of a copper is 2,3 minutes.

The research of the calculation error ot TEI at change

In fig. 2 the comparison of the results of calculation ηбр is shown at averaging intervals of 2 minutes and 15 minutes.

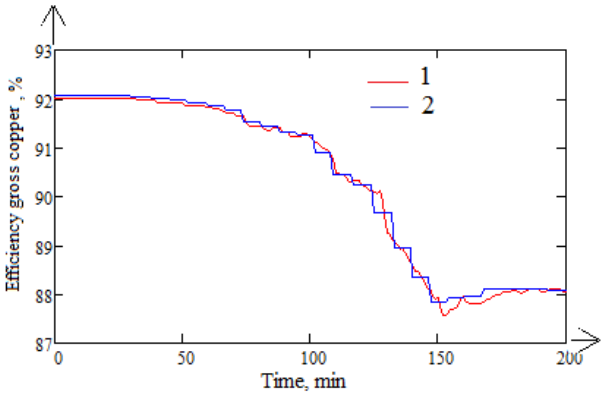


Fig. 2. Efficiency gross copper: 1 – an averaging period 2 minutes; 2 – a period of averaging of 15 minutes

It is possible to estimate change of accuracy of calculation of TEI at variation of an interval of averaging a relative dynamic error δд. The mathematical model of calculation of a relative dynamic error is presented in [6]. The results of calculation of a relative dynamic error ηбр on various periods of averaging are presented in fig. 3.

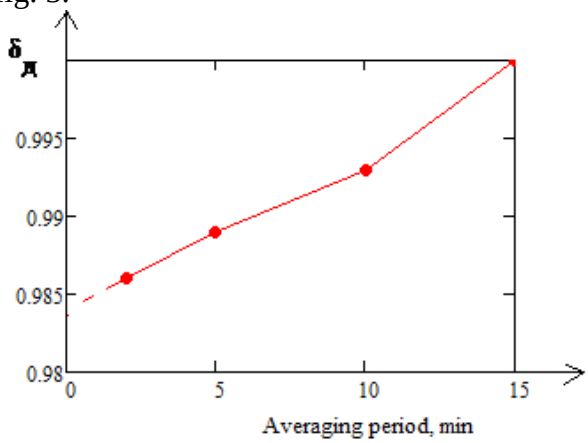


Fig. 3. Dependence of a Relative Dynamic Error on the Averaging Period

Reduction of an interval of averaging will allow to increase the accuracy and efficiency of calculation of TEI for more optimum entering of the correcting influences into an operating mode of the equipment of power units. It will allow to improve, both ecological, and economic indicators of a power plant.

The research of dynamic characteristics of initial signals for calculation of TEI

Measuring information on the basis of which calculation of TEI is carried out represents the values of technological parameters transferred on measuring channels. Owing to influence of production factors and also hindrances, measuring information is stochastic therefore for the analysis and creation of metrological characteristics of system for measurement of TEI it is expedient to use statistical methods. The exponential model of correlation functions of signals and hindrances of a look has been applied to the description of properties of measuring information:

$$K_X(t) = Dx \exp(-\alpha t),$$

where Dx – dispersion of a signal; α – the speed of change of correlation function of a signal.

A type of autocorrelated functions of signals of key parameters of the drum package boiler on the example of a drum copper of the station No. 7 of the Volzhskiy TPP are presented in fig. 4. Characteristics of signals are specified in table.

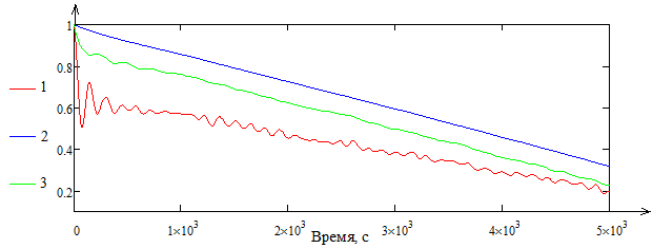


Fig. 4. Autocorrelated functions of initial signals of the package boiler:
1 – Autocorrelated function of a signal of an expense of feedwater; 2 – Autocorrelated function of a signal of a consumption of gas; 3 – Autocorrelated function of a signal of superheated steam

Characteristics of correlation functions of signals of key parameters of the package boiler

	Feedwater expense	Gas consumption	Superheated steam consumption
Dx, $(т/ч)^2$	125,8	0,5	92,4
α, т/ч·с	0,2	10,0	1,0

The correlation functions describe dynamic characteristics of the corresponding signals and can be used for formation of realization of the signals imitating initial for the purpose of assessment of accuracy of calculation of TEI in various modes.

Conclusions

1. Providing a rational fuel consumption and technical and ecological safety of the operating thermal power plants is important. It can be reached, including increase in accuracy and efficiency of calculation of technical and economic indicators of a thermal power plant. The conducted researches show a possibility of a reduction period of calculation of TEI from current 15 minutes to 3 minutes.

2. The models of the description of properties of measuring information - values of the technological parameters used for calculation of TEI – in the form of correlation functions of an exponential look which can be used for imitation of signals in various rates are received.

УДК 621.315.175

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРОВОДОВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

И.Л. Васильева – доцент
А.А. Морозова – ст. преподаватель
А.С. Смольянинова – студент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены аспекты образования гололеда и способы плавки гололеда без отключения потребителей. Представлен комплекс вопросов по моделированию тепловых процессов в линиях электропередачи в процессе плавки гололеда. Рассмотрены особенности решения задачи, учитывающей изменение агрегатного состояния, предложен упрощенный алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов теплообмена всегда играло важную роль в развитии техники и естествознания. Теоретическое исследование процессов теплообмена в настоящее время в значительной степени базируется на их численном моделировании. Это связано с тем, что для современной науки и техники необходим достоверный прогноз процессов, экспериментальное изучение которых в лабораторных или натурных условиях очень сложно и дорого, а в некоторых случаях просто невозможно.

Зимой ледообразование на линиях электропередачи представляет серьезную опасность для надежной работы энергосистем. Ввиду нагрузки от льда проводники, стальные опоры и арматура подвергаются определенным механическим повреждениям. Возникновение гололеда на проводах линий электропередачи сопровождается серьезными проблемами. Для их решения существуют стандартные процедуры, связанные с пропусканием больших токов для расплавления ледяной оболочки. Несмотря на то что способы борьбы известны давно, эффективность решения часто бывает низкой в силу множества причин, в числе которых и слабая оснащенность средствами диагностики и автоматизации процессов плавки.

Для нагрева проводов может использоваться как переменный, так и постоянный ток. Применение переменного тока не требует значительных затрат, поскольку плавка производится непосредственно от существующей сети, но возможно только при относительно небольших длинах обогреваемых линий, требуемых токах плавки и напряжениях. Для мощных линий значительной длины с проводами больших сечений преимущество имеет плавка постоянным током.

Наиболее распространенные в настоящий момент схемы плавки гололеда требуют отключения линии перед проведением плавки. При этом прекращается питание потребителей, что может быть недопустимо для потребителей I категории или по режиму работы сети.

Для обеспечения непрерывности электроснабжения в гололедоопасный период возможно применять режимы плавки гололеда без отключения потребителей: профилактическим током нагрузки, методом наложения переменного тока на ток нагрузки, методом перераспределения нагрузки.

1. АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЕДА И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НИМИ

1.1. Процесс образования гололеда

Образование гололеда наблюдается при неустойчивой погоде, когда оттепель сменяется похолоданием, при температуре ниже нуля, в туманную погоду или при выпадении переохлажденного дождя.

Различают три основных вида гололедных образований: гололед, изморозь, смесь из осадков гололеда и изморози. Образование гололеда считается самым тяжелым режимом.

Гололед представляет собой плотную твердую прозрачную или полупрозрачную массу с объемным весом 600-900 кг/м^3. Осадки гололеда плотно пристают к металлическим проводам. Образование гололеда происходит при температуре от 0 до –5 °С. Отложения гололеда, изморози и смеси происходят в большинстве случаев при ветре с наибольшими скоростями до 10-20 м/с.

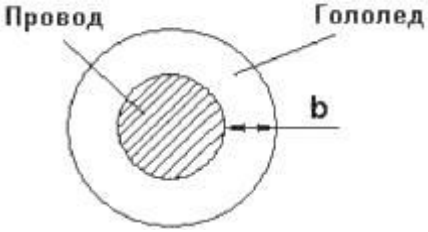


Рис. 1. Идеализированное представление гололеда на проводах

1.2. Методы борьбы с гололедными явлениями

Сложность процессов гололедообразования является причиной отсутствия надежных методов и средств его краткосрочного прогноза.

Развитие цифровых средств связи, измерения и обработки информации дало толчок решению существующих проблем плавки. В [1], [2] приведены примеры реализации комплекса контроля гололедной нагрузки с помощью распределенных информационных систем. Непрерывный контроль температуры, влажности, скорости и направления ветра, веса проводов позволяет рассчитывать скорость нарастания гололеда и определять параметры процесса плавки.

Среди методов решения возникающих проблем можно отметить такие, как использование проводов с углеволоконной центральной жилой для предотвращения провисания при перегреве во время плавки. Применяется также электромеханическое воздействие на лед путем пропускания больших импульсных токов, приводящих к ударным воздействиям и далее к механическому разрушению ледяной оболочки.

1.3. Способ нагружения линии рективными токами

Процессу плавки предшествует отключение линии от основного источника и от нагрузки и подключение на пониженное напряжение с одной стороны и короткое замыкание с другой. Выглядит более привлекательным способ нагружения линии реактивными токами для формирования нужного по величине уровня мощности тепловых потерь. Ток в линии содержит две составляющие: ток нагрузки и ток, определяемый индуктивностью. Одновременное регулирование коэффициента мощности в начале линии с помощью батареи конденсаторов решает проблему загрузки энергосистемы реактивными токами. Для обеспечения возможности поддерживать требуемое значение тока в линии индуктивность и емкость имеют несколько ступеней регулирования.

Плюсами такого решения является ненужность отключения нагрузки и возможность поддержания режима, предупреждающего образование гололеда. Но увеличение тока вызывает увеличение пропускаемой мощности, что может привести к перегрузке трансформатора, к большим потерям напряжения в линии, что делает эксплуатацию сети невозможной. В данном случае необходимо оценить тепловые процессы при плавке гололеда и отклонения напряжений при их загрузке реактивными токами для определения допустимых режимов в линии при разных нагрузках и напряжениях в сети.

2. РЕЖИМ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Простым способом плавки при обеспечении непрерывности электроснабжения является пропускание по линии электропередачи тока нагрузки, обеспечивающего достаточный нагрев проводов для предотвращения гололедообразования – тока профилактического подогрева.

Плавка гололеда перераспределением нагрузок заключается в том, что токовая нагрузка обогреваемой линии повышается путем перераспределения нагрузки в сети до требуемого значения.

Для плавки гололеда без отключения потребителей могут быть использованы схемы наложения переменного тока: на рабочий ток линии накладывается дополнительный ток от другого источника, чтобы совместное протекание рабочего и дополнительного

токов оказалось достаточным для плавки гололеда.

Но из-за дополнительных токов в одной из фаз появляется несимметрия напряжений, чем больше дополнительный ток по отношению к току нагрузки фазы. Из-за несимметрии и части дополнительного тока, ответвляющегося в неосновные контуры, происходит изменение токов нагрузки в фазах: в необогреваемых фазах он увеличивается, а в обогреваемой – уменьшается.

При параллельных линиях и в кольцевых сетях для наложения тока возможно использовать вольтодобавочные трансформаторы с соответствующим уровнем изоляции, включая их в рассечку кольцевой сети. Они позволяют регулировать значения продольной и поперечной ЭДС и тем самым обеспечить оптимальный режим плавки.

Одним из наиболее интересных методов плавки без отключения потребителей является метод наложения постоянного тока на рабочий ток [3]. Так же, как и для метода наложения переменного тока, такой метод может быть реализован в сетях с параллельными и кольцевыми линиями.

Данная схема плавки гололеда на ВЛ имеет преимущества по сравнению с другими схемами плавки гололеда: плавка гололеда осуществляется одновременно на всех параллельных и кольцующих ВЛ; плавка производится под нагрузкой без отключения потребителей; значительно повышается оперативность; значительно расширяются возможности плавок на длинных; проведение плавок возможно в любое время, независимо от режима потребителя; плавки проводятся без использования «земли»; устройство способом наложения постоянного тока на переменный рабочий ток нагрузки позволяет повысить надежность работы ВЛ при любых климатических аномалиях.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ ГОЛОЛЕДА

Несмотря на то что способы борьбы известны давно, эффективность решения часто бывает низкой в силу множества причин, в числе которых и слабая оснащенность средствами диагностики и автоматизации процессов плавки.

Степень нагрева проводов током в весьма значительной степени зависит от метеорологических условий – от температуры воздуха и от ветра. При низких температурах и особенно при сильных ветрах охлаждение проводов происходит значительно интенсивнее, вследствие чего для нагрева проводов до температуры, при которой плавится гололед, требуются большие силы тока, пропускаемого по проводам.

Для определения параметров системы нагрева и режимов работы необходим анализ процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда».

С учетом допущений о симметричном расположении ледяной оболочки, о постоянной скорости движения воздуха теплообмен может быть описан дифференциальным уравнением в частных производных с граничными и начальными условиями.

Нестационарный перенос тепла теплопроводностью описывается следующим уравнением:

$$\rho\, C_P \frac{\partial t}{\partial \tau} + \lambda\, \Delta t - q_v = 0\,, \qquad (1)$$

где λ – теплопроводность материала, Вт/м·К; q_v – количество теплоты, отдаваемое внутренним источником тепла на поверхность исследуемого материала (плотность теплового потока), Вт/м^3; ρ – плотность материала, кг/м^3; C_P – теплоёмкость материала при постоянном давлении, Дж/ кг·К; $d\tau$ – интервал времени, с; Δt – оператор Лапласа.

Это уравнение устанавливает связь между временными и пространственным изменением температуры в любой точке тела.

Формулу (1) можно применять не для осесимметричной задачи с учетом того, что в ходе расплавления ледяной оболочки происходит ее смещение относительно провода под действием силы тяжести. Правильнее говорить не о расплавлении оболочки, а о проплавлении канала. Вода, образующаяся при плавлении льда, частично просачивается через трещины и стекает на землю, а частично перемещается вверх относительно провода. Учитывая большую, чем у льда, плотность, вода не полностью окружает провод, что наряду со смещением приводит к несимметрии геометрии. В конце процесса

провод просто проходит насквозь, и оболочка падает на землю.

Решение данного уравнения в частных производных в декартовой системе координат представляется в виде

$$\rho C_P \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v. \quad (2)$$

Сформулированное уравнение (2) с соответствующими краевыми условиями (начальными и граничными) будем решать численно.

При решении дифференциального уравнения в частных производных наиболее часто используется метод конечных разностей (МКР). Вместо производных в дифференциальном уравнении используются их конечноразностные аппроксимации. При использовании МКР для задач теплопроводности твердое тело представляют в виде совокупности узлов. Аппроксимируя (заменяя) частные производные дифференциального уравнения (2) конечными разностями, получают систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры, как локальной характеристики в каждом узле сетки. Полученная система является незамкнутой, для ее замыкания используют разностное представление граничных условий. В результате получают замкнутую систему линейных алгебраических уравнений, которую решают численными методами с помощью ЭВМ.

Переходим к плоской двумерной задаче, приняв изменение по координате z за единичное. Геометрия расчетной области представлена на рис. 2.

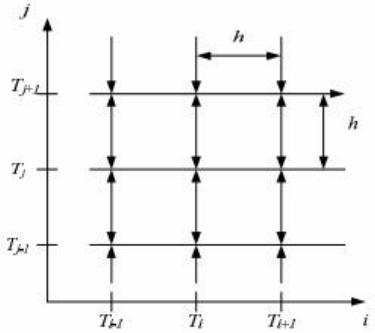


Рис. 2. Разностная сетка области решения

Заменим дифференциальные операторы в уравнении на их конечно-разностные аналоги:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{T_{i,j} - T_{i,j}^0}{\Delta \tau}; \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{h^2}, \quad (4)$$

где $h = \frac{a}{n-1}$ – разбиение сетки, м; n – размер сетки; a – линейный размер, м; $T_{i,j}$ – температура в текущий момент времени, $T_{i,j}^0$ – температура в предыдущий момент; $T_{i+1,j}$, $T_{i-1,j}$, $T_{i,j-1}$, $T_{i,j+1}$ – температуры в узлах, расположенных в окрестности точки $T_{i,j}$, К.

Подставляя уравнения (3) и (4) в уравнение (2) и решая его относительно $T_{i,j}$, получим

$$T_{i,j} = \frac{\lambda\left(\frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1} + T_{i+1,j} + T_{i-1,j}}{h^2}\right) + \frac{\rho C_P T_{i,j}^0}{\Delta \tau} + q_v}{\left(\frac{4\lambda}{h^2} + \frac{\rho C_P}{\Delta \tau}\right)}. \quad (5)$$

Для решения данной задачи был смоделирован процесс нагрева алюминиевого провода сечением 70 мм^2 линии 110 кВ. Мощность внутренних источников локализована в проводнике.

Исходя из принятой математической модели, для решения данной задачи в качестве краевых условий принимаем условия первого рода. Задача решалась для случаев, когда температура окружающей среды составляла –3 и 0 °С.

Несмотря на сравнительно небольшой диапазон температур, предусмотрены зависимости всех коэффициентов от температуры. Это объясняется тем что, кроме процесса расплавления гололеда, возможен нагрев участков голого провода, который приведет к перегреву.

Результаты численного моделирования процесса нагрева провода при токе 150 А представлены на рис. 3 и 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По полученным результатам можно сделать вывод о рекомендуемой величине наибольших допустимых токов плавки, требуемой мощности, времени плавки гололеда, представить наглядно распределение температур в сечении проводника. Качество результата плавки зависит от значения тока, размеров и плотности гололедно-изморозевых образований, их формы, скорости ветра и температуры воздуха.

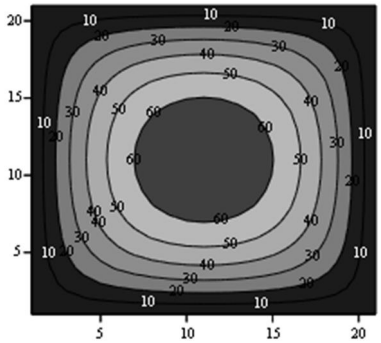


Рис. 3. Графическая интерпретация результатов моделирования при температуре 0 °С. Максимальное значение температуры в области 69,8 °С

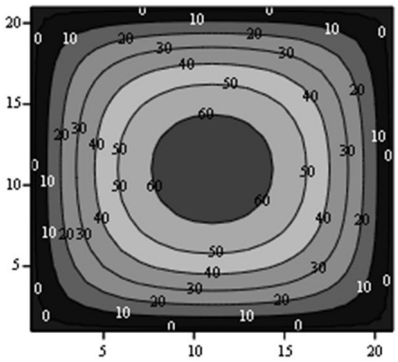


Рис. 4. Графическая интерпретация результатов моделирования при температуре -3 °С. Максимальное значение температуры в области 66,8 °С

В расчетной области имеется более сложная температурная зависимость для ледяной оболочки, обусловленная изменением агрегатного состояния. Процесс разогрева ледяной оболочки сопровождается превращением тонкого слоя льда на границе провода и оболочки в жидкую фазу. Происходит стекание жидкости в нижнюю зону, где может произойти обратное затвердевание, просачивание через стенку или сохранение в жидкой фазе. Объемные деформации ухудшают тепловой контакт нижней зоны жидкости с проводом. Уменьшается отток тепла в нижнюю зону и увеличивается интенсивность прогрева верхней зоны. Эти проблемы могут быть решены более подробным рассмотрением режимов провода.

1. *Разогрев голого провода.* Режим может быть задан для предупреждения образования гололеда или в результате частичного расплавления. Расчетная система соответствует нелинейной задаче с постоянной геометрией и неизменным агрегатным состоянием.

2. *Разогрев провода с ледяной оболочкой до полного перехода льда в жидкую фазу.* Процесс сопровождается изменением агрегатного состояния ледяной оболочки. Изменение геометрии не производится. Особенностью расчета является сложность учета изменения теплосодержания при неизменной температуре.

Стандартная формулировка такой задачи, кроме уравнения (1), содержит уравнение, где переменной является не температура, а теплосодержание. Затраченная на нагрев и фазовый переход мощность источника тепла выражается через тепловой баланс

$$P\,t = mc\Delta T + ml, \qquad (6)$$

где m – масса нагреваемого тела, кг; ΔT – перепад температур, °С; l – теплота плавления льда, Дж/кг.

3. Процесс проплавления ледяной оболочки. Расплавление тонкого слоя льда сопровождается стеканием жидкости в нижние области и перемещением провода к верхней поверхности ледяной оболочки. Строгое описание тепловых процессов, сопровождаемых изменением геометрии, весьма затруднительно. Возникновение гололеда на проводах происходит в условиях значительных изменений погодных условий в течение сравнительно коротких промежутков времени (несколько часов) на ограниченных расстояниях.

Это приводит к тому, что по длине трассы линии электропередачи могут одновременно наблюдаться режимы расплавления гололеда и нагрева голого провода.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЛ – воздушная линия;

ЭДС – электродвижущая сила;

Д – датчик;

Л – линия;
МКР – метод конечных разностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко, Н.Е. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях / Н.Е. Шевченко, Ю.В. Лебедева, Н.П. Хромов, А.Г. Сошинов // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 127-132.

2. Левченко, И.И., Сацук, Е.И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И.И. Левченко, Е.И. Сацук // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 2-8.

3. Гузаиров, М.Б. Совершенствование систем плавок гололеда на высоковольтных ВЛ / М.Б. Гузаиров, В.А. Максимов, А.Р. Валеев // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 30-34.

4. Елизарьев, А.Ю., Валеев, А.Р. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи / А.Ю. Елизарьев, А.Р. Валеев // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 4 (70). – С. 59-65.

5. Базаров, А.А., Данилушкин, А.И., Осипов, В.С. Система плавки гололеда на проводах линий электропередачи без отключения нагрузки / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, В.С. Осипов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки // Электротехника. – 2015. – № 3 (47). – С. 109-117.

6. Кузнецов, Г.В., Шеремет, М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности : учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

УДК 620.98

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ФИЛИАЛЕ ПАО «РУСГИДРО» – «ВОЛЖСКАЯ ГЭС»

А.Ю. Рябов – магистрант
А.В. Стрижиченко – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Волжская ГЭС – крупнейшая гидроэлектростанция Волжско-Камского каскада и Европы. Станция играет ключевую роль в функционировании энергосистемы Волгоградской области, ее установленная мощность на I квартал 2018 года – 2671 МВт. Выдачу мощности Волжская ГЭС осуществляет на напряжениях 220 и 500 кВ. Электрическая связь ОРУ 220 кВ и ОРУ 500 кВ осуществляется через автотрансформатор связи 10Т типа 3хАОДЦТН-267000/500/220 суммарной мощностью 801 МВА.

В результате реализации программы комплексной модернизации, проводимой ПАО «РусГидро», будет выполнена замена гидроагрегатов мощностью 115 МВт на принципиально новые, номинальной мощностью 125,5 МВт. После модернизации установленная мощность ГЭС составит 2744,5 МВт, что больше проектной мощности 2541 МВт. Для определения возможности выдачи всей располагаемой мощности Волжской ГЭС было предложено установить параллельно с новым АТ 10Т фазоповоротный трансформатор (ФПТ) типа ТДЦТНФ-195260/220-У1.

ФПТ – это устройство, осуществляющее регулирование напряжения, в результате чего изменяется угол между векторами напряжений электропередачи (в которую включен ФПТ) и, как следствие, происходит желаемое изменение мощности, передаваемой по этой электропередаче, вне зависимости от параметров шунтирующих связей.

Фазоповоротный трансформатор является специализированной формой трансформатора, который применяется для управления потоками активной мощности в трёхфазных электрических сетях.

Поток активной мощности в линии переменного тока пропорционален синусу угла сдвига по фазе между вектором напряжения источника электроэнергии в начале линии и вектором напряжения приёмника электроэнергии в конце линии. Отсюда следует, что если имеется сеть линий разной мощности, то, принудительно изменяя величину угла сдвига между векторами напряжений источника и приёмника электроэнергии в одной или нескольких линиях, можно перераспределять потоки мощности между линиями электрической сети.

В результате появляется возможность реализации более благоприятных сценариев загрузки линий сети относительно естественного распределения потоков мощности, которое часто приводит к перегрузке маломощных линий, ограничению пропускной способности мощных линий, увеличению потерь электроэнергии и другим негативным последствиям.

Фазоповоротный трансформатор выполняет функцию принудительного изменения величины угла сдвига между векторами напряжений источника и приёмника электроэнергии. Схема включения ФПТ показана на рис. 1.

Первичная обмотка параллельного трансформатора выполняется по схеме «треугольник», за счёт чего организуется трёхфазная система напряжений, сдвинутых по отношению к фазным напряжениям источника на 90°.

Вторичная обмотка параллельного трансформатора может быть выполнена в виде изолированных фаз с блоком отпаек, центр которого заземлён.

Фазы вторичной обмотки параллельного трансформатора через выход переключателя блока отпаек соединяются с первичной

обмоткой последовательного трансформатора, которая обычно выполняется по схеме «звезда» с заземлённой нейтралью.

Вторичная обмотка последовательного трансформатора выполняется в виде изолированных фаз, которые включаются последовательно в рассечку соответствующих по фазе проводов линии и добавляют к вектору напряжения источника сдвинутую по фазе на 90° компоненту.

Следовательно, общее напряжение на входе линии становится равным сумме вектора напряжения источника питания и вектора квадратурной составляющей, вносимой ФПТ, то есть изменяет свою фазу. В зависимости от положения переключателя блока отпаек можно изменять амплитуду и полярность вектора квадратурной составляющей, вносимой ФПТ, и таким образом регулировать величину угла сдвига между векторами напряжения на входе и выходе линии в функции от режима работы линии.

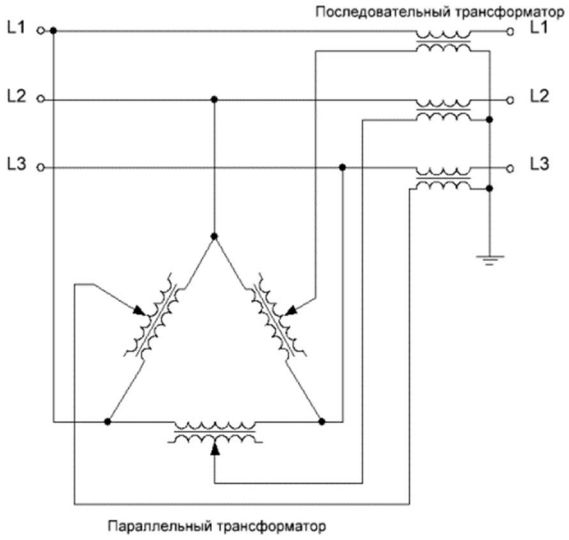


Рис. 1. Схема включения ФПТ в трехфазную сеть

Фазоповоротный трансформатор работает в двух режимах:

– «Лечебный режим»: ФПТ работается с малым сдвигом по фазе в нормальном режиме работы. В случае если одна из линий внезапно отключается, сдвиг по фазе автоматически изменяется, чтобы уменьшить поток мощности на перегруженных линиях и не допустить их отключения;

– «Профилактический режим»: ФПТ работает с постоянным сдвигом фазы и перераспределяет потоки мощности в нормальном режиме работы, чтобы повысить КПД существующей электрической сети.

Имеется большой опыт использования фазоповоротных трансформаторов за рубежом, в настоящее время на американском и европейском континентах успешно работают десятки мощных ФПУ на линиях электропередачи (ЛЭП) переменного тока классов напряжения 60 кВ – 500 кВ. Наблюдается тенденция к увеличению объёмов внедрения ФПУ. Работа ФПУ, состоящего из трансформатора, подключаемого вторичной обмоткой последовательно с ЛЭП, и шунтового, подключаемого между первичной обмоткой трансформатора и ЛЭП, основана на компенсации сдвига фазового угла в ЛЭП с помощью изменения коэффициента трансформации шунтового трансформатора и осуществляется с помощью изменения величины коэффициента трансформации шунтового трансформатора с помощью устройства регулирования под нагрузкой (РПН). Данный трансформатор изображен на рис. 2.

При передаче электроэнергии по цепи 220 кВ и параллельно с ней работающей ЛЭП 500 кВ мощность ограничивается пропускной способностью линии более низкого напряжения. Таким образом, ЛЭП 500 кВ

оказывается недогруженной, в то время как ЛЭП 220 кВ работает при предельно допустимых значениях передачи мощности. Для того чтобы решить данную проблему, на практике применяют статические компенсаторы, объединенные регуляторы перетоков мощности, вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) и фазоповоротные устройства. Все эти устройства успешно работают в электросетевых компаниях различных стран мира.

Рис. 2. Общий вид ФПТ, установленного в Великобритании

В России опыта использования фазоповоротного трансформатора нет, и на Волжской ГЭС будет установлен первый фазоповоротный трансформатор в России.

Затраты на покупку и установку трансформатора существенные, однако срок окупаемости составит около 5 лет, что приемлемо, так как срок службы ФПТ составляет более 30 лет нормальной работы.

Таким образом, после завершения реконструкции гидроагрегатов и увеличения мощности на Волжской ГЭС, фазоповоротный трансформатор, установленный на ОРУ-220, обеспечит станции оптимальную выдачу мощности в сеть.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГЭС – гидроэлектростанция;

ФПТ – фазоповоротный трансформатор;

СМР – строительно-монтажные работы;

ПР – проектно-изыскательские работы;

АТ – автотрансформатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Hurlet, J-C. Riboud, J. Margoloff, A. Tanguy. French experience in phase- shifting transformers. Cigre 2006, A2-204.

2. http://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_booster

3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2007.

4. Добрусин, Л.А. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов / Л.А. Добрусин // Силовая электроника. – 2012. – № 4. – С. 60-66.

5. Бушуев, В.В. Применение фазоповоротных устройств для упрощения потокораспределения в энергосистемах / В.В. Бушуев, А.Х. Калюжный, Л.В. Кречмер, А.А. Шушуев // Электричество. – 1990. – № 11. – С. 6-11.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МИНИ-ТЭЦ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Е.В. Курьянова – ст. преподаватель
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В данной статье проведен анализ различных технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, которые базируются на газопоршневых, газотурбинных установках, на базе топливных элементов, а также рассмотрены технологии и области применения газовых микротурбин. Сделаны выводы о технологиях и областях применения каждого вида мини-ТЭЦ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мини-ТЭЦ, общий и электрический КПД, эффективность энергоустановок, влажно-паровая турбина.

В настоящее время основными производителями тепловой и электрической энергии в большинстве стран мира остаются мощные тепловые электрические станции. Но в этих установках имеются потери, и на некоторых участках немалые; ухудшаются надежность и качество поставляемой энергии и, как следствие, повышаются тарифы на энергоносители.

Одним из направлений решения данной проблемы является развитие малой энергетики. Поэтому в литературе все чаще можно встретить термины «микроэнергетика», «микрокогенерация» [1], т. е. создание источников энергии небольшой мощности, которые располагаются в непосредственной близости от потребителя.

Основными преимуществами мини-ТЭЦ являются их технико-экономические показатели. Оборудование, которое устанавливается на мини-ТЭЦ, имеет компактные размеры, монтаж осуществляется без больших финансовых и трудовых затрат. В большинстве случаев возможно дистанционное управление работой оборудования. Энергетическая эффективность установок малой мощности, которые устанавливаются непосредственно у потребителей в качестве альтернативы централизованному энергоснабжению, определяется снижением себестоимости производства электроэнергии и теплоты за счет комбинированной их выработки, а также использованием более совершенного оборудования и повышением надежности энергоснабжения. Кроме того, под строительство малых электростанций не требуется отчуждение больших территорий, которые необходимы под строительство тепловых электрических станций, а значит, они обладают хорошими экологическими показателями, и снижаются затраты на охрану окружающей среды [2].

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества, данный вопрос об эффективности широкого применения мини-ТЭЦ попрежнему вызывает разногласия среди специалистов. Самый главный аргумент – их недостаточная рентабельность, являющаяся следствием низкого КПД малых станций и высокой амортизационной стоимости оборудования.

В настоящий момент известны различные технологии комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, которые базируются на газопоршневых, газотурбинных и паротурбинных установках. Кроме этого, используется технология на базе топливных элементов: экологически чистое решение, а также газовые микротурбины.

При рассмотрении мини-ТЭЦ мощностью от 100 кВт применяются в основном паротурбинные установки. В диапазоне 30-100 кВт преобладают газопоршневые (ДВС-ТЭЦ), газотурбинные установки (ГТУ-ТЭЦ) и

влажно-паровая микротурбина вертикального исполнения [5, 6]. Приведем сравнительные характеристики различных технологий выработки тепловой и электрической энергии.

Сравнивая эти две технологии, можно сделать следующие выводы: эффективность когенерационных установок можно определить экономичностью установки, на которой работает мини-ТЭЦ. У газопоршневых установок эффективный КПД больше, чем у газотурбинных. Наибольшие выбросы оксидов серы образуются при работе мини-ТЭЦ с газопоршневыми установками, а выбросов оксидов азота больше при работе мини-ТЭЦ с газотурбинными установками. Топливные элементы могут использоваться как в качестве надстройки для ГТУ, так и в качестве первичного двигателя. У установок на базе топливных элементов самый высокий электрический КПД по сравнению с мини-ТЭЦ, работающими на базе газопоршневых и газотурбинных установок. Также мини-ТЭЦ на базе топливных элементов обладает наилучшими экологическими показателями, табл. 1-3.

Таблица 1

Сравнительная характеристика технологий выработки тепловой и электрической энергии на базе ГТУ-ТЭЦ и ДВС-ТЭЦ [5, 6]

	Мини-ТЭЦ на базе газотурбинных технологий (ГТУ-ТЭЦ)	**Мини-ТЭЦ на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС-ТЭЦ)**
Описание технологии	Сжатый в компрессоре воздух и газ под давлением подаются в камеру сгорания, где в процессе сжигания образуются уходящие дымовые газы, которые, расширяясь, приводят в движение ротор турбины. Механическая энергия вращения ротора преобразуется в электрическую с помощью генератора. В схеме предусмотрена установка утилизации тепла	Мини-ТЭЦ с ДВС включает в себя моноблок двигатель – генератор, а также теплообменник, в котором происходит утилизация тепла: – прежде всего, тепла выхлопных газов; – отводимой теплоты при охлаждении двигателя; – тепла охлаждения смазочного масла и т. п. Тепловая энергия в виде горячей сетевой воды подается потребителям
Электрический КПД	25-35 %	36-45 %
Общий КПД	75-85 %	82-89 %
Преимущества технологии	– способность работать на различных видах топлива; – могут эксплуатироваться без остановки до 9000 часов; – небольшой расход смазочного масла; – малые выбросы	– высокий общий и электрический КПД; – меньшая зависимость от температуры наружного воздуха и изменения нагрузок; чем ГТУ-ТЭЦ; – меньший удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электрической энергии, чем ГТУ-ТЭЦ; – давление топлива меньше, чем ГТУ-ТЭЦ
Выброс вредных веществ в окружающую среду	оксидов азота выделяется NO_x = 5-30 г/кВт·ч; оксидов азота выделяется CO = 1-6 г/кВт·ч	NO_x = 1 - 8 г/кВт·ч; CO = 1-5 г/кВт·ч

Таблица 2

Основные характеристики мини-ТЭЦ на базе топливных элементов [5, 6]

Мини-ТЭЦ на базе топливных элементов	
Описание технологии	Топливные элементы (ТЭ) – это электрохимические преобразователи типа батареек, но с непрерывной подачей продуктов реакции. ТЭ преобразуют продукты реакции (водород и кислород) в электрическую и тепловую энергию
Преимущества технологии	– высокий электрический КПД при полной и частичной загрузке; – выделяют наименьшее количество вредных веществ; – не требуют затрат на техническое обслуживание, так как отсутствуют механические компоненты в батарее; – продолжительный срок службы
Электрический КПД	50-55 %
Выброс вредных веществ в окружающую среду	NO_x = 0,03-0,1 г/кВт·ч; CO = 0,1 г/кВт·ч

Таблица 3

Основные характеристики влажно-паровой микротурбины [4]

Влажно-паровая микротурбина	
Описание технологии	Газовые микротурбины состоят из следующих основных элементов: конструкция с вращающимся валом, на котором расположены электрический генератор, компрессор и непосредственно турбина
Основное топливо	газ: природный, попутный нефтяной, генераторный, биогаз; жидкое топливо: дизельное, керосин, бензин
Электрический КПД	26-29 %
Преимущества технологии	– возможность работы в течение длительного времени при низких нагрузках; – низкий уровень вибраций, шума; – работа без смазок и моторного масла (в случае установки воздушных подшипников); – низкая стоимость эксплуатационных расходов; – увеличивается ресурс до капитального ремонта; – возможность работы на различных видах топлива; – высокая надежность; – низкий уровень выбросов ($NO_x \leq 8$ мг/кВт·ч; $CO \leq 20$ мг/кВт·ч)

Для энергоснабжения индивидуальных потребителей имеется возможность установить микротурбины. В работе [4] проводится сравнение микротурбинных установок различных типов, а именно: газопоршневая, газотурбинная и паросиловая энергоустановки. Эти установки сравниваются по электрическим и тепловым показателям (КПД) для энергообеспечения жилого дома площадью 200 м^2. Поэтому паросиловая энергетическая установка более подходит для комбинированного электроснабжения децентрализованного потребителя, чем газопоршневые и газотурбинные агрегаты. Разработаны микротурбинные установки с электрической мощностью 5 и 30 кВт [4], работающие на влажном паре со следующими параметрами: давление пара 0,6 МПа, температура пара 160 °С. На российском рынке представлены в основном зарубежные газовые микротурбины с электрической мощностью до 100 кВт.

Анализ существующих энергоустановок показал, что в настоящее время паросиловые установки имеют преимущества перед газопоршневыми и газотурбинными установками. Такое сравнение проведено по параметрам в проточной части турбины, виду используемого топлива, ресурсу установок, системе регулирования электрической нагрузки и т. п. Таким образом, строительство мини-ТЭЦ позволит решить ряд трудностей, возникающих при цен трализованном производстве тепловой и электрической энергии.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Мини-ТЭЦ – теплоэлектроцентраль малой мощности;

ГТУ-ТЭЦ – мини-ТЭЦ на базе газотурбинных технологий;

ДВС-ТЭЦ – мини-ТЭЦ на базе двигателей внутреннего сгорания;

ТЭ – топливный элемент;

КПД – коэффициент полезного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овечкин, А.Д., Дудкин, Д.А. Микротурбинные системы – будущее малой энергетики [Электронный ресурс]/ А.Д. Овечкин, Д.А. Дудкин // Достижения современной науки.– 2016. – С.66–74. URL: http://science-peace.ru/files/DSN_2016.pdf

2. Канарейкин, А. Зарубежный опыт внедрения малых ТЭС: станут ли они будущим когенерации? / Канарейкин А.// Тепловая энергетика и ЖКХ. – 2013. – № 3. URL: https://www.eprussia.ru/teploenergetika/6/74.htm

3. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.

4. Безуглов, Р.В. Микротурбинная установка для эффективного энергоснабжения автономных индивидуальных потребителей / Р.В. Безуглов, Н.Н. Ефимов, В.И. Паршуков, В.В. Папин, И.В. Янченко, Р.А. Клинников, Д.Ю. Чумаков, Е.С. Трофименко // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2013. – № 1. – 51-55 с.

5. Приложение № 3 к программе «Модернизация электроэнергетики России на период до 2020 года», сайт http://www.nnhpe.spbstu.ru

6. Томаров, Г.В. Мини-ТЭЦ на основе когенерационных технологий / Г.В. Томаров, В.С. Рабенко, В.А. Буданов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 1-6.

УДК 620.92

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г.Ф. Терентьев – канд. техн. наук, доцент
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
А.В. Пивченко – доцент
Е.В. Курьянова – ст. преподаватель
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены некоторые аспекты развития водородных энергетических систем; результаты разработок заправки водородом системы охлаждения турбогенераторов на основе гидролиза алюминия, этапность перехода от «века пара» к «веку электричества», принципиальные проектные решения по основному и вспомогательному оборудования водородно-кислородных мини-электростанций первого этапа; основные направления развития глубокорегулируемых генераторов водорода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водород, кислород, производство водорода, кислорода, водородно-кислородные парогенераторы, водородно-кислородных мини-электрических станций (ВКЭС), широтно-импульсное регулирование в теплоэнергетике.

Развитие водородной энергетики связано в перспективе с созданием новых систем производства водорода, кислорода, транспортных систем, тепла и электроэнергии, использующих водород в качестве энергоносителя и аккумулятора энергии.

К настоящему времени выполнен обширный цикл расчетно-теоретических исследований термодинамической и технико-экономической эффективности водородных энергоустановок различного уровня мощности и различных типов: на базе топливных элементов (в том числе высокотемпературных), энергоустановок паротурбинного цикла, автономных энергоустановок на базе дизель-генераторов [1].

Главным преимуществом этого направления является малая энергоемкость, безотходная технология, то есть возврат высококонцентрированного сырья (алюминатов и диоксида алюминия) в алюминиевую промышленность.

Из проблем, которые накопились в энергетике, можно выделить следующие [2]:

– проблема, связанная с выбросами и отходами при производстве электроэнергии;

– работа ТЭС чревата возможностями глобальных климатических изменений, к которым в первую очередь относятся глобальное потепление, или парниковый эффект, связанный, главным образом, с выбросами оксида углерода, и кислотные дожди, вызываемые выбросами оксидов азота и серы;

– АЭС производят электроэнергию без выбросов парниковых газов, однако перспектива дальнейшего развития этих электростанций зависит от успехов по удалению отходов.

Мировая тенденция развития водородной энергетики базируется на автономном и локальном энергопотреблении. В европейских энергетических программах фигурирует понятие «домашняя электростанция», например мини-электростанции мощностью не более 5 кВт.

В настоящее время создается научно-технический задел по водородной энергетике, который позволит плавно перейти от «века пара» к «веку электричества» в два этапа:

1) создание и отработка для мини-ТЭС агрегатных миникомплексов по производству водорода, кислорода, водородно-кислородных парогенераторов, турбогенераторов и топливных элементов;

2) создание и отработка для водородно-кислородных электростанций (ВКЭС) агре-

гатных комплексов большой мощности по производству водорода, кислорода, водородно-кислородных парогенераторов, турбогенераторов, электрохимических генераторов и топливных элементов.

Рассмотрим принципиальные проектные решения развития первого этапа. На начальном этапе отрабатываются агрегатные комплексы мини-ТЭС с водородно-кислородными парогенераторами, затем – переход к водородно-кислородной мини-электростанции (мини-ВКЭС) на основе электрохимических генераторов с топливными элементами.

На рис. 1 представлена принципиальная тепловая схема мини-ВКЭС, которая содержит: парогенерирующую водородно-кислородную установку 1, паропровод 2, турбину 3, электрогенератор 4, магистраль выхлопа турбины 5, резервную магистраль подачи водорода 6, резервную магистраль подачи кислорода 7, магистраль подачи кислорода 8, вентиль 9, 10, 12, 15, 18, 20, 22, электролизёр 11, электрохимическую установку на топливных элементах 13, электрическую нагрузку 14, кислородную установку 16, магистраль подачи водорода 17, водородную установку гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде 19, основную магистраль подачи водорода 21, магистраль подачи воды 23.

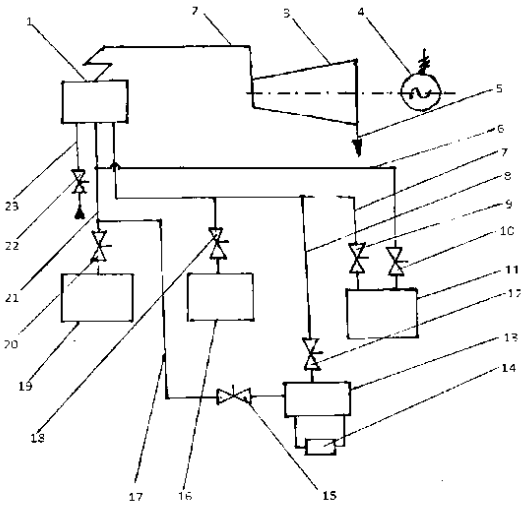


Рис. 1. Тепловая паротурбинная электростанция

Тепловая паротурбинная электростанция включает агрегатные комплексы основного и вспомогательного оборудования: водородную генераторную установку на основе гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде, – которая обеспечивает работу парогенерирующей водородно-кислородной установки, и электрохимическую установку на топливных элементах, обеспечивающую аварийные и собственные нужды станции; электролизерная установка выполняет функции резервной установки по водороду, кислородная установка обеспечивает работу как парогенерирующей водородно-кислородной установки, так и электрохимической на топливных элементах. В этом случае пар подается на турбогенератор, и станция работает в режиме ТЭС.

По мере разработки более мощных электрохимических установок на топливных элементах станция трансформируется в ВКЭС. В этом случае основное теплотехническое оборудование – парогенерирующая водородно-кислородная установка и турбогенератор – выполняют функции резервно-аварийного оборудования, и станция работает в режиме ВКЭС.

На рис. 2 представлена принципиальная схема водородно-кислородного парогазогенератора, обеспечивающего эффективную и устойчивую работу на водороде и углеводородном топливе.

Парогенератор содержит: пароводяную емкость 1, заполненную водой, закручивающее устройство 2, создающее противоточное вихревое движение воды, топливосжигающее устройство с форкамерным запальным устройством 3, выходное отверстие которого погружено в воду, магистраль подачи газообразного топлива на охлаждение 4, магистраль подачи газообразного топлива 5, свечу электроэрозионную 6, магистраль газообразного кислорода 7, питающий водопровод 8, водопроводный вентиль 9, кислородный вентиль 10, водородные (углеводородные) вентили 11 и 12, кислородную питающую магистраль 13, водородные (углеводородные) питающие магистрали 14 и 15, магистраль горячей воды 16, вентиль горячей воды 17, магистраль пара 18, вентиль пара 19.

Центральной проблемой создания эффективных экологических систем на основе водородной энергетики, энергетических водородно-кислородных паротурбинных и парогазовых энергоустановок остаются исследования и разработка глубокореулируемых генераторов водорода, которые являются главным ключевым элементом водородно-кислородных парогенераторов и парогазогенераторов, обеспечивающих эффективность и устойчивость рабочих процессов, а также возможность работы в переменных (в том числе пиковых) режимах, имеющих высокую надежность, длительный ресурс, технологичность и блочность конструкции, и соответствующих требованиям безопасности эксплуатации энергоустановок, принятым в энергетике. Решение указанного комплекса задач по глубокореулируемым генераторам водорода в целом в настоящее время отсутствует.

Одним из возможных направлений является применение в теплоэнергетике принципов широтно-импульсного регулирования (ШИМ-регулирования).

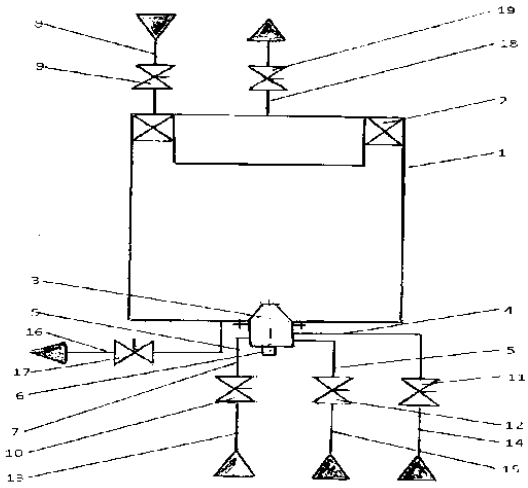


Рис. 2. Принципиальная схема водородно-кислородного парогазогенератора

ВЫВОДЫ

1. Анализ современного состояния и ближайших перспектив развития водородных энергетических технологий показывает, что мировая энергетика переживает период перехода от «века пара» к «веку электричества», связанных с увеличением доли нетрадиционной энергетики и распределенной генерации в общем энергетическом балансе.

2. Активно ведется патентование различных технических решений по водородным технологиям.

3. Создан значительный научно-технический задел для проектных и экспериментальных исследований по мини-ВКЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.energy-exhibition.com/

2. Радченко, Р.В. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.

3. Водородные энергетические технологии: Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сб. науч. тр. / редкол.: Д.О. Дуников (отв. ред.) [и др.]. – М.: ОИВТ РАН, 2017. – Вып. 1. – 190 с.

4. Способ получения водорода за счет гидролиза твердого реагента-алюминия в реакционном сосуде, RU 2545290. Начало действия патента: 15.11.201; Авторы патента: Кузеванов Вячеслав Семенович (RU), Султанов Махсуд Мансурович (RU), Терентьев Геннадий Федорович (RU), Шамигулов Петр Валерьевич (RU); Владельцы патента: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ») (RU).

5. Генератор водорода, RU 2553885, Дата начала отсчета срока действия патента: 15.11.2013, Автор патента: Кузеванов Вячеслав Семенович (RU), Султанов Махсуд Мансурович (RU), Терентьев Геннадий Федорович (RU), Шамигулов Петр Валерьевич (RU), Патентообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ») (RU).

6. Энергоустановка с электрохимическим генератором на основе водородно-кислородных топливных элементов, № RU 2594895. Начало действия патента: 21.07.2015; Изобретатель(и): (RU) Кузеванов В. С., (RU) Курьянов В. Н., (RU) Султанов М. М., (RU) Терентьев Г. Ф.; Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») (RU).

7. Электрохимический генератор на основе водородно-кислородных топливных элементов, № RU 2597412. Начало действия патента: 21.07.2015; Изобретатель(и): (RU) Кузеванов В.С., (RU) Курьянов В.Н., (RU) Султанов М.М., (RU) Терентьев Г.Ф.; Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») (RU).

8. Султанов М.М., Курьянов В.Н., Терентьев Г.Ф. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка модели мобильного комплекса производства водорода на основе гидролиза алюминия в водном растворе едкого натра» (итоговый). Заявка № С1-11742, 1-й этап проекта 21719, г. Волжский, 2017 г.

УДК 621.311.24

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УСЛОВИЕ НАЧАЛА ПРОЦЕССА РЫСКАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Е.В. Капля – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Сформулировано интегральное энергетическое условие, позволяющее выявлять моменты времени начала поворота горизонтально-осевого ветроколеса (ГОВК) вокруг вертикальной оси на основе характеристик ВЭУ и метеоданных.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные горизонтально-осевые ВЭУ имеют активную систему рыскания – автоматическую систему ориентации ветроколеса (ВК) на ветер [1, 2]. Промышленные горизонтально-осевые ВЭУ содержат электромеханические сервоприводы [3, 4], осуществляющие поворот гондолы и ВК вокруг вертикальной оси в процессе рыскания.

Поворот оси ВК осуществляется в соответствии с динамикой направления воздушных потоков. Ветер способен быстро менять направление [5]. Система ориентации не должна реагировать на кратковременные изменения направления ветра. С целью оптимизации энергетических затрат на повороты гондолы и ВК необходима настройка чувствительности системы рыскания.

Контроллер системы рыскания принимает решение о необходимости поворота ветродвигателя в соответствии с измеренными и усреднёнными характеристиками воздушного потока. Алгоритмы систем рыскания промышленных ВЭУ используют [1, 2, 6, 7] угловые и скоростные условия выбора момента времени начала рыскания и величины угла поворота оси ветроколеса.

Поворот гондолы и ВК осуществляется при выполнении условий:

1) средняя скорость ветра больше минимальной рабочей скорости ветра;

2) усреднённое по времени направление ветра отличается от текущего направления оси ВК на величину угла, превышающую максимально допустимую ошибку рыскания (обычно 10°).

1. ОШИБКА РЫСКАНИЯ

Ошибка рыскания – угол между вектором скорости ветра и осью ГОВК (рис. 1). Ошибка рыскания снижает выходную мощность горизонтально-осевых ВЭУ. Эффективная скорость ветра равна

$$v_э(t) = u(t)\cdot\cos(\varphi(t)), \qquad (1)$$

где $\varphi(t)$ – ошибка рыскания; $\varphi(t)=\alpha(t)-\gamma(t)$; $\alpha(t)$ – угол рыскания (угол между осью ВК и выбранной неподвижной горизонтальной базисной осью); $\gamma(t)$ – угол между вектором скорости воздушного потока (направлением ветра) и тем же базисным направлением; $u(t)$ – скорость воздушного потока перед ВК на высоте оси ВК.

Ошибку рыскания стремятся минимизировать с целью повышения энергоэффективности ВК за счёт увеличения ометаемой площади.

Обычно период T_c усреднения направления и скорости ветра принимают равным 10-20 минутам [6], а максимально допустимую ошибку рыскания $\varphi_m = 10°$ [1].

Ошибки рыскания ВК могут быть вызваны:

1) непрерывными случайными изменениями направления и скорости ветра в месте измерения этих характеристик и в месте расположения ВК;

2) неоднородностью воздушного потока через ометаемую площадь ВК;

3) погрешностью измерений скорости и направления ветра;

4) ограниченной чувствительностью системы рыскания к малой ошибке рыскания;

5) инерционностью системы рыскания.

Мелкомасштабные изменения скорости и направления ветра, обусловленные турбулентностью атмосферы, в алгоритмах управления ориентацией ВК на ветер не учитываются.

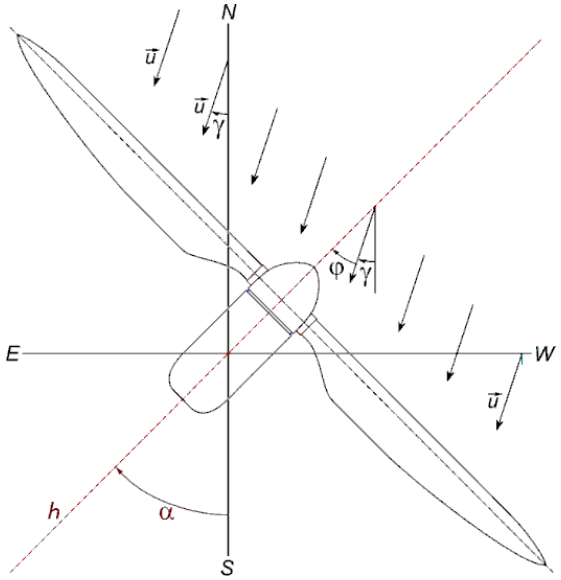


Рис. 1. Проекция ГОВК на горизонтальную плоскость

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЭУ

Типичная зависимость $P(v)$ выходной мощности генератора ВЭУ от скорости воздушного потока на высоте оси ВК (кривая мощности ВЭУ) представлена на рис. 2. Кривая мощности характеризует зависимость электрической мощности на выходе генератора ВЭУ от скорости ветра при идеальных условиях ветра (то есть при постоянной скорости и постоянном направлении ветра, соответствующем нулевой ошибке рыскания).

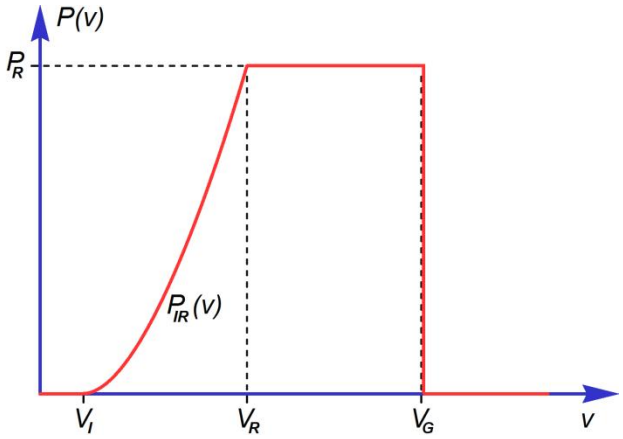


Рис. 2. Теоретическая кривая мощности ВК

Кривые мощности используют для расчета энергетической производительности ВЭУ (количества электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ за ограниченное время). Кривая мощности – основная характеристика ВЭУ.

Вырабатываемая ВЭУ мощность увеличивается с возрастанием скорости ветра на участке от V_I до V_R. Зависимость вырабатываемой мощности $P_{IR}(v)$ может аппроксимироваться линейным, квадратичным или кубическим полиномом. Функция $P_{IR}(v)$ зависит от конструкции ВК (турбины).

Кривую мощности ВК аппроксимируют степенным полиномом [1, 3], в котором слагаемые содержат степени скорости v. Кривую мощности обычно аппроксимируют [3] между V_I и V_R степенным выражением

$$P_{IR}(v) = P_R \cdot \left(\frac{v^n - V_I^n}{V_R^n - V_I^n} \right), \qquad (2)$$

где n – степенной параметр, который может принимать дробные значения.

Кривая мощности ВК полностью описывается кусочно-гладкой функцией:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad v \le V_I \\ P_{IR}(v), & \text{если} \quad V_I < v < V_R \\ P_R, & \text{если} \quad V_R \le v < V_G \\ 0, & \text{если} \quad v \ge V_G \end{cases}. \qquad (3)$$

При $v > V_G$ система управления ВК переводит лопасти во флюгерное положение.

3. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРИЕНТАЦИИ ВЕТРОКОЛЕСА

Механическую мощность, развиваемую ГОВК, можно представить с использованием коэффициента эффективности ВК, зависящего от ошибки рыскания:

$$P(t) = K_э(\varphi(t)) \cdot P_{\max}(t), \qquad (4)$$

где $K_э(..)$ – коэффициент эффективности ВК, зависящий от ошибки рыскания $\varphi(t)$; $P_{\max}(t)$ – максимальная механическая мощность, получаемая при нулевой ошибке рыскания на интервале времени, продолжительность которого превышает постоянную времени ВК.

Коэффициент эффективности ВК представляют [7] функцией от ошибки рыскания:

$$K_э(\varphi) = \cos^3(\varphi). \qquad (5)$$

График зависимости $K_э(\varphi)$ показан на рис. 3.

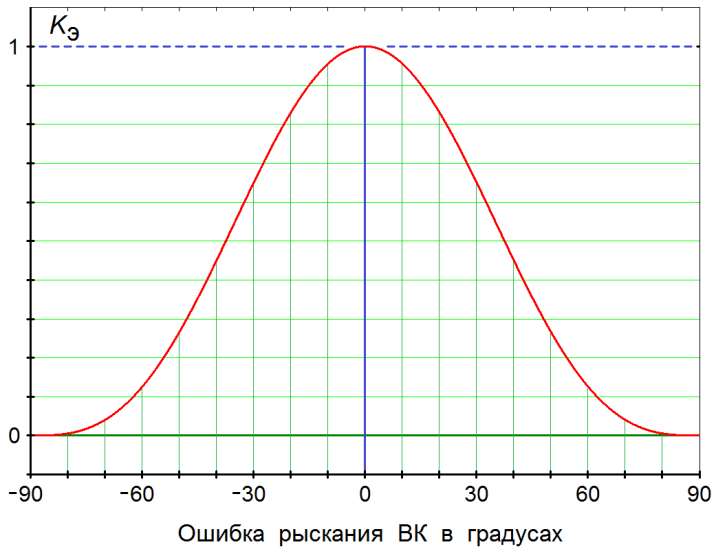


Рис. 3. График зависимости коэффициента эффективности ГОВК от ошибки рыскания

Механическая мощность ВК и генерируемая ВЭУ мощность пропорциональны $\cos^3(\varphi(t))$.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УСЛОВИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВОРОТА ОСИ ВЕТРОКОЛЕСА

Энергетический выигрыш от поворота ВК должен быть больше затраченной на поворот энергии. Целесообразность начала поворота гондолы и ВК в момент времени t определяется условием

$$\eta_г \cdot \int_t^{t+T} (P''(\tau) - P'(\tau))\, d\tau > \frac{k}{\eta_с} \cdot \int_{\alpha(t)}^{\alpha(t)-\varphi(t)} M_1(n \cdot \alpha(t))\, d\alpha, \qquad (5)$$

где $\alpha(t)$ – угол рыскания ГОВК в момент времени t; $\varphi(t)$ – ошибка рыскания ГОВК в

момент времени t; $\eta_г$ – КПД генератора ВЭУ; $\eta_с$ – КПД сервопривода рыскания ВЭУ; $P'(\tau)$ – электрическая мощность на выходе генератора ВЭУ в момент времени τ при неподвижном положении гондолы с текущей ошибкой рыскания; $P''(\tau)$ – прогнозируемая электрическая мощность на выходе генератора после минимизации ошибки рыскания (после поворота гондолы); $M_1(n \cdot \alpha(t))$ – механический вращающий момент, создаваемый одним электродвигателем системы рыскания; k – количество одинаковых электродвигателей в составе сервопривода рыскания; T – прогнозируемая продолжительность неподвижного состояния гондолы; n – передаточное число редуктора сервопривода рыскания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулировано интегральное энергетическое условие (5), позволяющее выявлять моменты времени начала поворота горизонтально-осевого ветроколеса (ГОВК) вокруг вертикальной оси на основе характеристик ВЭУ, оснащённой активной системой рыскания, и метеоданных.

Форма энергетического условия начала процесса рыскания имеет вид неравенства (5), в левой части которого участвует энергетический выигрыш ВЭУ, приобретаемый в результате изменения угла рыскания, а в правой части неравенства (5) – энергия, затраченная на поворот оси ветроколеса.

Представленное энергетическое условие позволяет выявить целесообразность начала процесса рыскания ГОВК в текущий момент времени t.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mathew, S., Philip, G.S. Advances in wind energy conversion technology / S. Mathew, G.S. Philip // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 216 p.

2. Hölling, M. Wind energy – Impact of turbulence / M. Hölling, J. Peinke, S. Ivanell // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. – 2014. – 210 p.

3. Gasch, R., Twele, J. Wind power plants: Fundamentals, design, construction and operation. – 2nd edition / R. Gasch, J. Twele // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. – 2012. – 550 p.

4. Heier, S. Grid integration of wind energy: Onshore and offshore conversion systems. – 3nd ed. / S. Heier // Chichester: John Wiley & Sons. – 2014. – 513 p.

5. Капля, Е.В. Обобщение логистического закона распределения в статистическом анализе динамики направления ветра / Е.В. Капля // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Том 52. – № 6. – С. 669-675.

6. Bianchi, F.D. Wind turbine control systems: principles, modeling and gain scheduling design / F.D. Bianchi, H.D. Battista, R.J. Mantz. – London : Springer-Verlag, 2007. – 206 p.

7. Johnson, K.E. Adaptive torque control of variable speed wind turbines / K.E. Johnson // National Renewable Energy Laboratory / TP-500-36265. – August 2004. – 107 p.

УДК 621.65

ТЕПЛОВИБРОМОНИТОРИНГ КОНДЕНСАТНЫХ НАСОСОВ

М.А. Шамсиев – магистрант
Г.Ф. Терентьев – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

Конденсатные насосы отличаются от обычных тем, что могут работать с конденсатом температурой выше 120 °С, а некоторые помпы выдерживают температуру до 160 °С, и при этом не возникает кавитация. Аварийные ситуации характеризуются появлением из подшипников дыма; появлением из двигателя дыма и искр, запахом горящей изоляции; возникновением вибрации и шума.

Проблемой современного состояния роторного оборудования энергетики является создание эффективного контроля вибрационного и теплового состояния насосных агрегатов станции, находящихся в эксплуатации. Наиболее прогрессивным решением является внедрение в котлотурбинном цехе технической диагностики роторного оборудования, в том числе группы конденсатных насосов, что позволяет выявлять дефекты и неисправности оборудования на ранней стадии их развития.

На рис. 1 показан разрез типового конденсатного насоса [1].

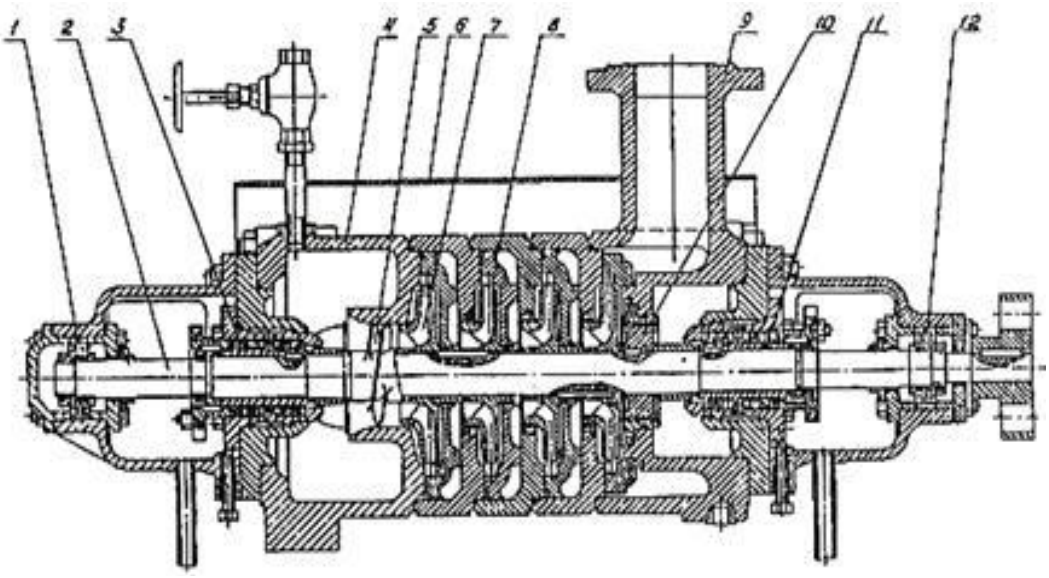


Рис. 1. Разрез конденсатного насоса:
1 – подшипник; 2 – вал, 3 – сальник; 4 – входная крышка;
5 – предвключенное колесо; 6 – кожух; 7 – рабочее колесо; 8 – направляющий аппарат;
9 – напорная крышка; 10 – барабан; 11 – втулка; 12 – подшипник

Вибрация и тепловое состояние роторного оборудования Волжской ТЭЦ-2 является комплексным показателем, определяющим надежность и экономичность оборудования. В этом показателе находят свое отражение обоснованность принятых в проекте конструктивных решений по агрегатам; качество его изготовления, монтажа и ремонта; режимные условия работы оборудования. Материалы по обследованию вибрационного состояния действующего натурного оборудования следует рассматривать как результат уникального эксперимента, который не может быть воспроизведен ни в одной лаборатории. Исследование вибрационных и тепловых характеристик роторного оборудования

является всегда актуальным, так как направлено на повышение технического уровня оборудования и предупреждение аварийных ситуаций. Разработана база данных группы конденсатных насосов, представленных в таблице.

Турбоагрегат ПТ100/114-130/13 ст. № 1

Конденсатный насос КсВ-125-140	КН-1А	146 083,1	Гл. корп. Т.О.
Конденсатный насос КсВ-125-140	КН-1Б	146 083,1	Гл. корп. Т.О.
Конденсатный насос КсВ-125-140	КН-1В	146 083,1	Гл. корп. Т.О.
Конденсатные насосы бойлеров ТГ-1 КсВ125-140	КНБ-1А	146 354,21	Гл. корп. Т.О.
Конденсатные насосы бойлеров ТГ-1 КсВ125-140	КНБ-1Б	146 354,21	Гл. корп. Т.О.
Конденсатные насосы бойлеров ТГ-1 КсВ125-140	КНБ-1В	146 354,23	Гл. корп. Т.О.
Конденсатные насосы бойлеров ТГ-1 КсВ125-140	КНБ-1Г	146 354,23	Гл. корп. Т.О.

Турбоагрегат ПТ140/165-130/15-3 ст. № 2

Конденсатный насос КсВ-320-160	КН-2А	146 083,2	Гл. корп. Т.О.
Конденсатный насос КсВ-320-160	КН-2Б	146 083,2	Гл. корп. Т.О.
Конденсатный насос КсВ-320-160	КН-2В	146 184,0	Гл. корп. Т.О.

Целью исследования является определение зависимости тепловых и вибрационных параметров группы конденсатных насосов от режимных и конструктивных факторов; разработка способов улучшения теплового и вибрационного состояния действующих конденсатных насосов.

Методика исследования тепловибрационных испытаний

Тепловибрационные испытания конденсатных насосов можно разделить на следующие группы.

1. Приемо-сдаточные, проводимые при приемке конденсатных насосов в эксплуатацию.
2. Эксплуатационные, проводимые перед выводом конденсатных насосов в ремонт и после окончания ремонта.
3. Исследовательские, проводимые обычно на конденсатных насосах, имеющих ненормально повышенную вибрацию и тепловое состояние, увеличенный шум, перегрев и пр.
4. Аварийные, проводимые после восстановительного ремонта конденсатных насосов, связанного с аварийным повреждением узлов конденсатных насосов.

Контролепригодность конденсатных насосов по параметрам вибрации

Одной из важнейших характеристик современных машин и оборудования является обеспеченность условий для измерения контролируемых параметров, то есть контролепригодность объекта контроля. Одним из обязательных для контроля параметров является величина вибрации в точках контроля, определенных документацией производителя, стандартами и/или регламентами. Стандарты по допусковому контролю позволяют, если невозможно измерять вибрацию в оптимальных точках контроля оборудования, например на опорах вращения, измерять ее в других точках, и, прежде всего, в точках крепления оборудования к фундаменту. Поэтому специальных мест для установки датчиков вибрации в оптимальных точках и направлениях измерения многие производители оборудования не готовят. Как правило, вибрация на неподвижных частях оборудования при допусковом контроле измеряется малогабаритными пьезоэлектрическими датчиками ускорения, которые устанавливаются на головки крепежных болтов с помощью магнитов. В том случае, если таким образом датчик установить невозможно, очищается от краски и шлифуется площадка на корпусе оборудования, позволяющая установить датчик в радиальном к оси оборудования направлении [2]. Для измерения вибрации в двух других направлениях используются либо магниты специальной формы, представленные на рис. 2, либо трехкомпонентные датчики.

Для проведения исследований применялись двухканальные виброанализаторы для вибрационного контроля и мониторинга и

типовой тепловизор для исследования теплового состояния. Тепловизионный метод является одним из основных методов контроля для выявления местных перегревов, утечек теплоносителей. Двухканальные виброанализаторы обеспечивают измерение вибрации в установившемся режиме работы оборудования. Вибрация измеряется в диапазоне частот от ~5 Гц до –20 кГц с динамическим диапазоном ~60 дБ и линейностью не хуже 0,3 %. Существуют две основные проблемы использования таких виброанализаторов по прямому назначению: это невозможность контроля вибрации низкооборотных машин с частотой вращения ниже 600 об/мин, который осуществляется с частоты 2 Гц, и требуемого стандартами контроля вибрации высокооборотных машин с гибкими роторами, например турбогенераторов в переходных режимах работы. Для проведения измерений в режимах пуска-выбега требуется многоканальный виброанализатор с большим (более 10) числом каналов измерения вибрации.

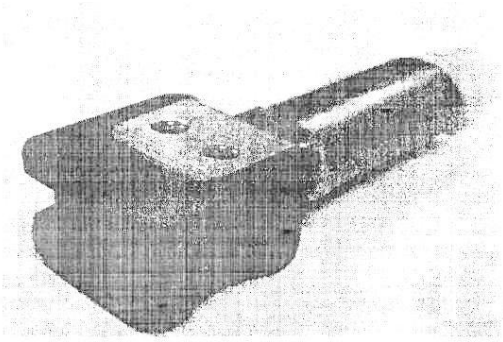


Рис. 2. Датчик вибрации с трехкомпонентным магнитом

Типовые анализаторы, как правило, обеспечивают измерение и основные виды анализа вибрации, необходимые для общего вибрационного мониторинга оборудования в установившихся режимах работы, диагностики неисправностей и балансировки роторов. Однако их технических возможностей не хватает для специального мониторинга, мониторинга вибрации в переходных (пусковых) режимах работы и глубокой (превентивной) диагностики машин и оборудования. Для решения последних задач виброанализаторы должны иметь расширенный частотный и динамический диапазоны (не хуже 2 Гц – 25 кГц и 70 дБ), работать в многоканальном режиме и проводить специальные виды анализа сигналов, в частности, спектральный анализ сигналов огибающей вибрации, выделенной перестраиваемым по частоте полосовым фильтром». Примером такого виброанализатора является СД-12М, представленный на рис. 3, и СД-21, представленный на рис. 4 [3].

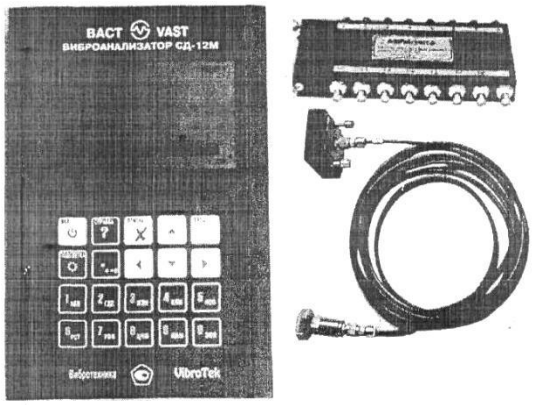


Рис. 3. Виброанализатор СД-12М с подключаемыми к нему одноканальным виброизмерительным трактом или многоканальным коммутатором

Виброанализатор СД-21 с подключаемыми к нему одноканальным виброизмерительным трактом или многоканальным коммутатором:

а) стандартный комплект поставки: виброанализатор в комплекте с вибропреобразователями, кабелями, датчиком оборотов, штативом, зарядным устройством и чехлом. Поставляется в приборной сумке. В комплект входит программное обеспечение Vibro 12;

б) дополнительные принадлежности: вибропреобразователи и кабели, запасной блок питания, противошумные наушники, токоизмерительные клещи, вихревой датчик оборотов, коммутаторы 4-16 каналов, весы для балансировочных грузов и др., рис. 5.

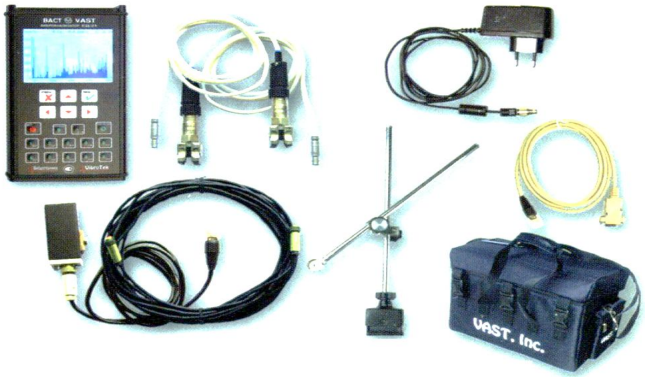


Рис. 4. Стандартный комплект поставки: виброанализатор в комплекте с вибропреобразователями, кабелями, датчиком оборотов, штативом, зарядным устройством и чехлом. Поставляется в приборной сумке. В комплект входит программное обеспечение Vibro 12

Рис 5. Дополнительные принадлежности: вибропреобразователи и кабели, запасной блок питания, противошумные наушники, токоизмерительные клещи, вихревой датчик оборотов, коммутаторы 4-16 каналов, весы для балансировочных грузов и др.

Если поверхность оборудования в точке контроля выполнена из немагнитного материала, к ней приклеивается, в том числе с помощью холодной сварки, шайба из магнитной стали, которая остается на все время эксплуатации оборудования. Установочная плоскость этой шайбы консервируется на время между измерениями путем нанесения на нее тонкого слоя смазки. Перед каждым измерением вибрации слой старой сказки снимается и наносится новый. Примерные точки измерения вибрации при допусковом контроле приведены на рис. 6.

Похожая ситуация складывается и при решении задач общего и специального вибрационного мониторинга, который, как правило, проводится в тех же точках, что и пусковый контроль. Сложности могут возникнуть лишь в двух случаях. Во-первых, если специальный мониторинг проводится в нестандартных точках контроля, например, на различном навесном оборудовании, в щитах

управления, задвижках и т. п. Подготовка места установки датчика может в этом случае сопровождаться не только техническими трудностями, но и организационными, связанными с многочисленными согласованиями изменений технической документации с разработчиками оборудования и контролирующими органами. Во-вторых, при использовании стационарных систем мониторинга могут возникнуть проблемы не только с подготовкой места установки датчиков, но и со стационарной проводкой в эти точки сигнальных кабелей и кабелей питания датчиков. Оптимальным способом организации систем мониторинга является выдача технического задания на приобретаемое оборудование вместе с системой мониторинга до начала проектирования, что обеспечит выполнение требований к его контролеспособности. Многие производители нового оборудования по собственной инициативе выполняют работы по привязке конкретных видов систем мониторинга, которые могут поставляться как вместе с новым оборудованием, так и устанавливаться на любом этапе его эксплуатации.

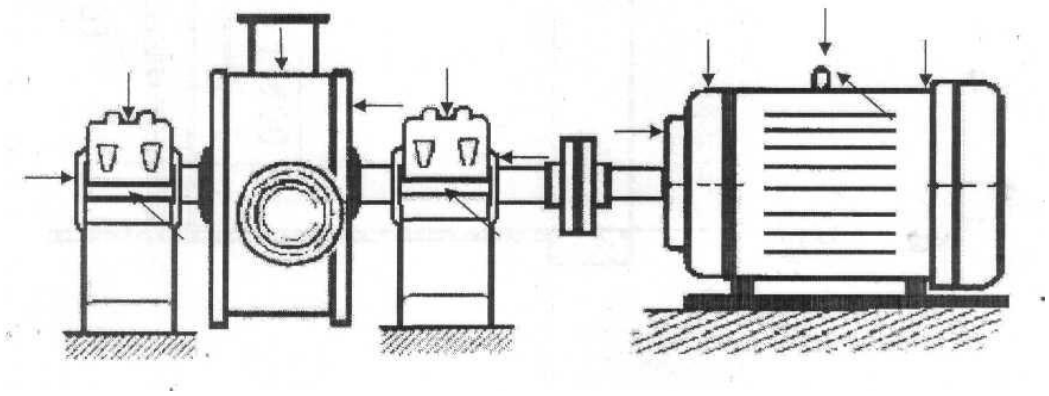


Рис. 6. Рекомендуемые точки контроля вибрации
для горизонтально установленного оборудования

Наиболее сложной задачей является обеспечение контролеспособности машин и оборудования для решения задач превентивной диагностики. Поскольку алгоритмы диагностики не являются объектом стандартизации, существует много разных технологий диагностики, требующих измерения разных сигналов в разных точках оборудования. Определенные организационные преимущества имеют те технологии глубокой диагностики, которые основаны на измерениях тех же сигналов и в тех же точках, которые используются для контроля и мониторинга. Так, в вибрационной диагностике вращающегося оборудования чаще используются технологии, требующие измерений вибрации на опорах вращения. По сравнению с технологиями контроля они могут измерять вибрацию в более широких полосах частот, использовать более сложные методы обработки информации, измерять невибрационные параметры. Но есть одно принципиальное отличие наиболее прогрессивных технологий вибрационной диагностики – они строятся на анализе всех форм колебаний, в том числе и крутильных, возбуждаемых пульсирующими моментами. При стандартных измерениях вибрации опор вращения в двух радиальных и осевом направлениях рост крутильных колебаний обнаружить крайне сложно. Поэтому приходится вводить дополнительные точки контроля, очень часто сокращая количество точек контроля в радиальном и осевом направлениях, рис. 7.

Обеспечивать контролеспособность оборудования для измерения крутильных колебаний, а также вибрации корпусов потокосоздающих узлов, используемой для их глубокой диагностики, приходится эксплуатирующим организациям или специалистам по диагностике оборудования, так как технические требования к подготовке мест установки датчиков для таких измерений не выдвигает ни один из заказчиков нового оборудования. Лишь в отдельных случаях удается

проводить диагностический анализ колебательных сил (тормозящих пульсирующих моментов) путем анализа токов электродвигателя, обеспечивающего крутящий момент в диагностируемом оборудовании.

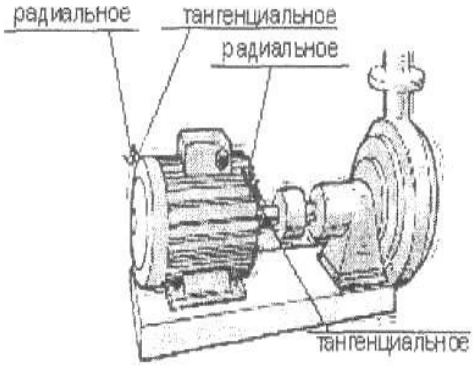


Рис. 7. Использование дополнительных точек контроля вибрации электрической машины по касательной (тангенциальное направление) вместо точек контроля вибрации в горизонтальном и осевом направлениях

Выводы

1. Разработана база данных для группы конденсатных насосов котлотурбинного цеха Волжской ТЭЦ-2.

2. Определена методика исследования и схема измерений вибраций и теплового состояния.

3. Произведен выбор приборных и программных средств для проведения исследований по тепловибромониторингу группы конденсатных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://studwood.ru/1101994/matematika_himiya_fizika/kondensatnye_nasosy

2. Баркова, Н.А., Борисов, А.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частот вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза / Н.А. Баркова, А.А. Борисов. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2009. – 111 с.

3. Терентьев, Г.Ф. Диагностика теплоэнергетического оборудования: Учебное пособие / Г.Ф. Терентьев. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2012. – 156 с.

УДК 621.762.2(088.8)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

А.Л. Суркаев – канд. техн. наук, доцент
М.М. Кумыш – канд. техн. наук, доцент
В.И. Усачев – зав. лабораториями
Т.А. Сухова – канд. физ.-мат. наук, доцент
В.Б. Светличная – канд. техн. наук, доцент
Т.А. Матвеева – канд. физ.-мат. наук, доцент
ВПИ (филиал) ВолгГТУ, г. Волжский, Россия

АННОТАЦИЯ. С использованием информационно-измерительной системы (ИИС), позволяющей осуществлять исследования электрического взрыва проводников (ЭВП), и универсальной двулучевой электронной системы Versa 3D как составной ее части получены результаты экспериментальных исследований электрического взрыва металлических проволочек. ИИС представляет собой комплекс экспериментальных установок, преобразователей, приборов и устройств, включая запоминающий двухканальный электронный осциллограф и универсальную двулучевую систему Versa 3D для получения стереоскопических изображений. Существенную роль при генерации мелкодисперсных частиц и создании тонких пленок играют уровень и однородность джоулева нагрева, а размер частиц определяется величиной введенной энергии, радиусом проволочки, плотностью тока и характеристиками окружающей среды. Полученные образцы напыляемых тонких пленок и мелкодисперсных частиц при протекании разрядного тока миллисекундного диапазона показывают, что их размеры могут достигать величин меньше микронного масштаба. Полученные результаты можно использовать в технологии напыления электрических контакторов для различных высокоамперных коммутирующих устройств.

В данной работе объектом исследования являлся механизм электрического взрыва металлических проводников. Предметом исследования являлся анализ мелкодисперсных металлических частиц и напыляемых на подложки тонких пленок, получаемых при «медленном» электрическом взрыве металлических проводников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационно-измерительная система, электрический взрыв проводника, МГД-неустойчивость, тонкие металлические пленки, мелкодисперсные частицы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время придаётся очень большое значение разработке технологий и получению материалов с использованием наноразмерных объектов, а развитие нанотехнологий [1, 2] является одним из приоритетных направлений в науке и технике. Одним из наиболее широко применяемых и перспективных способов получения мелкодисперсных порошков микронного и наноразмерного диапазонов является электрический взрыв проводников (ЭВП). Исследования и применение диспергированных металлов представлено широким спектром современных источников [3-5]. Дисперсность и физико-химические свойства порошков зависят от ряда причин, наиболее существенными из которых являются, в частности, плотность электромагнитной энергии, введенная в проводник, скорость протекания плотности разрядного тока, разновидность и параметры проводников, а также параметры окружающей среды и ее химическая активность. Целью данной работы является экспериментальное исследование мелкодисперсных частиц микроразмерного диапазона, получаемых

методом электрического взрыва медных (Cu) и нихромовых (Ni-Cr) проволочек в воздушной атмосфере, при протекании микросекундного разрядного тока.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На блок-схеме экспериментальной установки (рис. 1) показаны составные части ИИС: ЭВП – электрический взрывающийся проводник (цилиндрической геометрии или в виде плоской фольги); ГИТ – генератор импульсных токов; ПР – пояс Роговского; ДН – делитель напряжения; ЭО – электронный осциллограф; ПК – персональный компьютер; Versa 3D – универсальная двулучевая система.

Энергетический накопитель является традиционным [6, 7] емкостного типа. Напряжение, подаваемое на конденсаторы накопителя, выбиралось максимальным $U_{\max} = 2\,kV$, а параметры взрывающихся проводников обеспечивали режим протекания взрыва близким к согласованному.

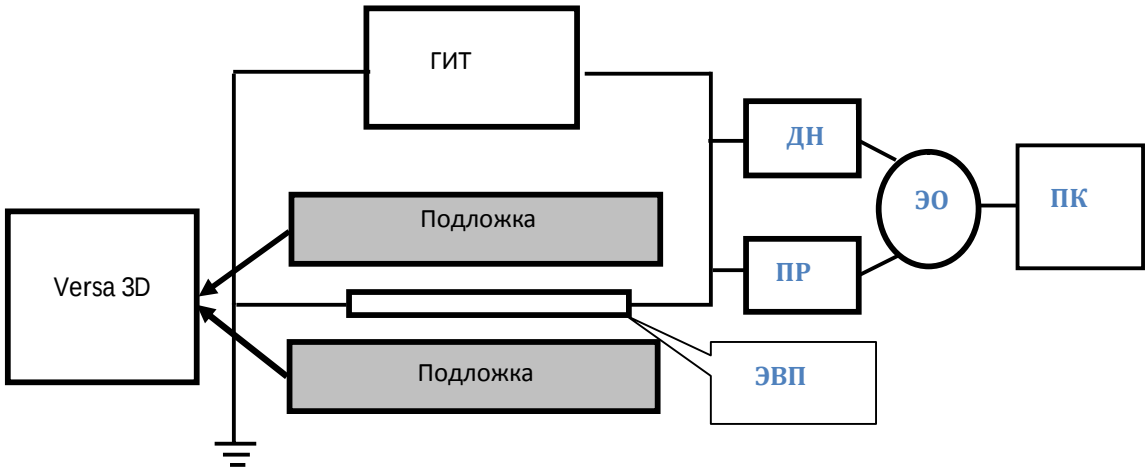


Рис. 1. Блок-схема эксперимента для исследования тонких пленок и составляющих их микрочастиц, напыляемых на металлические подложки методом ЭВП в атмосферной среде

В процессе экспериментов продукты электрического взрыва осаждались на подложках, выполненных из различных материалов и расположенных в непосредственной близости к взрывающемуся проводнику $h = 0{,}5 \div 2{,}0\,mm$. Для анализа характерных размеров и химического состава получаемых мелкодисперсных частиц использовалась универсальная двулучевая система Versa 3D, позволяющая осуществлять, в частности, трехмерную визуализацию микрообъектов и определять физико-химические характеристики материалов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Электрический взрыв медной проволочки (Cu) протекал (рис. 2, a) близким к согласованному режиму с паузой тока, когда вся энергия конденсаторного накопителя реализуется в LC-контуре за первый полупериод. При электрическом взрыве проволочки из нихрома (NiCr), являющегося одним из представителей тугоплавких металлов, пауза тока располагалась (рис. 2, b) в первой половине полупериода, и процесс реализации энергии конденсаторного накопителя происходил за полный период [9]. Данный момент можно интерпретировать тем, что используемый нихромовый проводник имеет сравнительно малый диаметр $d_{NiCr} = 0{,}08 \cdot 10^{-3}\,m$ и наличие дефектов и механических неоднородностей, возникающих при изготовлении проволочки, значительным образом оказывает влияние на протекание ЭВП. Источником разрушения проводника будут являться имеющиеся дефекты, и первоначально непосредственно взрыв носит изолированный характер. Дальнейшее протекание ЭВП из нихрома сводится к образованию неидеального металлического плазменного канала.

Из анализа полученных осциллограмм и следуя авторам [8] оценены основные параметры электрического взрыва проводников для данных материалов. Значение введенной в проводник энергии $E = \int IUdt$ определяется традиционно (рис. 3); энергия сублимации согласно определению есть $W_s^{tab} = r + \lambda + c(T_b + T_0)$, где r, λ, c, T_b, T_0 – удельная теплота парообразования, удельная теплота плавления, удельная теплоемкость, температура кипения и комнатная соответственно.

С другой стороны [8] энергия сублимации рассчитывается $W_s \approx \rho C^2{}_s/2$, критическая плотность тока $j_* = \sqrt{q_* \sigma / 2r_w}$, характерная для данного металла плотность потока энергии $q_* = \rho C_s^3/2$ (табл. 1). Расчет введенной в проводник энергии осуществлялся до возникновения дугового разряда, то есть до момента возникновения паузы тока.

Формирование в процессе электрического взрыва проводников, происходящего в микросекундном временном диапазоне, металлической высокотемпературной плазмы, которая расширяется с высокой скоростью ($\upsilon \approx 3 \cdot 10^3$ m/c и более), позволяет производить нанесение плотного металлического покрытия.

Таблица 1

Оценка основных параметров электрического взрыва проводников

Metal	Size, *mm*	U_0, *kV*	W_0, *J*	*E, J*	W_S^{tab}, J/mm^3	W_S, J/mm^3	$j_* \cdot 10^{-6}$ A/mm^2	$q_* \cdot 10^{-8}$ W/mm^2	E_S, *J*	$\frac{E}{E_S}$
Cu	$\ell = 80$ $d = 0{,}38$	2	640	161	52	62,5	5,9	2,4	473,4	0,34
80Ni-20Cr	$\ell = 40$ $d = 0{,}08$	2	640	28,5	72	95	1.4	4,6	15,2	1,9

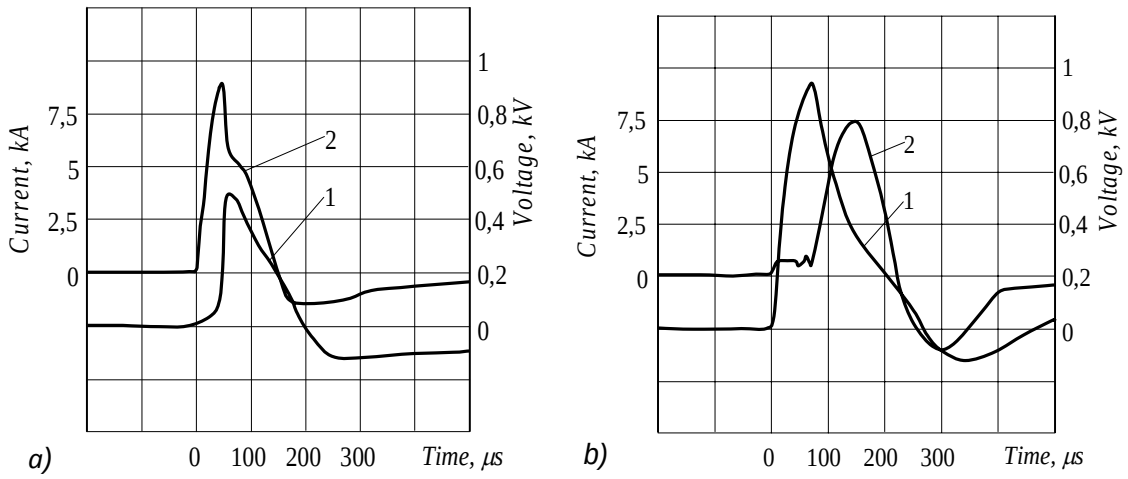


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения электрического взрыва проводников

Разогрев частиц и их транспортировка в процессе напыления происходит в «квазивакуумных» условиях, что препятствует окислению напыляемого металла. На микрофотографиях (рис. 3) представлены образцы напыления медной пленки (рис. 4, a) и нихромовой пленки (рис. 4, b), угол наблюдения среза пленки составлял $\alpha = 52°$. Толщина пленки медного напыления лежит в пределах микронного диапазона $h_{Cu} \approx 1 \mu m$, толщина пленки нихромового напыления $h_{NiCr} \approx 2 \div 3{,}5 \mu m$, при этом поверхность по-

следнего имеет более неоднородный характер, чем для медного напыления. Это можно интерпретировать неидентичностью режимов протекания взрыва для различных металлов, разным значением плотности разрядного тока, физико-химическими свойствами металлов и т. д.

Характерный размер высокодисперсных частиц для данных металлов, наблюдаемых в локально выделенной площадке на подложке, примерно равны $d \approx 0{,}2 \div 2\mu m$, чего нельзя сказать про их концентрации. Это, очевидно, определяется значительной разнородностью металлов, отношением вложенной энергии в данный проводник к энергии сублимации (табл. 1), а также произвольностью выбора исследуемой площадки и т. д. В качестве примера на микрофотографиях (рис. 5) даны изображения микрочастиц металлов, выбранные произвольным образом, и показаны их размеры.

Фотографии иллюстрируют наличие частиц с высокой дисперсностью, диаметр которых, при сравнительно малой запасенной энергии конденсаторного накопителя $W_0 = 640J$ и при микросекундном разрядном токе, приближается к наноразмерной границе менее $d \approx 500\,nm$.

Анализ усредненного химического состава продуктов электрического взрыва (табл. 2) показывает наличие как основного взрываемого металла (Cu, Ni, Cr), так и малое содержание материала подложки, но, кроме того, отмечается наличие кислородной компоненты.

Протекание ЭВП в воздушной среде, хотя и скоротечное, объясняет присутствие кислорода в продуктах взрыва, при этом относительная погрешность наличия составила $\varepsilon \approx 9{,}2\,\%$ для медной взрывающейся проволочки и $\varepsilon \approx 8{,}76\,\%$ для нихромовой проволочки.

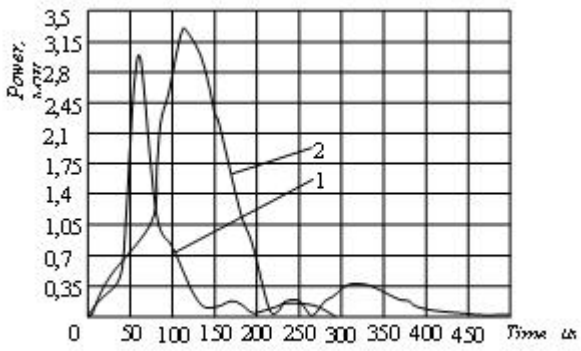


Рис. 3. Графики мощности для электрического взрыва проводников: 1 – медного (Cu) и 2 – нихромового (Ni-Cr)

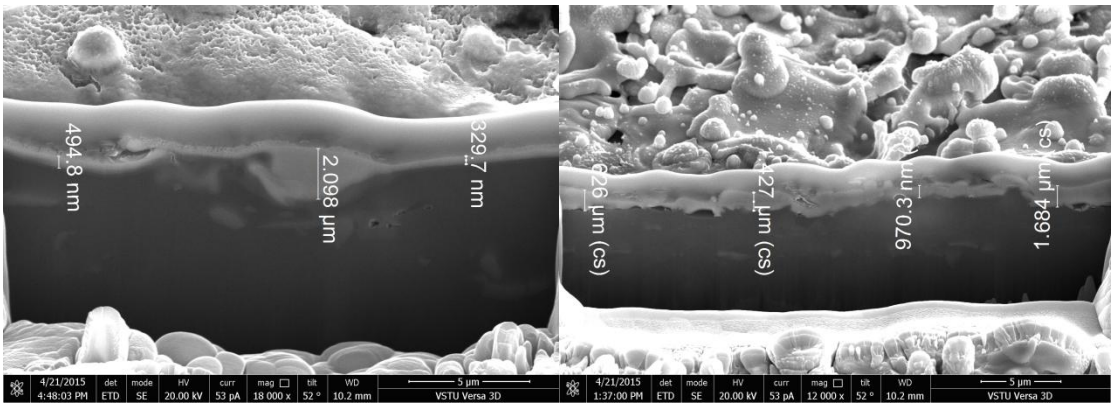


Рис. 4. Микрофотографии нанесенных тонких покрытий с использованием ЭВП: a) медь (Cu) на алюминиевой подложке; b) нихром (Ni-Cr) на алюминиевой подложке

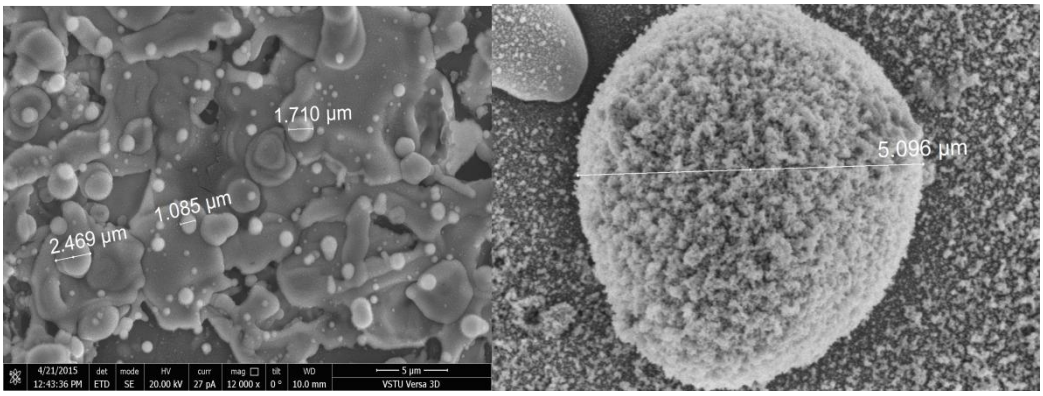


Рис. 5. Микрофотографии характерных размеров металлических микрочастиц

Таблица 2

Усредненный химический состав продуктов электрического взрыва

Substrate material	Metal	Chemical element	Weight, %	Atomic, %	Metal	Chemical element	Weight, %	Atomic, %
Al	Cu	Cu	92,2	77,2	Ni-Cr	Ni	74,4	66,8
		Al	2,7	5,3		Cr	17,7	15,7
		O	5,1	17,5		Al	2,7	5,1
		–	–	–		O	5,2	12,4
Fe	Cu	Cu	97,9	97,7	Ni-Cr	Ni	69,9	64,3
		Fe	2,1	2,3		Cr	17,0	15,8
		–	–	–		Fe	5,9	5,8
		–	–	–		O	7,2	14,1

Таким образом, в работе получены образцы металлического напыления пленок из меди и нихрома методом ЭВП микросекундного диапазона, а также высокодисперсных частиц микронного масштаба.

Определены характерные размеры получаемых микрочастиц и проанализирован химический состав продуктов электрического взрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sedoi, V.S., Ivanov, Y.F. Nanotechnology / V.S. Sedoi, Y.F. Ivanov. – 2008. – Vol. 19. – A. no. 145. – P. 710.

2. Kotov, Y.A., Nanopart, J. Res / Kotov Y.A. – 2003. – Vol. 5. –P. 539.

3. Назаренко, О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение / Под ред. А.П. Ильина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 148 с.

4. Устройство для электровзрывного нанесения металлических покрытий на контактные поверхности: Пат. 115358 РФ, МПК С1 С23С4/12 С23С24/08 / Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Канцедалов Д.А.; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. Заявка: 2011146515/02, 16.11.2011; опубл. 27.04. 2012. Бюл. № 12.

5. Устройство для электровзрывного нанесения металлических покрытий на контактные поверхности: Пат. 115359 РФ, МПК С1 С23С4/12 С23С24/08 Суркаев А.Л., Кульков В.Г., Кумыш М.М., Усачев В.И.; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. Заявка: 2011146566/02, 16.11.2011 опубл. 27.04. 2012. Бюл. № 12.

6. Суркаев, А.Л. Исследование миллисекундного электрического взрыва металлических проводников / А.Л. Суркаев, М.М. Кумыш, В.И. Усачев // ПЖТФ. – 2011. – Т. 36, вып. 23. – С. 97-104.

7. Суркаев, А.Л. Элементы физики высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах / А.Л. Суркаев. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 157 с.

8. Волков, Н.Б. Механизмы генерации наноразмерных металлических частиц при электрическом взрыве проводников / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, В.С. Седой, Е.Л. Фенько, А.П. Яловец // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, вып. 4. – С. 77-80.

9. Суркаев, А.Л. Исследование возникновения МГД-возмущений в цилиндрическом проводнике при протекании импульса разрядного тока / А.Л. Суркаев // ПЖТФ. – 2014. – Т. 40, вып. 2. – С. 23-29.

УДК 539.67

ДЕМПФИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ГРАНИЦЫ ЗЕРЕН С ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРОЙ

П.П. Цирульников – магистрант
В.Г. Кульков – д-р физ.-мат. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Демпфирование вредных вибраций является актуальной задачей при проектировании и эксплуатации оборудования теплоэнергетики. В работе рассматривается механизм рассеяния энергии колебаний с участием границ зерен в металлах. Внутреннее трение возникает при взаимном смещении сопрягающихся зерен за счет проскальзывания вдоль плоского сегмента границы, ограниченного с двух сторон ступеньками противоположных знаков. Приведены результаты численного расчета величины внутреннего трения при различных соотношениях диффузионных и вязкостных свойств системы в зависимости от частоты колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Работа теплоэнергетического оборудования неизбежно связана с появлением вибрации и повышенного уровня шума в области инфразвуковых частот. Источниками его могут являться вращающиеся части машин, кавитационные явления в трубопроводах и котельных установках, турбулентный режим течения жидкостей, образование пузырьков пара при кипении и др. Избыточный уровень вибрации и шума отрицательно сказывается на ресурсе работы оборудования, вредно действует на здоровье персонала и представляет собой один из факторов, отрицательно воздействующих на экологическую обстановку. Вибрация может гаситься либо конструктивными методами (демпферы, пружины и т. д.), либо применением материалов с повышенным уровнем демпфирования. Количественной характеристикой способности материала рассеивать энергию колебаний является величина внутреннего трения.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Границы зерен в металлах и сплавах являются одним из основных элементов структуры. С их участием происходят процессы диссипации энергии колебаний. Мезоскопическая структура границ, как правило, отлична от плоской конфигурации, содержит различного рода отклонения в виде изломов, ступенек, изгибов и др. В работе исследуется величина внутреннего трения, обусловленного проскальзыванием по плоской границе зерен, содержащей ступеньки чередующихся противоположных знаков.

Рассматривается модель границы, фрагмент которой изображен на рис. 1. Он представляет собой цилиндрическую поверхность с направляющей ломаной, состоящей из прямолинейных параллельных отрезков длины $2l$, соединенных нормальными к ним ступеньками величины d.

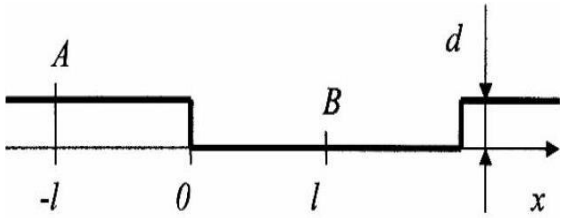


Рис. 1. Фрагмент границы со ступеньками противоположных знаков

К границе приложено переменное напряжение простого сдвига вдоль плоских участков амплитуды σ_0 и частоты ω. На ступеньках возникают переменные напряжения сжатия и растяжения, в результате чего появляется различие в химическом потенциале зернограничных вакансий [1]. В результате появляется диффузия вакансий между ступеньками. В такой постановке задача диффузии вакансий является одномерной.

Из решения диффузионной задачи [2] можно найти выражение для внутреннего трения:

$$Q^{-1} = \frac{2\theta Gl\cos(\varphi_2 - \varphi_1)\sqrt{F(2\gamma l)}}{R^2\eta\omega} \times$$

$$\times\left[(\sin(2\gamma l) + \lambda F(\gamma l))^2 + (\mathrm{sh}(2\gamma l) + \lambda F(\gamma l))^2\right]^{-0.5}, \quad (1)$$

$$\mathrm{tg}\varphi_1 = \frac{\sin 2l\gamma - \mathrm{sh}\,2l\gamma}{\sin 2l\gamma + \mathrm{sh}\,2l\gamma + 2\lambda F(\gamma l)},$$

$$\mathrm{tg}\varphi_2 = \frac{\sin 2l\gamma - \mathrm{sh}2l\gamma}{\sin 2l\gamma + \mathrm{sh}2l\gamma}, F(z) = \sin^2 z + \mathrm{sh}^2 z. \quad (2)$$

Выражение (1) описывает так называемый фон внутреннего трения. Его величина монотонно растет с температурой по экспоненциальному закону. Энергию активации процесса определяют, как правило, по наклону графика зависимости $\ln(Q^{-1}T)$ от обратной температуры.

Параметр $\lambda = \upsilon_s/\upsilon_d$ имеет смысл отношения скорости собственного проскальзывания по границе без ступенек и скорости неконсервативного процесса, реализуемого диффузией между ступеньками. Его можно представить в виде

$$\lambda = \beta x^{-1}\exp(\alpha(1 + x - 2\xi x)).$$

Здесь $\beta = d^2kT_0 / 4D_{b0}\delta\Omega^2 C_{0b}\eta_0$, $\xi = E_s/E_b$, $\alpha = E_b/2kT_0$, $x = T_0/T$, T_0 – температура, при которой диффузионная длина вакансий равна длине плоского сегмента.

Расчеты показывают, что при значениях $\beta << 1$ график зависимости внутреннего трения от обратной температуры имеет вид прямой линии. Это означает, что энергия активации процесса при всех значениях температуры постоянна. При $\beta >> 1$ график такой зависимости имеет два сопрягающихся прямолинейных участка, что свидетельствует о разной величине энергии активации релаксационного процесса. В области высоких температур энергия активации почти в два раза большая, чем в области низких температур.

Зависимость отношения величин энергии активации от величины β по логарифмической шкале представлена на рис. 2. По результатам расчета максимальные и минимальные значения этого отношения в зависимости от β и ξ составляет от 1.1 до 1.8.

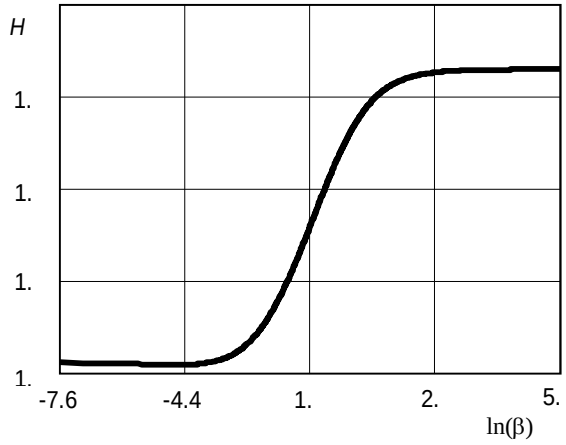


Рис. 2. Зависимость отношения энергии активации от β в логарифмическом масштабе

Подобное поведение фона внутреннего трения наблюдается и в других системах с неплоскими границами зерен, таких как фасетированные границы зерен [3, 4] или гранулированные нанокомпозиты [5]. Положение точки излома на графике может дать оценку размеров неоднородностей на границах, таких как обсуждаются в настоящей работе. Так, например, о протекании процесса фасетирования границ [7, 8] можно судить по появлению излома с температурой, соответствующей среднему размеру фасеток.

Описываемый вид зависимости внутреннего трения от обратной температуры аналогичен зависимости от логарифма частоты ω. Это можно понять из соображений оценочного характера [5, 8]. Поток вакансий J из сегмента определяется градиентом их концентрации, который пропорционален $J \sim D_bC/l_D \sim D_b\sigma_0/l_DT$, где D_b – коэффициент диффузии вакансий в границе, l_D – диффузионная длина вакансий, а C_{0b} – их концентрация на границе сегмента.

Тогда потери ΔW за период колебаний T_0 пропорциональны $\Delta W \sim J\sigma_0T_0 \sim DT_0\sigma_0^2/l_DT$, упругая энергия $W \sim \sigma_0^2$. Следовательно, $Q^{-1} \sim D_bT_0/l_DT$. При низких частотах или

высоких температурах диффузия успевает пройти на всем сегменте, поэтому за диффузионную длину можно принять его размер *l*, который от периода колебаний не зависит, тогда $Q^{-1} \cdot T \sim D_b T_0 \sim D_b/\omega$. В области высоких частот или низких температур основную роль в диффузионных процессах играют области вблизи границ сегмента протяженностью $l_D \sim \sqrt{2DT_0}$. В этом случае $Q^{-1} \cdot T \sim \sqrt{DT_0} \sim \sqrt{D/\omega}$.

Таким образом, по измерению фона внутреннего трения можно судить о соотношении предэкспоненциальных множителей вязкости границ, коэффициента граничной диффузии, температуры и размеров неоднородностей.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

θ – геометрический коэффициент;

G – модуль сдвига, Па;

R – усредненный размер зерна, м;

ω – частота колебаний, Гц;

$\eta = \eta_0 \exp(-E_s/kT)$ – вязкость границы, Па·с;

E_s – соответствующая энергия активации, Дж;

D_{b0} – предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии, м^2/с;

Ω – атомный объем, м^3;

C_{b0} – равновесная концентрация вакансий на границе;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

δ – ширина границы, м;

E_s и E_b – энергии активации проскальзывания по плоской границе и граничной самодиффузии, Дж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульков, В.Г. Межзеренное скольжение по границе с уступами / В.Г. Кульков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 8. – С. 84-87.

2. Кульков, В.Г. Релаксационные процессы на границах зерен в металлах. УДК 539.21 / В.Г. Кульков. – Волжский: Филиал «МЭИ» в г. Волжском, 2015. – 162 с.

3. Кульков, В.Г. Спектр внутреннего трения в поликристаллических материалах с фасетированными границами / В.Г. Кульков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т. 2, № 1. С. – 70-72.

4. Кульков, В.Г. Внутреннее трение на межзеренных границах с одномерной фасетированной структурой / В.Г. Кульков // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – Т. 48, № 11. – С. 39-43.

5. Дешевых, В.В. Высокотемпературный фон внутреннего трения в нанокомпозиционном материале / В.В. Дешевых, В.Г. Кульков, Л.Н. Коротков Д.П. Тарасов // Композиты и наноструктуры. – 2012. – № 2. – С. 24-34.

6. Кульков, В.Г. Кинетика фасетирования несоразмерной межкристаллитной границы наклона / В.Г. Кульков // Неорганические материалы. – 2005. – Т. 41, № 7. – С. 892-896.

7. Кульков, В.Г. Кинетика двумерного фасетирования межкристаллитных границ / В.Г. Кульков // Неорганические материалы. – 2005. – Т. 41, № 11. – С. 1405-1408.

8. Калинин, Ю.Е., Даринский, Б.М. Высокотемпературный фон внутреннего трения в твердых телах / Ю.Е. Калинин, Б.М. Даринский // Научно-технический журнал МиТОМ. ISSN 0026-0819. – 2012. – № 5. – С. 15-18.

УДК 62-5
ББК 39.9

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РАБОТЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

С.С. Желясков, Е.М. Скопова, О.И. Желяскова – магистранты
Е.Г. Зенина – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрен анализ применения частотно-регулируемого привода (ЧРП) в работе кранов электростанций. Проанализированы основные элементы электродвигателя данного вида. На основе проведенного анализа авторами предлагается применение ЧРП для грузоподъемных механизмов в связи с положительным экономическим эффектом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, эффективность, электростанция, частотно-регулируемый электропривод, грузоподъемный механизм.

При строительстве электростанции и ее эксплуатации для монтажа и ремонта оборудования повсеместно используются грузоподъемные машины и механизмы, такие как краны, перегружатели, транспортеры и др. При проектировании здания заранее должны быть внесены и учтены подъемно-транспортные средства, участвующие в строительстве, а также технологическом процессе электростанции, ведь они также оказывают влияние на саму конструкцию здания.

Энергетическое оборудование – это дорогостоящий, ответственный и требовательный к бережному отношению комплекс узлов, механизмов и коммуникаций, поэтому его монтаж и обслуживание должны осуществляться высококвалифицированными специалистами с использованием современного оборудования. К процессу монтажа и установки энергооборудования предъявляются высокие требования к точности позиционирования, плавности хода и минимизации ступенчатого перемещения исполнительных органов, а также к энергетической эффективности и экономии энергоресурсов. Как правило, в качестве приводного двигателя используются асинхронные электродвигатели различной мощности, зависящей от массы груза, показатели могут варьироваться от 20 до 150 и более тонн.

Для регулирования диапазона скоростей и точности позиционирования груза кранов используют несколько способов регулирования мощности двигателя:

– переключение ступеней сопротивления, включенными в цепь ротора асинхронных двигателей с фазным ротором;

– реостатное регулирование, связанное с повышением энергопотребления при снижении частоты вращения двигателя;

– использование релейно-контакторной аппаратуры для регулирования частоты вращения двигателя;

– частотное регулирование с использованием преобразователя частоты (инвертора).

Переключение ступеней сопротивлений в роторе является устаревшим способом управления, не обеспечивает удовлетворительных регулировочных характеристик и плавности управления крановыми механизмами, что приводит к интенсивному износу механического оборудования. Реостатное регулирование имеет низкий КПД и его применение нецелесообразно из-за низкой эффективности. Использование релейно-контакторной аппаратуры для регулирования частоты вращения двигателей приводит к интенсивному износу электрооборудования при повторно-кратковременном режиме работы.

Принцип частотного регулирования, при котором частота и напряжение питания двигателя могут изменяться в соответствии с установленным соотношением независимо друг от друга, является наиболее эффективным способом управления скоростью асинхронных двигателей. Этот способ регулирования на данном этапе развития получил самое широкое применение для электроприводов различного назначения, как низковольтных с напряжением до 400 В, так и высоковольтных большой мощности напряжением 6,0 и 10,0 кВ. Реализация такого способа определяется тем, что скорость вращающегося магнитного поля статора w_0 согласно выражению (1) пропорциональна частоте источника питания f.

$$w_0 = \frac{2pf}{p}, \qquad (1)$$

где p – число пар полюсов.

Следовательно, изменяя частоту f, можно плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения ротора. При этом скольжение s, определяемое по формуле (2), изменяется незначительно, и, следовательно, потери, пропорциональные величине скольжения, также изменяются незначительно.

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_d}{\omega_0}, \qquad (2)$$

где ω_0 – синхронная скорость электродвигателя; ω_d – скорость вращения ротора электродвигателя.

Если должна сохраняться постоянной перегрузочная способность двигателя, то в первом приближении частотный закон управления имеет вид (3). Здесь отражен принцип регулирования скорости двигателя посредством изменения частоты подводимого напряжения и амплитуды напряжения.

$$\frac{U}{U_с} = \frac{f}{f_с}\sqrt{\frac{M_д}{M_{д.ном}}}, \qquad (3)$$

где U и $U_с$ – напряжение на выходе частотного преобразователя и номинальное напряжение; f и $f_с$ – частота сети на выходе частотного преобразователя и номинальная частота; $M_д$ – момент асинхронного двигателя текущий; $M_{д.ном}$ – момент асинхронного двигателя номинальный.

Это важное преимущество частотного управления асинхронным двигателем позволяет повысить уровень энергосбережения не только для двигателей с фазным ротором, но и с короткозамкнутым.

Частотно-регулируемый электропривод современен и более предпочтителен как способ регулирования производительностью грузоподъемных механизмов и машин. Его особенностями являются:

– плавное бесступенчатое регулирование скорости механизмов во всем диапазоне скоростей;

– контролируемый плавный разгон и торможение двигателей, что приводит к существенному повышению надежности механического и электрооборудования, увеличению срока его службы, повышению комфортности управления;

– высокое качество регулирования скорости горизонтального и вертикального перемещений при использовании современных алгоритмов векторного управления;

– повышение коэффициента мощности, так как современные преобразователи частоты практически не потребляют реактивной энергии;

– экономия электроэнергии, связанная с переходом на энергетически эффективное управление и отказом от параметрического управления, а также с уменьшением потерь энергии в пусковых режимах;

– бесконтактное управление исполнительными механизмами, обеспечивающее повышение надежности электрооборудования;

– широкие возможности программной настройки параметров работы механизмов, контроля работы, диагностики неисправностей.

Основное достоинство частотного управления заключается в сохранении неизменным коэффициента мощности и абсолютного скольжения электропривода, при том что его КПД не зависит от скорости.

Частотное управление производительностью электродвигателя достигается двумя схемами. В первом варианте используются классические двухзвенные преобразователи

частоты, имеющие в составе нерегулируемый входной диодный выпрямитель и транзисторный инвертор. Для гашения энергии в тормозных режимах применяются дополнительные тормозные модули и резисторы. Такое решение является неэкономичным и увеличивает габариты системы, так как каждый из преобразователей требует наличия тормозного модуля, сетевого дросселя, контактора и автоматического выключателя. Мощности преобразователей выбраны таким образом, чтобы обеспечить перегрузку двигателей по току. Во втором варианте для регулирования скорости вращения двигателей используются преобразователи частоты, включающие в себя выпрямители с возможностью рекуперации электроэнергии в сеть, общее звено постоянного тока и индивидуальные инверторы для питания каждого двигателя.

Основным преимуществом такой структуры является возможность возврата энергии в питающую сеть в тормозных режимах.

Наиболее распространенным типом преобразователей частоты (ПЧ) являются двухступенчатые ПЧ, выполненные на основе автономного инвертора напряжения (АИН) и выпрямителя трехфазного переменного напряжения сети, выполняющего преобразование выпрямленного напряжения в переменное трехфазное с регулируемой частотой и амплитудой.

Регулирование величины выходного напряжения может осуществляться методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этом случае соотношение ширины импульсов противоположной полярности на протяжении каждой полуволны выходного напряжения изменяется таким образом, чтобы среднее значение каждой пары импульсов за период их частоты следования (частоты ШИМ) равнялось мгновенному значению основной гармоники выходного напряжения в середине интервала усреднения. График выходного однофазного напряжения АИН для двуполярной ШИМ показана на рис. 1.

Частота высших гармоник выходного напряжения определяется частотой ШИМ. При использовании в АИН современных транзисторов типа IGBT частота может быть повышена до величины более 4кГц без явного уменьшения КПД ПЧ. Поэтому, несмотря на высокий уровень амплитуды высших гармонических составляющих напряжения инвертора, токи активно-индуктивной нагрузки (асинхронного двигателя) практически синусоидальны.

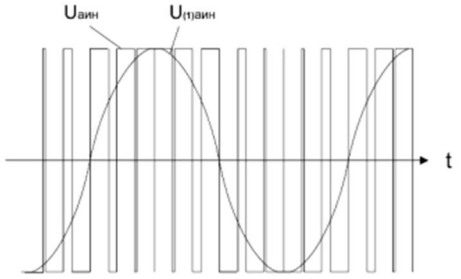


Рис.1. Форма выходного напряжения однофазного АИН с ШИМ

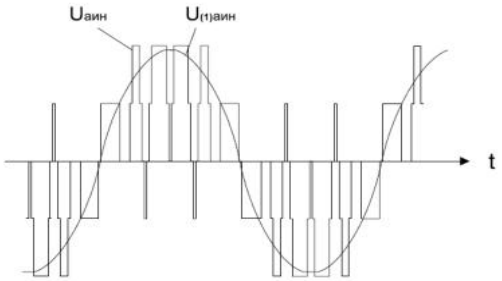


Рис. 2. Форма выходного напряжения одной фазы трехфазного АИН с ШИМ

Тормозной режим частотно-регулируемого электропривода может быть осуществлен по принципу динамического торможения при питании обмоток статора двигателя постоянным током от АИН. В случаях малой эффективности такого торможения может быть использован принцип генераторного торможения с передачей активной мощности через автономный инвертор в цепь постоянного тока ПЧ. Поскольку передача энергии в сеть через нерегулируемый выпрямитель невозможна, для предотвращения чрезмерного повышения напряжения на емкости фильтра постоянного тока ее разряжают с помощью транзисторного импульсного регулятора на тормозной резистор.

Таким образом, анализ работы частотно-регулируемого электропривода показал, что оптимальную по энергетическим показателям, регулировочным и механическим

характеристикам структуру современной системы привода следует выполнять на основе ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (рис. 3). ПЧ состоит из выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром постоянного напряжения и автономного инвертора напряжения, построенного на силовых транзисторах типа IGBT, и формирует основную гармонику выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции. Регулируемый электропривод, представленный на рис. 3, обладает целым рядом достоинств: широким диапазоном регулирования (D = 30...100 и более); высоким КПД (без учета двигателя он достигает величины 0,98); высоким коэффициентом мощности (до 0,98); высокой надежностью и компактностью преобразователя и др.

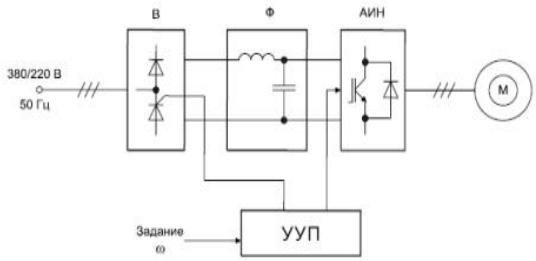


Рис. 3. Частотно-регулируемый электропривод:
В – выпрямитель; Ф – фильтр; АИН – автономный инвертор напряжения; УУП – устройство управления преобразователем частоты

Эффект от модернизации электропривода кранов электростанций решит многие проблемы, а именно:

– уменьшение пусковых токов и ударных нагрузок за счет осуществления плавного пуска/останова двигателя, что увеличит сроки эксплуатации механических узлов (редукторов, валов, шестерней, муфт и т. д.) а также самой металлоконструкции;

– уменьшение потребления электроэнергии привода за счет исключения шкафов сопротивлений при регулировании скорости и повышения коэффициента мощности (cos φ – 0,98÷1) приводов механизмовж

– увеличение точности и уменьшение времени позиционирования, тем самым увеличение производительности.

Положительный экономический эффект оказывает применение программируемых логических контроллеров (ПЛК) и систем дистанционного управления грузоподъемными механизмами. Замена релейных схем управления на ПЛК значительно уменьшает массогабаритные показатели, а также увеличивает надежность и время безотказной работы. Применение дистанционного управления позволяет исключить вредное воздействие производственных факторов на человека и снизить вероятность получения травм и других негативных последствий вследствие ЧП на производственном участке.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЧРП – частотно-регулируемый привод;

ПЧ – преобразователь частоты;

АИН – автономный инвертор напряжения;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин, А.С. Монтажные краны электростанций / А.С. Прошин. – М.: Машиностроение, 1973. – 243 с.

2. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Academa, 2004. – 241 с.

3. https://krankomplekt.com/uslugi/chastotnyj_privod/

УДК 697.34

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОЙ И ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ВОЛГОГРАДСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ ТЭЦ

С.С. Желясков, О.И. Желяскова – магистранты
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрены проблемы надежности и эффективности работы Волгоградской энергосистемы в случае аварийного отключения генераторов ТЭЦ. Проанализированы основные элементы генерации энергосистемы и их работа. Выявлена и обоснована необходимость развития и реконструкции участков энергосистемы. На основе проведенного исследования автором предлагается устранение «узкого места» за счет установки новых трансформаторов большей мощности, а также строительства дополнительной линии 220 кВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, эффективность, энергосистема, линия, автотрансформатор, станция, подстанция, мощность, перегруз оборудования.

Гарантией экономического развития регионов России являются надежность и эффективность работы энергетической отрасли. Одним из важнейших условий работы энергосистемы является соблюдение баланса мощности [1].

Надежность энергетической системы является комплексным свойством и определяется как способность энергосистемы выполнять функции по производству, передаче, распределению и снабжению потребителей электрической энергией в требуемом количестве и нормированного качества путем взаимодействия генерирующих установок, электрических сетей и электроустановок потребителей, в том числе [2]:

1) удовлетворять в любой момент времени общий спрос на электроэнергию;

2) противостоять возмущениям, вызванным отказами элементов энергосистемы;

3) восстанавливать свои функции после их нарушения.

Волгоградская область является важным звеном в осуществлении транзита электрической энергии (в среднем 300 МВт) с Центра на Юг России. В состав энергосистемы входят Волжская ГЭС, Волжская ТЭЦ, Волжская ТЭЦ-2, Волгоградская ТЭЦ-2, Волгоградская ТЭЦ-3, Камышинская ТЭЦ и Михайловская ТЭЦ. Суммарная генерирующая мощность в среднем составляет 2500 МВт, что является достаточным для обеспечения электроэнергией потребителей, а также транзита в соседние области. Транзит осуществляется через так называемые сечения [3].

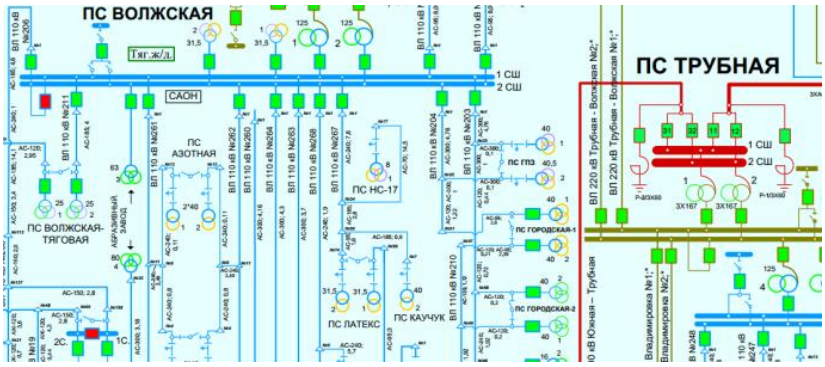


Рис. 1. Часть схемы Волгоградской энергосистемы

Волгоградская энергосистема, представленная на рис. 1, считается достаточно уязвимой, поскольку имеет мало внешних связей 500 и 220 кВ.

На базе тренажера Волгоградского РДУ ОИК АСДУ было проведено исследование. Задача исследования заключалась в проверке надежности и эффективности работы энергосистемы в случае аварийного отключения всех генераторов тепловых станций [4].

ОИК АСДУ представляет собой интегрированный комплекс специализированного системного, прикладного, библиотечного, инструментального и сервисного ПО, а также программных средств СУБД для создания диспетчерских информационно-управляющих систем реального времени.

Данный тренажер предназначен для решения оперативных задач, в частности для диспетчеров энергосистем. ОИК осуществляет прием телемеханики от предвключенных устройств – серверов ТМ и других внешних систем. Для прямого обмена данными между ОИК смежных уровней диспетчерского управления или смежными энергосистемами применяется механизм межмашинного обмена.

Обработка телемеханики производится по мере получения изменений значений ТМ, поступивших от программ приема. Обработанная порция телеметрической информации и рассчитанных параметров передается в базу данных реального времени (БД РВ). Одной из внешних задач является программа оценивания состояния по данным телеметрической информации. Предусмотрены два режима работы оценки состояния: циклический и интерактивный. Применяется универсальный и оперативный дорасчет.

Функция универсального дорасчета (УД) заключается в вычислении значений произвольных видов численной оперативной информации с целью сохранения результатов в базах данных ОИК. УД в качестве параметров может использовать любые типы оперативной информации, разрешённых к подстановке в формулы: суточная ведомость, планы, сводки, телеизмерения, телесигналы и др., а также константы. В универсальном дорасчете применимы все те же операции и специальные функции, что и в оперативном. Результатами вычислений могут быть значения любых числовых категорий ОИК.

Отличие универсального и оперативного дорасчета заключается в первую очередь в скорости проведения вычислений. Оперативный дорасчет запускается после обработки каждой порции телемеханической информации и пользуется в основном текущими значениями ТИ и ТС, хранящимися непосредственно в программе обработки ТМ. Универсальный дорасчет каждый раз обращается к БД РВ за всеми необходимыми для вычисления параметрами. Поэтому скорость расчета у таких дорасчетов заметно ниже, чем у оперативного.

Используется контроль перетоков в опасных сечениях. Для этого используют алгоритм сравнения текущего состояния оборудования в сечении с шаблонами, имеющимися в базе данных задачи. В качестве оборудования, входящего в сечение, могут браться линии электропередачи, трансформаторы и автотрансформаторы, комплексы и устройства противоаварийной автоматики. Состояние каждой единицы оборудования контролируется автоматически по данным телесигнализации либо задается диспетчером вручную.

В данном тренажере возможно смоделировать какую-либо неполадку и произвести оперативные переключения для предотвращения аварии. В основу тренажера взят один день, наиболее тяжелый по нагрузке, в котором будут производиться отключения генераторов на тепловых станциях.

В связи с тем, что Камышинская и Михайловская ТЭЦ по мощности выдают менее 100 МВт, будем считать, что они никоим образом при отключении не повлияют на энергосистему.

При отключении Волжской ТЭЦ (497 МВт) и Волжской ТЭЦ-2 (240 МВт) нагрузку на себя принимают частично Волжская ГЭС и ОЭС Центра. При этом линия 500 кВ Балаковская АЭС – Трубная не перегрузилась, поэтому надежность энергосистемы Волгоградской области сохранилась.

Волгоградские ТЭЦ-2 (300 МВт) и ТЭЦ-3 (236 МВт) на сегодняшний день выдают ос-

новную мощность для завода АО Каустик. Но в энергосистему они также выдают некоторое количество мощности. В случае отключения Волгоградских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 Волгоградская энергосистема теоретически могла бы восполнить недостающую мощность также за счет поднятия мощности Волжской ГЭС и большего перетока из ОЭС Центра. Но в этом случае происходит сильнейший перегруз линии 220 кВ Гумрак – Красноармейская с отпайкой на Волгоградскую ТЭЦ-3 – 490 МВт , а также перегруз автотрансформаторов: АТ-1 на ПС Красноармейская – 804 МВт и АТ-1 Волгоградская ТЭЦ-3 – 633 МВт, представленные на рис. 2.

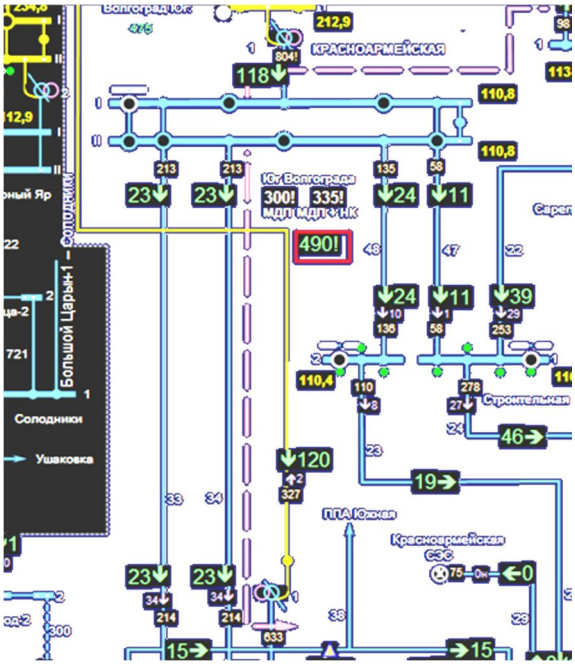


Рис. 2. Участок мнемосхемы:
перегрузка сечения и линии 220 кВ.

Поскольку вся энергосистема взаимосвязана между собой, было выявлено, что в связи с отключением Волгоградской ТЭЦ-3 происходит перегруз сечения Юг Волгограда – 300-335 МВт, что не позволяет поставить необходимую мощность на Черноморское побережье. В данном случае нарушаются надежность и эффективность работы Волгоградской энергосистемы. Перегруз линий и автотрансформаторов приводит к быстрому старению оборудования и раннему ремонту, а затем и замене.

После данного исследования на базе тренажера было выявлено одно из «узких мест» Волгоградской энергосистемы, влияющее на надежность и эффективность работы энергосистемы.

Предлагаемое решение проблемы заключается в замене автотрансформаторов мощностью 200 МВт на большие мощности, предположим по два АТ 500 МВт, а также строительство второй линии 220 кВ Гумрак – Красноармейская с отпайкой на Волгоградскую ТЭЦ-3.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГЭС – гидроэлектростанция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ПС – подстанция;

ОИК АСДУ – оперативно-информационный комплекс автоматизированной системы диспетчерского управления;

ТМ – телеметрия;

БД РВ – база данных реального времени;

ТИ – техническая информация;

ТС – техническая система;

ПО – программное обеспечение;

СУБД – системы управления базами данных;

ОЭС – объединенная энергосистема;

АТ – автотрансформатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрин. Б.И. Электроснабжение/ Б.И. Кудрин. – М: Академия, 2013.

2. Об утверждении СиПР Волгоградской области на 2016 – 2020 годы: Постановление губернатора Волгоградской области от 13.06.2016 года № 475 – 2016.

3. Об утверждении СиПР Волгоградской области на 2017 – 2021 годы: Постановление губернатора Волгоградской области от 28.04.2017 года № 248 – 2017.

4. ГОСТ Р 55890 – 2013. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. – М.: Стандартинформ, 2014.

5. http://khartep.com/ru/article/view/id/14

УДК 539.67

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФОН ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

В.Г. Кульков – д-р физ.-мат. наук, профессор
В.В. Кулькова – канд. физ.-мат. наук
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Рассматривается процесс рассеивания упругой энергии колебаний в наноструктурном и нанокомпозиционном материале с модельной формой зерна или включения. На основе решения уравнения диффузии зернограничных вакансий были получены температуроно-частотные зависимости внутреннего трения для этих материалов. Эффективная энергия активации изменяется с температурой почти в два раза.

ВВЕДЕНИЕ

При повышении доли зернограничной фазы в структуре материала ее воздействие на механические свойства последнего становится все более значительными. Особенно это характерно для наноструктурных материалов, линейные размеры зерен которых не превышают 100 нм [1, 2]. Как известно, для таких структур характерны повышенная прочность, твердость, высокие значения коэффициентов зернограничной диффузии, низкая теплопроводность и т. д. Не меньшее влияние процессы в приграничной зоне оказывают и на свойства композиционных материалов, использующих в качестве армирующих элементов наноразмерный наполнитель. Здесь грамотно подобранное сочетание матрицы и наполнителя позволяют получить системы, характеристики которых не имеют аналогов среди других материалов.

В обоих случаях очевидно, что специфика внутренней структуры материала оказывает значительное влияние на механические свойства и требует детального изучения протекающих процессов. Весьма информативным для исследования микроструктуры оказывается исследование механизмов диссипации энергии внешних колебаний системы методом внутреннего трения.

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В двумерной модели представим наноструктурный материал как совокупность зерен, сечение которых является квадратом с длиной ребра L и располагается под углом $\pi/4$ к действующим переменным внешним сдвиговым напряжениям $\sigma = \sigma_0 \exp(i(\omega t - \varphi))$, где σ_0 – амплитуда. При этом грани зерна попеременно становятся источниками и стоками вакансий. Подобная динамика вакансий наиболее адекватно описывается наличием в сегменте периодически действующего источника $A\exp(i\omega t)$, фаза которого не совпадает с напряжением. В рамках модели примем допущения об отсутствии деформации зерна в приграничной области и постоянстве диффузионной толщины границы.

Сегмент границы располагается в плоскости xy таким образом, что ось x совпадает с гранью зерна, а y направлена нормально к ней (рис. 1).

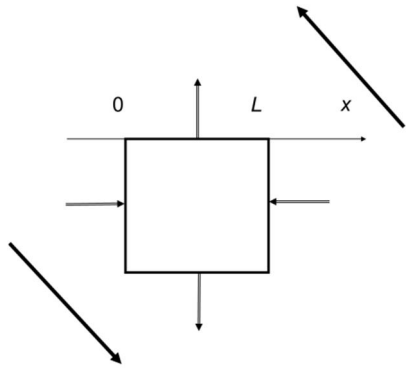


Рис. 1. Взаимное расположение элементарного сегмента границы и действующего внешнего напряжения. Полужирные стрелки указывают ориентацию сдвиговых напряжений, двойные стрелки – нормальные напряжения в главных осях

Неоднородное уравнение диффузии избыточных вакансий на сегменте имеет вид:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} + A\exp(i\omega t), \quad (1)$$

где $c(x, t)$ – концентрация вакансий; D – коэффициент зернограничной диффузии вакансий.

Задача имеет одномерный характер. Решая уравнение (1) методом Фурье [3] с граничными условиями $c(0,t) = c(L,t) = 0$, получаем

$$c(x,t) = \exp(i\omega t)\sum_m \frac{4AL^2\exp(-i\varphi_m)\sin\frac{\pi m x}{L}}{\pi^3 Dm\sqrt{m^4+Z^2}}. \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$Z = \frac{\omega L^2}{\pi^2 D},\ \mathrm{tg}\varphi_m = \frac{\omega L^2}{D\pi^2 m^2},\ m = 1, 3, 5,...$$

Решение для соседних сегментов при указанной ориентации зерна отличаются только знаком.

Зависимость растягивающего напряжения σ_n на границе от избыточной концентрации вакансий имеет линейный характер [4] и при невысоких напряжениях может быть представлена выражением $\sigma_n = ckT/c_0\Omega$, где Ω – атомный объём, c_0 – равновесная концентрация вакансий на границе. С учетом (1) зависимость σ_n от времени и координаты можно записать:

$$\sigma_n(x,t) = \exp(i\omega t)\frac{4AL^2kT}{\pi^3 Dc_0\Omega}\times \times\sum_m \frac{\exp(-i\varphi_m)\sin\frac{\pi m x}{L}}{m\sqrt{m^4+Z^2}}. \quad (3)$$

Деформация материала обусловлена нормальной скоростью его движения к границе вследствие стока или истока вакансий $v = \frac{j\delta\Omega}{L\sin\alpha}$. Потока вакансий j через границу может быть определен выражением

$$j = D\left(\frac{\partial c(0,t)}{\partial x} - \frac{\partial c(L,t)}{\partial x}\right) = -D\int_0^L \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2}dx, \quad (4)$$

где δ – диффузионная толщина границы. Воспользовавшись (2) и (4), получим выражение для скорости:

$$v = \frac{A\delta\Omega}{\sin\alpha}\exp(i\omega t) - -\frac{i\omega\sigma_0 c_0\delta\Omega^2\cos\alpha}{kT}\exp(i\omega t - \varphi), \quad (5)$$

где $\alpha = \pi/4$ – угол ориентации сегмента относительно внешнего напряжения. Энергия, рассеянная за один период на сегменте длины y вдоль соответствующей оси, определяется выражением

$$\Delta W_1 = y\int_0^L\int_0^{2\pi/\omega}\mathrm{Re}(\sigma(x,t))\mathrm{Re}(v(t))dxdt, \quad (6)$$

где Re – действительная часть комплексной величины.

Величину A найдем [5, 6] из равенства модулей полной силы, действующей со стороны внешнего напряжения на сегмент и силы, определяемой из выражения (3):

$$|\sigma_0 L\sin 2\alpha\exp(i(\omega t - \varphi))| = \left|\int_0^L \sigma_n(x,t)dx\right|, \quad (7)$$

что дает

$$A = \frac{\pi^2\sigma_0 c_0\Omega\omega\sin 2\alpha}{8kT}\times \times\left(\left(\sum_m \frac{Z}{m^4+Z^2}\right)^2 + \left(\sum_m \frac{Z^2}{m^2(m^4+Z^2)}\right)^2\right)^{-1/2}. \quad (8)$$

Используя разложение первого слагаемого в (5) по синусу $\sum_m \frac{4A\delta\Omega}{\pi m\sin\alpha}\sin\frac{\pi m x}{L}\exp(i\omega t)$ и проинтегрировав (6) с учётом (3), найдем выражение для рассеянной энергии за цикл:

$$\Delta W_1 = \frac{\pi^3\sigma_0{}^2\Omega^2 c_0\delta L y\cos\alpha}{4kT}\left(\frac{1}{Z}\sum_m \frac{1}{m^4+Z^2}\right)\times \times\left(\left(\sum_m \frac{1}{m^4+Z^2}\right)^2 + \left(\sum_m \frac{Z}{m^2(m^4+Z^2)}\right)^2\right)^{-1}. \quad (9)$$

Упругая энергия, запасённая в объёме V_0 зерна, равна $W = \frac{V_0\sigma_0{}^2}{2\mu}$, где μ – модуль сдвига. Внутренне трение, обусловленное вкладом одного сегмента длиной y, равно $Q_1^{-1} = \frac{\Delta W_1}{2\pi W}$ [7]. Для зерна со средним раз-

мером R приходящаяся на него площадь границы будет пропорциональна R^2, а его объем – R^3. Таким образом, полную величину внутреннего трения можно определить суммированием по всем сегментам данной границы:

$$Q^{-1} = \frac{\pi^2 \eta \mu c_0 \delta \Omega^2}{4kTR} \times \left(\frac{1}{Z} \sum_m \frac{1}{m^4 + Z^2} \right) \times$$
$$\times \left(\left(\sum_m \frac{1}{m^4 + Z^2} \right)^2 + \left(\sum_m \frac{Z}{m^2 \left(m^4 + Z^2 \right)} \right)^2 \right)^{-1}, \quad (10)$$

где η – геометрический множитель, учитывающий долю принадлежности границы зерну и его реальную форму.

На рис. 2 приведена зависимость нормального напряжения на сегменте от фазы колебания ωt. Очевидно, что в этом случае напряжение отстает от фазы колебаний, что объясняется так называемым эффектом подстройки напряжений [8, 9]. Появление этого эффекта связано с недостаточной скоростью стока образовавшихся в первой фазе колебаний вакансий, вследствие чего в центре рассматриваемого участка границы создается их избыток. Полное количество вакансий во всём сегменте определяется его размером и величиной внешнего напряжения. Насыщение границы дефектами приводит к росту локальных растягивающих напряжений в ней. С ростом частоты внешних колебаний системы все меньшее количество вакансий «успевает» диффундировать к стокам, а следовательно, размер нерелаксированых участков границы стремится к размеру самого сегмента.

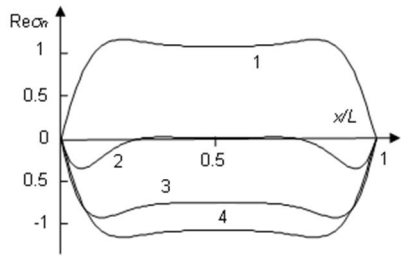


Рис. 2. Распределение растягивающего напряжения $\mathrm{Re}\sigma_n$ на сегменте в единицах σ_0. Фаза колебаний: 1) $\omega t = \pi/2$; 2) $\omega t = \pi$; 3) $\omega t = 5\pi/4$; 4) $\omega t = 3\pi/2$

Описанную модель можно распространить и на объемные системы с двумерной задачей диффузии на сегменте. Это, например, композиционные материалы, линейные размеры армирующих включений которых не превышают 100 нм. Структуру такого материала представим в виде сплошной матрицы, армированной протяженными призматическими волокнами. Примем форму поперечного сечения включений квадратной со стороной L. Координатные оси Ox и Oy расположены вдоль сторон квадрата. На систему действует вышеописанное внешнее переменное напряжение с нормальными компонентами. Решение диффузионного уравнения двумерной задачи [10, 11] дает выражение для неравновесной концентрации вакансий:

$$c(x,y,t) = \frac{16AL^2}{\pi^4 D} \exp(i\omega t) \times$$
$$\times \sum_{m,l} \frac{\exp(-i\varphi_{ml}) \sin \frac{\pi m x}{L} \sin \frac{\pi l y}{L}}{ml \left(\left(m^2 + l^2 \right)^2 + Z^2 \right)^{1/2}}, \quad (11)$$

$$Z = \frac{\omega L^2}{\pi^2 D}, \quad \mathrm{tg}\ \varphi_{ml} = \frac{\omega L^2}{D\pi^2 \left(m^2 + l^2 \right)}, \quad m, l = 1, 3, 5, ...$$

В случае двумерной задачи в выражении для потока вакансий необходимо учесть вклад двух взаимно перпендикулярных участков границы:

$$J = D\delta \left[\int_0^L \left(\partial c(x,0,t)/\partial y - \partial c(x,L,t)/\partial y \right) dx + \right.$$
$$\left. + \int_0^L \left(\partial c(0,y,t)/\partial x - \partial c(L,y,t)/\partial x \right) dy \right]. \quad (12)$$

Проведя интегрирование, получим скорость смещения границы:

$$\upsilon_n(t) = 2\Omega\delta A \exp(i\omega t) - i \frac{2\omega\Omega\delta}{L^2} \int_S c(x,y,t) dS, \quad (13)$$

Здесь S – площадь сегмента.

Воспользовавшись приведенными выше рассуждениями для однородного материала, получим выражения для функции источника вакансий A:

$$A = \frac{\beta \pi^6 D \sigma_0 c_0 \Omega}{64 L^2 kT} \Sigma_0^{-1/2}, \quad (14)$$

$$\Sigma_0 = \left(\sum_{m,l} \frac{m^2 + l^2}{m^2 l^2 \left(\left(m^2 + l^2 \right)^2 + Z^2 \right)} \right)^2 + \left(\sum_{m,l} \frac{Z}{m^2 l^2 \left(\left(m^2 + l^2 \right)^2 + Z^2 \right)} \right)^2 .$$

Фон внутреннего трения имеет вид:

$$Q_0^{-1} = \frac{\pi^4 \eta \beta^2 c_0 \Omega^2 \delta G}{32 kTL} F(Z), \quad F(Z) = \frac{1}{Z \Sigma_0} \sum_{m,l} \frac{m^2 + l^2}{m^2 l^2 \left(\left(m^2 + l^2 \right)^2 + Z^2 \right)}. \quad (15)$$

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вакансионные дефекты в реальном материале делятся на два типа в зависимости от причин их возникновения. Первые – геометрические. Они появляются вследствие плохого сопряжения границ общего типа и составляют 2-3 % от объема материала. Второй тип вакансий – тепловые, которые образуются по мере повышения температуры. Однако концентрация последних остается пренебрежительно малой по сравнению с геометрическими вакансиями вплоть до температур, близких к температурам плавления. Это означает, что концентрация c_0 вакансионноподобных дефектов остается постоянной. Тогда согласно (10) и (15) зависимость произведения $\ln\left(Q^{-1} \cdot T\right)$ от $\ln Z$ с точностью до постоянного слагаемого совпадает с зависимостью $\ln F(Z)$ от $\ln Z$ (рис. 3).

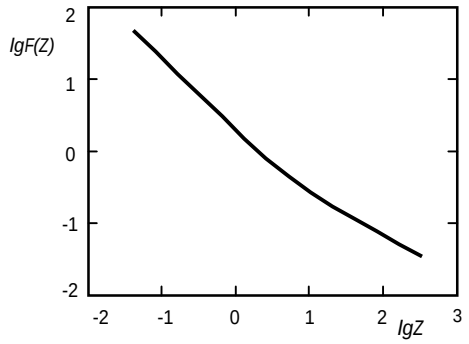


Рис. 3. График частотной зависимости $\ln F(Z)$ от $\ln Z$

Как видно из рисунка, график имеет два прямолинейных участка с различными тангенсами углов наклона. С учетом выражения $Z = \frac{\omega L^2}{\pi^2 D}$ получаем, что подобный вид имеют графики зависимости $\ln\left(Q^{-1} \cdot T\right)$ от логарифма частоты или обратной температуры. В последнем случае тангенсы углов наклона прямолинейных участков определяются энергиями активации ведущего механизма внутреннего трения. На участке, соответствующем низким частотам и температурам, тангенс приблизительно равен –1, что указывает на прямо пропорциональную зависимость $Q^{-1} \sim \omega^{-1}$. В область высоких частот и температур тангенс наклона графика становится равен –1/2, что соответствует $Q^{-1} \sim \omega^{-1/2}$. Такой вид зависимости можно объяснить диффузионной длиной пробега вакансий за одно колебание. Поток вакансий j из сегмента определяется градиентом их концентрации, который пропорционален σ_0 / l, где l – диффузионная длина вакансий. Тогда потери ΔW за период T_0 по величине пропорциональны $\Delta W \sim j \sigma_0 T_0 \sim \sigma_0^2 T_0 / l$, следовательно, $Q^{-1} \sim T_0 / l$. На низких частотах в процесс диффузии вовлечены все вакансии границы и диффузионная длина равна длине сегмента L, который не зависит от частоты колебаний. В случае высоких частот диффузионная длина пробега вакансий оказывается пропорциональна квадратному корню температуры и располагается вблизи границ сегмента $l \sim \sqrt{2DT_0}$.

Выражения (10) и (15) описывают зернограничный вклад в высокотемпературный фон внутреннего трения. Как видно из графика, ему соответствуют две энергии активации на низкочастотном и высокочастотном диапазонах. Первая из них совпадает с энергией активации зернограничной самодиффузии, а вторая оказывается в два раза ниже.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Исследования фона внутреннего трения проводились на нанокомпозиционных материалах системы ферромагнетик-сегнетоэлектрик $CO_x(PZT)_{100-x}$, где x – концентрация атомов

Co, %. PZT – аббревиатура соединения $Pb_{0,81}Sr_{0,04}(Na_{0,5}Bi_{0,5})_{0,15}(Zr_{0,575}Ti_{0,425})O_3$).

Образцы представляли собой прямоугольные пластины из ситаллита размером 5×18×0,4 мм^3, на поверхность которых была напылена тонкая пленка нанокомпозита. Напыление проводилось методом ионно-лучевого распыления составной мишени. Для контроля образцов использовались сканирующий микроскоп JSM-6380 и электронно-зондовый рентгеновский микроанализатор. Полученная структура представлена на рис. 4, где видно, что она является гранулированной с размерами гранул d от ≈ 1,5 до 4,5 нм в зависимости от концентрации x.

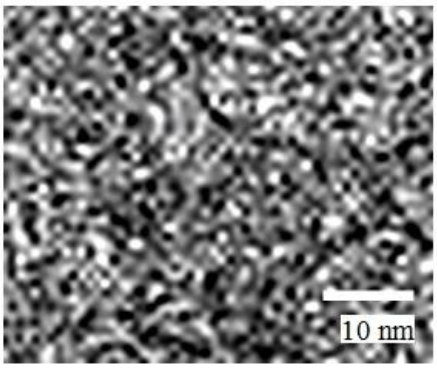


Рис. 4. Микроструктура образца $Co_x(PZT)_{100-x}$

Зависимость внутреннего трения Q^{-1} от температуры для различного состава образцов представлена на рис. 5. Очевидно, что на участке температур ниже 700 К Q^{-1} остается практически величиной постоянной, не зависящей от температуры. Однако в области высоких температур (> 700 К) наблюдается резкий рост диссипации энергии, который оказывается тем больше, чем больше металлической фазы присутствует в образце.

Видно, что зависимости $\ln(Q^{-1}T) = f\left(1/T\right)$ можно представить в виде двух прямых линий (рис. 6). Наилучшая аппроксимация экспериментальных данных проводится по формуле $Q^{-1} = (TB_{0i})^{-1}\exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$, $i = 1, 2$, где B_{0i} – параметр, E_{0i} – значения энергии активации высокотемпературного фона и достигается при следующих значениях энергии активации: $E_1 = 0{,}38 \pm 0{,}05$; $0{,}54 \pm 0{,}05$; $0{,}70 \pm 0{,}05$ эВ и $E_2 = 0{,}98 \pm 0{,}05$; $1{,}27 \pm 0{,}05$ и $1{,}53 \pm 0{,}05$ эВ в случае составов $Co_{32}(PZT)_{68}$, $Co_{54}(PZT)_{46}$ и $Co_{76}(PZT)_{24}$, соответственно.

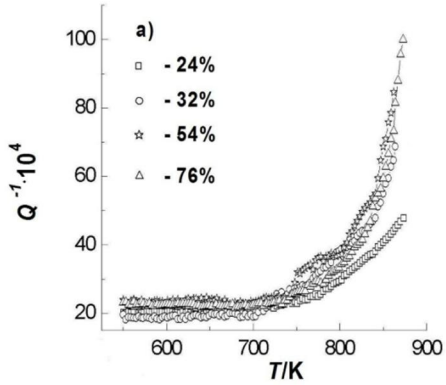


Рис. 5. Зависимость фона внутреннего трения Q^{-1} от температуры T для образцов с различной концентрацией металлической фазы

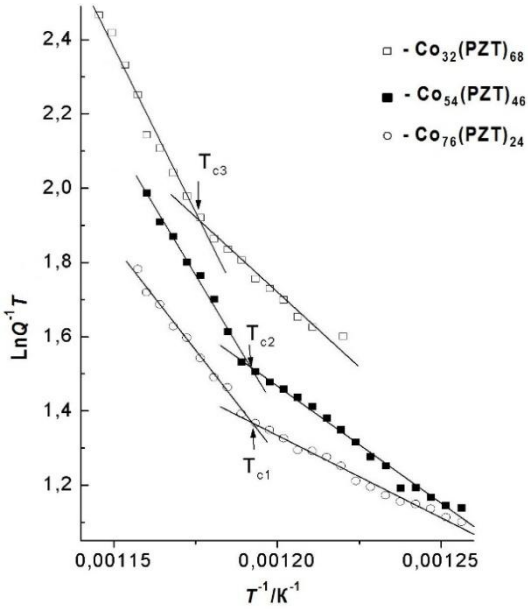


Рис. 6. Аппроксимация зависимости $\ln(Q^{-1}T) = f\left(1/T\right)$ для материалов с различным содержанием металлической фазы

Увеличение энергии активации в области высоких температур вдвое по сравнению с таковой для низких температур, которое отчетливо можно наблюдать на приведенном графике, можно связать с увеличением диффузионной длины вакансий l и переходом от условия $l < L$ к условию $l > L$, что уместно ожидать для наноразмерных систем и хорошо согласуется с теоретическими результатами модели. Подобная зависимость имеется в случае диссипации энергии путем зернограничного проскальзывания [12].

Кроме того, наблюдаемое в эксперименте смещение T_c в область более высоких температур с ростом содержания металлической фракции естественно связать с увеличением размеров L металлических гранул. Переход от одного участка к другому с разными наклонами не является резким, а происходит в некотором температурном интервале, ширина которого связана с разбросом в размерах образующихся гранул. Оценить эти размеры можно на основе рассуждений, приведенных в конце части 3, откуда имеем для среднего размера гранул выражение $l \sim \sqrt{2DT_c}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поведение наноразмерных систем относительно величины внутреннего трения имеет подобный характер. Это проявляется в зависимости его от обратной температуры. Эффективная энергия активации изменяется почти в два раза при низких и высоких температурах.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

σ_0 – внешнее напряжение, Н/м^2;

σ – нормальное напряжение на сегменте, Н/м^2;

α – угол между сегментом границы и растягивающим напряжением, °;

c, c_0 – текущая и избыточная по сравнению с равновесной граничные концентрации вакансий;

x, y – координаты;

t – время, с;

Ω – атомный объём;

m, n – элементы массива значений;

T – температура, К;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

L – длина сегмента, м;

l – диффузионная длина вакансий, м;

S – площадь сегмента границы, м^2;

A – амплитуда источников вакансий;

J – полный поток вакансий через границу, с$^{-1}$;

j – плотность потока вакансий через границу,м$^{-1}$·с$^{-1}$;

Re – действительная часть комплексной величины;

Q^{-1} – внутреннее трение;

W – максимальная упругая энергия в объеме, Дж;

ΔW – энергия, рассеянная за цикл колебаний на всем сегменте, Дж;

V – объем зерна, м^3;

ν, – абсолютная скорость деформации, м/с;

β, η – геометрические коэффициенты;

ω – частота колебаний, с$^{-1}$;

φ – сдвиг фаз, рад;

δ – толщина границы, м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулюков, Р.Р., Пшеничнюк, А.И. О сочетании высокой демпфирующей способности и высокой прочности в нанокристаллических материалах / Р.Р. Мулюков, А.И. Пшеничнюк // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 5. – С. 37-42.

2. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 416 с.

3. Кульков, В.Г. Внутреннее трение на межзеренных границах с одномерной фасетированной структурой / В.Г. Кульков // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – Т. 48, № 11. – С. 39-43.

4. Даринский, Б.М. Влияние межзёренного проскальзывания на концентрацию примеси в границе / Б.М. Даринский, В.Г. Кульков, И.М. Шаршаков // Известия АН. Сер. физическая. – 1993. – Т. 57, № 1. – С. 129-130.

5. Кульков, В.Г. Диффузионная модель внутреннего трения в нанокристаллическом материале / В.Г. Кульков // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, № 3. – С. 43-48.

6. Кульков, В.Г. Влияние динамического перераспределения примеси на зернограничное внутреннее трение в нанокристаллических материалах / В. Г. Кульков // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, № 8. – С. 32-37.

7. Новик, А., Берри, Б. Релаксационные явления в кристаллах / А. Новик, Б. Берри. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.

8. Кульков, В.Г. Внутреннее трение на фасетированных границах зерен с примесями / В.Г. Кульков // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – Т. 48, № 4. – С. 93-94.

9. Кульков, В.Г., Васильева, Ю.В. Зернограничное внутреннее трение на ступенчатых границах с микронесплошностями / В.Г. Кульков, Ю.В. Васильева // Перспективные материалы. – 2009. – № 7. – С. 171-175.

10. Дешевых, В.В. Высокотемпературный фон внутреннего трения в нанокомпозиционном материале / В.В. Дешевых, В.Г. Кульков, Л.Н. Коротков, Д.П. Тарасов // Композиты и наноструктуры. – 2012. – № 2. – С. 24-34.

11. Дешевых, В.В. Высокотемпературный фон внутреннего трения в нанокомпозиционном материале с одномерной армированной структурой / В.В. Дешевых, Л.Н. Коротков, В.Г. Кульков // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15, вып. 3. – С. 923-924.

УДК 544.723.212

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ СОРБЕНТОВ МАРКИ АПТ В СХЕМАХ ВОДОПОДГОТОВКИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

С.С. Савич – магистрант
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрен вариант удаления растворенного железа на стадии доосветления вод на механических фильтрах с помощью материала АПТ-1 Керамопро и его сравнение с аналогами.

В настоящее время практически на всех водоподготовительных установках (ВПУ) применяются традиционные технологические схемы, разработанные в 60-70-х годах прошлого века, включающие стадию предочистки воды в осветлителях со взвешенным слоем (разработанные ВТИ и ЦНИИ) и доосветление на механических фильтрах, загруженных зернистым материалом (гидроантрацит или кварцевый песок) и последующую стадию двухступенчатого умягчения (натрий-катионирования) или двух- или трёхступенчатого обессоливания (Н-ОН-ионирования). Естественно, эксплуатация существующих ВПУ, не соответствующих уровню техники XXI века, приводит к высоким эксплуатационным затратам по сравнению с зарубежными аналогами (расход химических реагентов, водопотребление, стоки, энергозатраты, ремонт оборудования и др.) [1].

Примеси вод, в том числе соединения железа, не удалённые на стадии предочистки, поступают на ионитную часть ВПУ и накапливаются на сильноосновных анионитах II и III ступени.

В связи с вышеизложенным представляет практический интерес оценка варианта удаления растворенного железа на стадии доосветления вод на механических фильтрах.

Обзор патентной и технической информации по фильтрующим материалам для очистки вод от железа и способам их получения показал, что в качестве основы используются зернистые материалы природного происхождения. Эти материалы обрабатываются реагентами для получения на их поверхности каталитически активного слоя, который состоит из оксидов марганца и железа. Получаемые оксидные соединения марганца и железа на поверхности зернистого материала вступают во взаимодействие с соединениями железа, растворенными в воде, с образованием нерастворимых соединений, которые осаждаются на поверхности зернистого материала.

Фильтрующие материалы этого типа эффективно удаляют железо и марганец из питьевой, поверхностной и подземной воды [2, 3].

На ВПУ ТЭС и промышленных предприятий в зависимости от содержания взвешенных и органических веществ для загрузки механических фильтров применяют антрацит, кварцевый песок или двухслойную загрузку кварцевым песком и антрацитом.

При децентрализованной подготовке воды питьевого качества, например при коттеджном строительстве, используются каталитические загрузки для обезжелезивания и удаления марганца из исходной воды как зарубежного, так и отечественного производства. Эти материалы также имеют природную основу и работают на водах с pH от 6 до 9 [2].

В последнее десятилетие на рынке фильтрующих материалов для механического фильтрования, наряду с различными марками антрацита, появилось несколько марок нового материала на угольной основе – Пуролат, а также инновационные разработки ЗАО «Академия перспективных технологий», Россия, марки АПТ, в том числе АПТ-1 и АПТ-1 Керамопро, предназначенных для удаления железа и взвешенных веществ из вод различного происхождения.

В экспериментальной части работы изучалась сорбция железа Fe^{3+} на фильтрующих материалах антрацит, Пуролат-стандарт

и АПТ-1 Керамопро в статическом и динамическом режимах.

АПТ-1 Керамопро более эффективно удаляет железо, к тому же обладает большей грязеемкостью, что позволяет ему дольше очищать воду без необходимости проводить отмывку, обладает меньшей насыпной плотностью, что при большей стоимости делает его примерно одинаковым в цене по сравнению с антрацитом и Пуролат-стандартом. Меньшая измельчаемость позволяет докупать соответственно меньше нового материала для ежегодной досыпки.

Данные, полученные при сорбции железа на фильтрующих материалах в динамическом режиме, представлены на рисунке. Как видно из рисунка, при загрузке колонок различными материалами проскок железа в фильтрат у антрацита начинается с момента запуска колонки в работу, а при загрузке Пуролат-стандарт и АПТ-1 Керамопро сначала железо полностью сорбируется из раствора, а затем начинается его проскок в фильтрат, причем более интенсивно в случае Пуролат-стандарт.

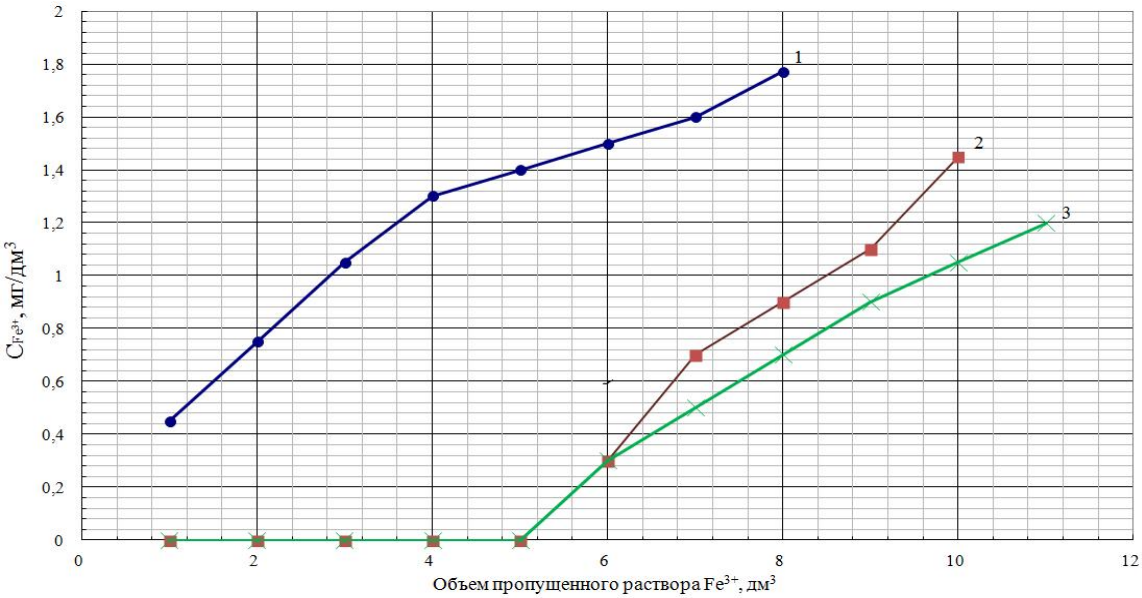


Рисунок. Зависимость содержания Fe^{3+} в фильтратах от объема пропущенного через колонку раствора $FeCl_3$ (C_{Fe3+}=1,75 мг/дм^3): 1 – антрацит; 2 – Пуролат-стандарт; 3 – АПТ-1 Керамопро

Выбор того или иного фильтрующего материала влияет на основные технико-экономи-ческие показатели:

1) удельный расход реагентов, кг/м^3. У варианта с засыпкой АПТ-1 Керамопро уменьшится за счет большей грязеемкости, то есть нет необходимости часто проводить отмывку, которая влечет за собой сопутствующие расходы;

2) затраты электроэнергии, воды и сжатого воздуха на собственные нужды. При проведении отмывки и регенерации необходимо использовать мощные насосы для подведения воды и реагентов, а также в процессе есть необходимость взрыхления материалов, на что используется сжатый воздух;

3) удельные затраты на ремонт оборудования тыс. руб./Мвт. Увеличивается время использования агрегатов для обеспечения собственных нужд химического цеха.

По полученным данным был выполнен расчет рабочей обменной емкости загрузок Пуролат-стандарт и АПТ-1 Керамопро (до проскока ионов железа в фильтрат) – $E_р$:

$$E_р = \frac{V_{р-ра}\, C_{р-ра}}{V_{загр}}, \qquad (1)$$

где $V_{р-ра}$ – объем пропущенного раствора $FeCl_3$, дм^3; $C_{р-ра}$ – концентрация раствора $FeCl_3$, мг/дм^3; $V_{загр}$ – объем загрузки, дм^3.

$$E_р = \frac{5 \cdot 1{,}75}{0{,}03} = 291{,}67 \text{ мг/дм}^3.$$

Таким образом, рабочая обменная емкость загрузок Пуролат-стандарт и АПТ-1 Керамопро в условиях эксперимента составляет 291,6 мг Fe^{3+} на 1 $дм^3$ загрузки, и эта величина согласуется с данными для аналогичных сорбентов. По мнению автора, оптимальным вариантом для удаления железа из различных вод будет двухслойная загрузка осветлительных фильтров материалами Пуролат-стандарт и АПТ-1 Керамопро. Но это требует дальнейшего экспериментального изучения.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭС – теплоэлектростанция;

ВПУ – водоподготовительная установка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике: учебное пособие для вузов / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 390 с.: ил.

2. Пат. 2275335, Российская Федерация, МПК C02F103/04, «Фильтрующий материал для очистки воды от железа и марганца, способ его получения и способ очистки воды от железа и марганца» / Губайдулина Т.А., Почуев Н.А., заявитель и патентообладатель Губайдулина Т.А.; Опубл. 27.04.2006.

3. Пат. 2 310 613, Российская Федерация, C02F 103/06, «Способ очистки подземных вод от железа и марганца» / Мынка А.А., Максимова Н.М., Синенко Е.И., заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Акватех»; Опубл. 20.11.2007. Бюл. № 32.

УДК 621.22

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Н.Г. Хаванский – магистрант
В.И. Жилина – д-р экон. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» г. Волжский, Россия

АННОТАЦИЯ. Данная работа направлена на снижение рисков и затрат при приобретении, монтаже и обслуживании насосного оборудования в современном мире конкурентного предложения товара.

ВВЕДЕНИЕ

Потерна – технологическое помещение, находящееся на нижней отметке здания ГЭС, обеспечивающее сбор и отвод протечек.

Насосная станция осушения является частью общей системы осушения, предназначенной для удаления воды из проточной части агрегата или донных водосбросов и поддержания их в осушенном состоянии при проведении осмотров и ремонтов.

При проектировании подобных гидросооружений принимается во внимание наличие того или иного рода протечек. Для сбора просочившейся воды конструкцией здания предусмотрена так называемая «мокрая потерна» – канал, проходящий в нижней части здания по всей его длине. В этой полости собирается вода и откачивается с помощью специальных дренажных насосов. Параллельно этой «мокрой» идет «сухая» потерна – галерея, позволяющая управлять оборудованием для обслуживания мокрой. Сухая она как раз потому, что никакой воды там нет.

Соответственно расположение потерны делает ее жизненно важным сооружением для станции. Если выйдут из строя все насосы, а их количество зависит от размеров станции, следовательно, и от размеров «мокрой» потерны (откачки необходимого объема воды), последствия будут катастрофическими. Начнется затопление отметок, а соответственно, если не предпринять экстренных мер, будут затоплены практически все отметки станции, и функционирование станции будет остановлено. Не исключается и факт человеческих жертв в случае резкого затопления станции.

К примеру, в помещении насосной для откачки воды из мокрой потерны в нижний бьеф во время осушения агрегата, а также откачки дренажных вод на крупных гидроэлектростанциях России, введенных в эксплуатацию в шестидесятых годах, устанавливались центробежные насосы типа 28В-12б, производительностью 3600 м^3/ч. В двухтысячных годах часть таких насосов была заменена центробежными насосами типа 600-1,6/100, производительностью 3600 м^3/ч. Оба этих типа насосов на некоторых станциях остаются в работе и по сей день. Данные типы насосов требуют постоянного присутствия оператора, а также довольно трудоемкого обслуживания, так как имеют немалое количество узлов, за которыми требуется постоянный контроль (подшипники, водяные охладители, уровень масла в подшипниках и т. д.).

На одной из станций Волго-Камского каскада в 2009 г. после реконструкции данный тип насосов был заменен на немецкие погружные насосы фирмы изготовителя FLENDERLOHER тип ZTHA-355GA-06. Данный тип насоса полностью контролируется автоматикой и не требует постоянного присутствия дежурного персонала. Все управление находится в отдельном помещении. Данные насосы не имеют сложных узлов и имеют продолжительный ресурс работы. Соответственно, и затраты на ремонт, и текущее обслуживание данных насосов являются минимальными. Также масляные камеры данных погружных насосов на заводе заправлены экологически чистым, нетоксичным парафиновым маслом медицинского

качества. Тем не менее следует заменять масло каждые 4000 часов, но не реже одного раза в год.

Также актуальны к рассмотрению и насосы других производителей.

Например, центробежный насос типа KSN южнокорейского производителя Keum Jung Industrial Company. Мощность данного насоса рассчитывается в соответствии с объектом, на который будет установлен данный насос. Спектр мощности данного типа насоса колеблется от 800 до 12 000 м^3/ч. Или электронасос погружного типа ДВНП 0,83-36-К УХЛ, производимого разными компаниями в разных регионах России, имеющий номинальную подачу 3000 м^3/ч. Данный тип насоса является самым малостоящим среди насосов, потому как основные узлы изготавливаются в Китае и имеют низкую себестоимость, но при приемке требуют более тщательного обследования. При этом данный тип насосов является самым малозатратным при ремонтах и обслуживании, не требует дорогостоящих смазочных материалов и запасных частей.

1. РАСЧЕТ ПОДБОРА НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для выбора оптимальных производителей насосного оборудования в условиях рыночного предложения, предлагающего различный диапазон соотношения цены и качества, проведем математический расчет подбора насосного оборудования.

Исходные данные

Для расчета были взяты показатели одной из крупнейших гидроэлектростанций страны.

Объем воды в агрегатном блоке, заключенный между затворами верхнего и нижнего бьефов, составляет 24 000 м^3.

Время работы одного насоса при четырех осушенных агрегатах станции составляет один час.

Время заполнения приямка насосной станции осушения и мокрой потерны при четырех осушенных агрегатах составляет два часа.

Следовательно, при производительности существующего насоса 3600 м^3/ч необходимо откачать протечки, собранные за два часа останова насоса и за один час работы насоса. Объем протечек составит:

$$3600 \cdot 1 = q_1 \cdot 2 + q_1 \cdot 1;$$

$$3600 \cdot 1 = q_1 \cdot 3;\ \ q_1 = 1200 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

В соответствии с требованиями СТО «РусГидро» 01.01.78-2012 «Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования» суммарная производительность откачивающих устройств должна обеспечивать откачку воды из проточной части гидроагрегата за время не более шести часов.

Расчет:

Подача насосов для осушения одного агрегата:

$$Q = V/t + q_1,$$

где V = 24 000 м^3; t = 6 ч; q_1 = 1200 м^3/ч.

Для одного агрегата принимается величина 300 м^3/ч.

Следовательно, суммарная расчетная производительность насосов при осушении одного агрегата составляет

$$q = \frac{24\,000}{6} + 300 = 4300 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расчетное время осушения одного агрегата при работе двух насосов производительностью 3600 м^3/ч составит

$$t = \frac{V}{Q - q_1} = \frac{24\,000}{2 \cdot 3600 - 300} = 3{,}5 \text{ ч}.$$

Расчетное время осушения второго агрегата при работе двух насосов производительностью 3600 м^3/ч составит

$$t = \frac{V}{Q - q_1} = \frac{24\,000}{2 \cdot 3600 - 600} = 3{,}6 \text{ ч}.$$

Расчетное время осушения третьего агрегата при работе двух насосов производительностью 3600 м^3/ч составит

$$t = \frac{V}{Q - q_1} = \frac{24\,000}{2 \cdot 3600 - 900} = 3{,}8 \text{ ч}.$$

Расчетное время осушения четвертого агрегата при работе двух насосов производительностью 3600 м^3/ч составит

$$t = \frac{V}{Q - q_1} = \frac{24\,000}{2 \cdot 3600 - 1200} = 4{,}0 \text{ ч}.$$

Из расчетов следует, что при осушении проточной части агрегатов необходимо иметь два насоса производительностью 3600 м^3/ч. Один из них после осушения переводится на поддержание необходимого уровня воды в приямке при откачке. Третий насос находится в резерве. Четвертый насос может находиться в ремонте.

2. ОПЫТ НАБЛЮДЕНИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Оценка качества и надежности насосного оборудования направлена не только на предупреждение аварий или сбоев в работе насосного оборудования, но и затрагивает основные аспекты при проведении приемки насосного оборудования перед его монтажом. Оценка строится как на требованиях стандартов проведения неразрушающего контроля, так и на личном опыте наблюдений и обслуживания насосного оборудования в течение 13 лет. Данный контроль проводился на центробежных насосах типа 28В-12б производства шестидесятых годов и центробежных насосах типа 600-1,6/100. Основными узлами, за которыми проводилось наблюдение, были электродвигатель, маслоохладители, верхний подшипник двигателя, подпятник, нижний подшипник двигателя, вал двигателя и вал насоса, зеркальное уплотнение подшипника насоса, подшипник скольжения насоса, рабочее колесо. Учитывалось также состояние уплотнений и скорость износа, скорость коррозии стенок маслоохладителей, скорость износа сегментов верхнего баббитового подшипника двигателя, скорость износа баббитовых сегментов подпятника, скорость износа нижнего баббитового подшипника двигателя, контроль состояния направляющего подшипника, корректировка излома и уклона валов, скорость износа болтов спаривания и эллипсность отверстий валов двигателя и насоса, скорость износа зеркального уплотнения подшипника насоса из высоколегированной нержавеющей стали, скорость износа резинового подшипника скольжения на водяной смазке, контроль зазоров между рабочим колесом насоса и лабиринтным уплотнением насоса.

В современных же насосах нет большинства узлов, которые есть в данных насосах, например маслоохладителей или подшипников скольжения на водяной смазке. При этом остались основные, «жизненно» важные узлы: двигатель, корпус статора двигателя, направляющие подшипники, вал, направляющий аппарат, рабочее колесо. На них и сделан упор при приемке и монтаже нового насосного оборудования. Результатом наблюдений стало выделение зон контроля у данного оборудования, например, корпуса статора двигателя (рис. 1), направляющего аппарата (рис. 2), рабочего колеса (рис. 3).

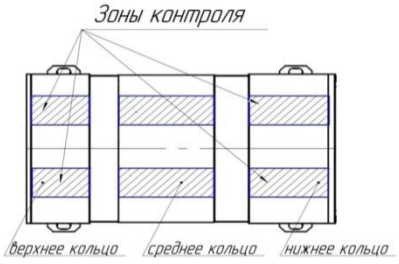


Рис. 1. Зоны контроля корпуса статора двигателя

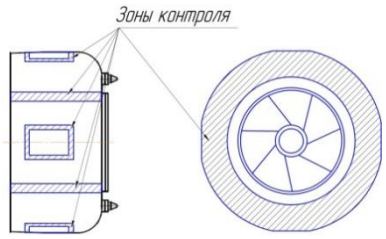


Рис. 2. Зоны контроля корпуса направляющего аппарата

Рис. 3. Зоны контроля рабочего колеса

3. АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Выделим основные этапы методики:

– оценка состояния грунтового и лакокрасочного покрытия;

– оценка возможных дефектов насоса, которая осуществляется на основе анализа данных полученных при мониторинге износа узлов и деталей на действующем оборудовании;

– оценка состояния резиновых или иных уплотнений и мест ввода силовых кабелей;

– оценка возможных дефектов насоса, которая осуществляется на основе анализа данных неразрушающего контроля, а также путем определения фактического технического состояния насоса по результатам обследования такими методами неразрушающего контроля, как визуально-измерительный, магнитопорошковый, ультразвуковой и контроль проникающими веществами;

– оценка контроля документов, подтверждающих квалификацию персонала для выполнения соответствующих сварочных (наплавочных) работ;

– формулирование требований к оборудованию и подбор оборудования, необходимого для проведения неразрушающего контроля;

– подтверждение требований к специалистам неразрушающего контроля.

4. ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ

На данном этапе разработки данной методики проведены наблюдения в процессе эксплуатации за центробежными насосами типа 28В-12б, центробежными насосами типа 600-1,6/100. Проведен ряд видов неразрушающего контроля после изготовления и при приемке электронасоса погружного типа ДВНП 0,83-36-К УХЛ. Собраны наблюдения за работой погружных насосов фирмы изготовителя FLENDERLOHER тип ZTHA-355GA-06.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18442 – 80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования».

2. ГОСТ 19200 – 80 «Отливки из чугуна и стали. Термины определения дефектов».

3. ГОСТ 1412 – 85 «Чугун с пластичным графитом для отливок».

4. Стандарт РД 03 – 606 – 03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю»

5. Стандарт РД 13 – 06 – 2006 «Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах».

6. СТО «РусГидро» 02.03.93 – 2013 «Гидротурбины вертикальные. Контроль металла лопастей и камер рабочих колес. Методические указания».

7. СТО «РусГидро» 01.01.78-2012 «Гидроэлектростанции. Нормы технологического проектирования».

УДК 536.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И.Л. Васильева – доцент
А.А. Морозова – ст. преподаватель
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В исследовании разработана математическая модель температурных полей ковша для непрерывной разливки стали. Эта модель позволяет определять температуру внутренней поверхности ковша по температуре наружной в рабочем состоянии, координаты установки датчиков температуры, в которых обеспечивается минимальная погрешность определения температуры расплава. Подобраны параметры аппроксимирующей кривой, позволяющей определить температуры между расчетными точками и спрогнозировать значения температур по всей толщине слоя.

В последние годы значительно ужесточились процессы эксплуатации сталеразливочного оборудования. Из плавильных агрегатов (электропечь, мартеновская печь) в ковш переведены операции по вводу легирующих добавок, продувке инертными газами, внепечной обработке металла и др. Время нахождения агрессивного расплавленного металла в ковше увеличилось в несколько раз, что значительно повысило его воздействие на футеровку ковша. Проводимые с помощью тепловизоров исследования температурных полей на наружной поверхности сталеразливочных ковшей показали наличие высоких температур на различных участках футеровки ковша. В основном такие температуры на наружной стенке ковша преобладают в зоне падения струи и в зоне выпуска металла, в зонах, расположенных напротив шлакового пояса. Тепловое поле нестационарное. В начале эксплуатации рабочего слоя футеровки теплопроводность незначительна и поток тепла удерживается применяемой теплоизоляцией. При износе футеровки увеличивается поток тепла и усиливается воздействие на теплоизоляционный и арматурный слой. По окончании плавки футеровка рабочего слоя уменьшается до 30-40 мм, усиливается тепловая нагрузка на теплоизоляционный слой и металлический корпус ковша. Выявлено, что после 3-4 лет интенсивной эксплуатации ковшей с недостаточной теплоизоляцией происходит значительное ослабление прочностных свойств футеровки и коробление корпуса. Технология получения качественной непрерывнолитой заготовки представляет собой физически очень сложный, энергоемкий и дорогостоящий процесс, что существенно затрудняет экспериментальные исследования в данной области. Экспериментальное решение таких задач требует больших материальных и интеллектуальных затрат. В связи с этим общепризнанной мировой практикой является экспертиза с использованием компьютерных моделей технических решений. Расчет процесса требует учета тепловых, прочностных и гидродинамических явлений, предъявляет высокие требования к возможностям используемых средств численного моделирования. Развитие численных методов привлекает больше внимания к численному подходу решения тепловых задач контроля температуры.

Важнейшим функциональным и технологическим элементом является промежуточный ковш. Он является частью системы по непрерывной разливке стали и предназначен для приема жидкого металла из сталеплавильных агрегатов и транспортирования его к месту разливки. Для незначительного снижения температуры металла в начале разливки путь стали в промежуточном ковше должен быть как можно короче. Нагрев металла в ковше сложен, и для управления

режимами технологического процесса при его разогреве необходима система контроля температуры в его элементах. Из-за невозможности регулирования температуры непосредственно с рабочей поверхности ковша прибегаем к численному моделированию температурного поля. Зная температурные поля ковша, можно контролировать процесс разливки стали и прогнозировать степень изношенности его внутренней поверхности. Расчетная область представляет собой многослойную стенку. В [1] представлена математическая постановка задачи, геометрия расчетной области в цилиндрической системе координат. Геометрия расчетной области в цилиндрической системе координат представлена на рис. 1.

Исходное уравнение – уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\rho C_P \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(q_r r) - \frac{\partial}{\partial z}(q_z) + q_v, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3; C_P – теплоёмкость материала, Дж/(кг·°С); t – температура, °С; τ – время, с; r – радиальная координата, м; q_r – радиальная плотность теплового потока, Вт/м^3; z – осевая координата, м; q_z – осевая плотность теплового потока, Вт/м^3; q_v – плотность теплового потока внутренних источников тепла, Вт/м^3.

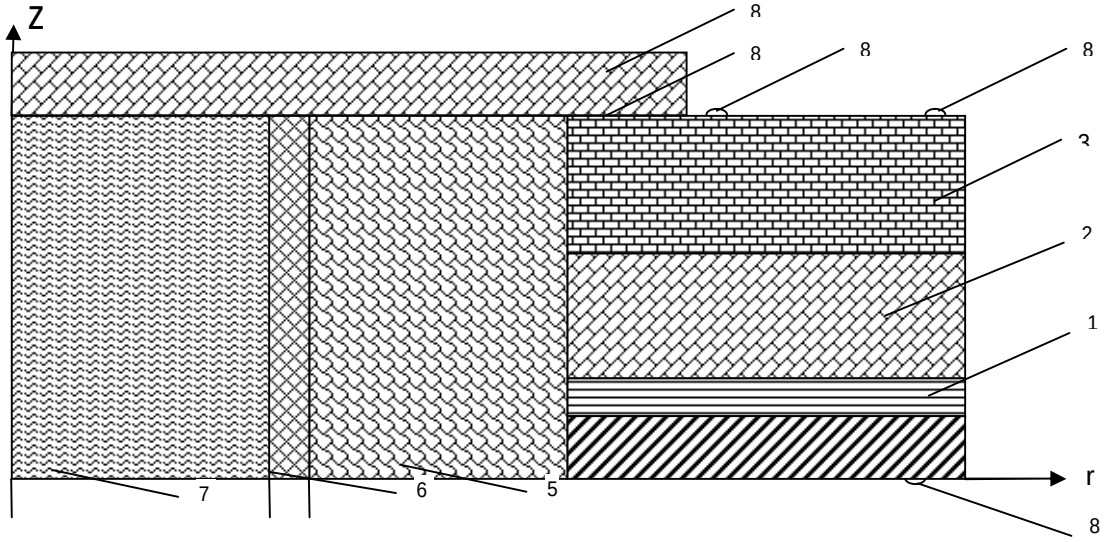


Рис. 1. Геометрия расчетной области: 1– теплоизоляционный слой; 2 – арматурный слой; 3 – рабочий слой; 4 – днище; 5 – гнездовой блок; 6 – стакан-дозатор; 7 – стекловолокно; 8 – контрольные точки

Граничные условия:

$$z = 0:\ \lambda \frac{\partial t}{\partial z} = -\alpha_1 (t(r,0) - t_0); \quad (2)$$

$$z = z0:\ \lambda \frac{\partial t}{\partial z} = -\alpha_2 (t(r, z_0) - t_f); \quad (3)$$

$$r = 0:\ \frac{\partial t}{\partial r} = 0; \quad (4)$$

$$r = \infty:\ \frac{\partial t}{\partial r} = 0, \quad (5)$$

где λ – теплопроводность материала, Вт/(м$_2$·°С); α_1 – коэффициент теплоотдачи (КТО) от нагретого теплоносителя к теплووспринимающей поверхности, Вт/(м^3·°С); α_2 – КТО от поверхности в окружающую среду, Вт/(м^3°С); t_0 – начальная температура, °С; t_f – температура окружающей среды, °С.

Начальные условия:

$$\tau = 0:\ t(r, z) = \text{const}. \quad (6)$$

Уравнение неразрывности интегрировалось по типичному контрольному объему. Для аппроксимации производных используем кусочно-линейный профиль. Системы полученных линейных уравнений решались итерационно методом переменных направлений.

В [2] представлено численное решение задачи, описана методика решения, подо-

брана плотность теплового потока на каждом технологическом участке разогрева футеровки промежуточного ковша, уточнены параметры модели и режимы работы горелок. В [3] проведен анализ координаты установки датчиков температуры, в которых обеспечивается наибольшая достоверность измеренной информации.

На рис. 2 и 3 указаны возможные варианты равномерного расположения датчиков контроля температуры (датчик Д1 – координата r_1, датчик Д2 – координата r_2, датчик Д3 – координата r_3, датчик Д4 – координата r_4, датчик Д5 – координата r_5) в окрестности стакана-дозатора на соответствующей глубине установки внутри днища ковша – координата z: при этом z_5 = 0,15 м – линия Л5; z_4 = 0,16 м – линия Л4; z_3 = 0,194 м – линия Л3; z_2 = 0,227 м – линия Л2; z_1 = 0,309 м – линия Л1.

На основе численного моделирования были получены температуры для каждой координаты установки датчиков Д для координаты z.

По технологической карте необходимо, чтобы рабочая температура внутренней поверхности футеровки промежуточного ковша в пяти контрольных точках от начала разогрева t_1 = 2,6 ч, t_2 = 5,4 ч, t_3 = 7,8 ч, t_4 = 9,8 ч, t_5 = 15 ч составляла соответственно t_1 – 300 °С; t_2 – 1250 °С; t_3 – 450 °С; t_4 – 1300 °С; t_5 – 650 °С.

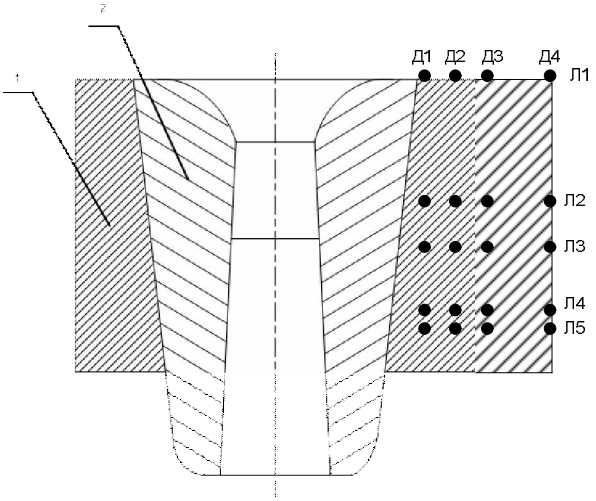


Рис. 2. Фрагмент физического объекта: 1 – гнездовой блок; 2 – стакан-дозатор

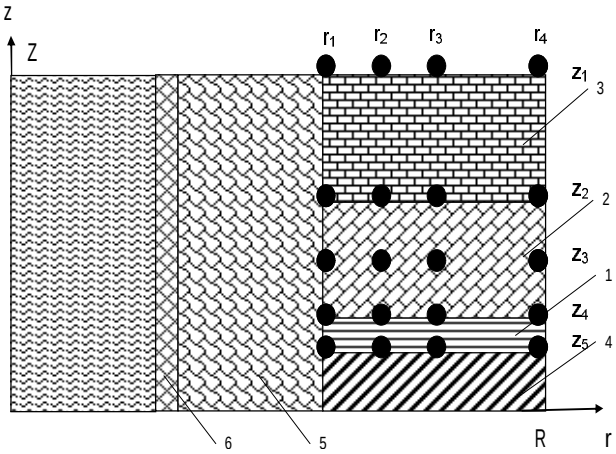


Рис. 3. Фрагмент расчетной области: 1 – теплоизоляционный слой; 2 – арматурный слой; 3 – рабочий слой; 4 – днище (броня); 5 – гнездовой блок; 6 – стакан-дозатор

Следовательно, для каждого значения температуры датчика Д, расположенного на каждой линии Л (координате z), были определены относительные отклонения темпера-

туры Δ от рабочей в пяти контрольных точках. Значения Δ не рассчитывалось для датчиков, имеющих координату z_1 и r_1, так как значения температур в данных точках близко к рабочей температуре футеровки промежуточного ковша.

$$\Delta = \frac{\theta_р - \theta_{ус.дат}}{\theta_р}, \qquad (7)$$

где $\theta_р$ – рабочее значение температуры на внутренней поверхности ковша (по технологичной карте); $\theta_{уст.дат}$ – значение температуры соответствующего датчика Д на линии Л (по результатам расчета математической модели).

По полученным результатам были построены графики отклонений температуры от рабочей в контрольных точках t, отражающие разброс значений температур рабочей поверхности ковша и температур внутренних слоёв футеровки. Наиболее точная информация о температуре расплава может быть получена с датчиков с координатами r_3 и r_4 на глубине z_2, так как разброс значений с этих датчиков минимальный. Кроме того, в этой области диапазон изменения температур составляет от 160 до 850 °С, что позволяет применять термопары без дополнительной защиты, то есть упрощает задачу технической реализации.

Ввиду сложности программирования контроллеров по выше представленной методике, принято решение нахождения функциональной зависимости изменения температуры внутри каждого слоя. Для первоначального расчета выбран рабочий слой из кремнеземного огнеупора – рабочая поверхность ковша.

Из основ теплопередачи известен график изменения температуры при теплопроводности через цилиндрическую стенку. Необходимо найти функцию распределения температуры по осевой координате, зафиксировав радиальную координату в точке r_0 = 0,15 м.

Из вида графика (рис. 4) можно предположить, что зависимость Θ = $f(z)$ носит показательный, параболический или экспоненциальный характер.

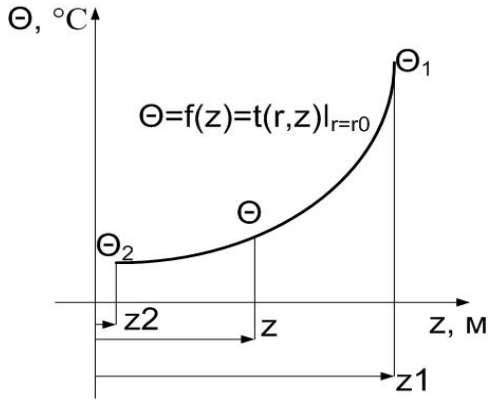


Рис. 4. График изменения температуры при теплопроводности через цилиндрическую стенку: Θ – температура, °С; z – осевая координата, м

Рассмотрим экспоненциальную зависимость:

$$\Theta = a\, e^{b \cdot z}, \qquad (8)$$

где Θ – температура, °С; z – осевая координата, м; a, b – искомые коэффициенты.

Прологарифмируем правую и левую части этого уравнения:

$$\ln(\Theta) = \ln(a) + bz. \qquad (9)$$

Нетрудно заметить, что величины ln(Θ) и z оказываются связаны линейной зависимостью. Применяя ln(Θ) = Θ; ln(a) = a'; b = b'; z = z', получим

$$\Theta' = a' + b'\, z'. \qquad (10)$$

Если экспериментальные данные, то есть пары точек (z_i, Θ_i) связаны экспоненциальной зависимостью, то, согласно (2), график зависимости ln(Θ_i) от z_i будет близок к линейному.

Рассмотрим применение метода наименьших квадратов для определения коэффициентов линейной функции:

$$\varphi(z', a', b') = a' + b\,z'. \qquad (11)$$

Критерием близости в методе является требование минимальности суммы квадратов отклонений от аппроксимирующей функции до экспериментальных точек:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} (\Theta_i - f(z_i))^2 \to \min . \qquad (12)$$

Таким образом, не требуется, чтобы аппроксимирующая функция проходила через все заданные точки, что особенно важно при аппроксимации данных, заведомо содержащих погрешности.

Система нормальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} na' + b' \cdot \sum_{i=1}^{n} z_i' = \sum_{i=1}^{n} \Theta_i'; \\ a' \sum_{i=1}^{n} z_i' + b' \sum_{i=1}^{n} (z_i')^2 = \sum_{i=1}^{n} \Theta_i' z_i'. \end{cases} \qquad (13)$$

Решая систему уравнений (6), найдем формулы для коэффициентов a' и b' линейного уравнения:

$$a' = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Theta_i' - b' \sum_{i=1}^{n} z_i'}{n};$$

$$b' = \frac{n \sum_{i=1}^{n} \Theta_i' z_i' - \sum_{i=1}^{n} \Theta_i' \sum_{i=1}^{n} z_i'}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} (z_i')^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} z_i' \right)^2}. \qquad (14)$$

С учетом введенных обозначений параметр a экспоненциальной зависимости определяется как $a = e^{a'}$.

Ввиду невозможности расположения большого количество датчиков в силу небольшой толщины слоя, решение системы линейных алгебраических уравнений проводилось для трех и четырех точек $n = 3$ и $n = 4$.

Массивы исходных данных:

$$\Theta = \begin{pmatrix} 778 \\ 854 \\ 952 \\ 1076 \end{pmatrix}; \quad z = \begin{pmatrix} 0{,}232 \\ 0{,}250 \\ 0{,}268 \\ 0{,}860 \end{pmatrix}. \qquad (15)$$

В результате решения были получены функциональные зависимости, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

Количество расчетных точек	3	4
Коэффициент b	5,607	6,008
Коэффициент a	211,329	191,605
Функциональная зависимость	$\Theta(z) = 211{,}3e^{5{,}607 \cdot z}$	$\Theta(z) = 191{,}6e^{6{,}008 \cdot z}$

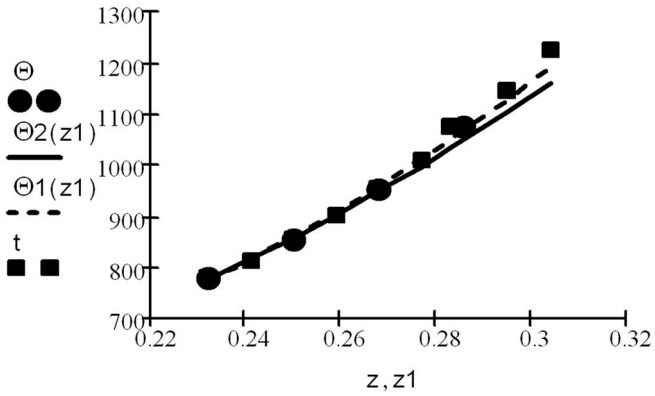


Рис. 5. Результаты решения и прогноза: ● – исходные температуры Θ;
– – – – – расчетная зависимость при $n = 4$
$\Theta 1(z) = 191{,}6e^{6{,}008 \cdot z1}$; ——— – расчетная зависимость при $n = 3$ $\Theta 2(z) = 211{,}3e^{5{,}607 \cdot z1}$;
■ – данные численной модели t

Таблица 2

Статистические оценки

Параметр	$n = 3$	$n = 4$
Среднее значение температуры	$\Theta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\Theta_i}{n} = 861{,}333$	$\Theta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\Theta_i}{n} = 915$
Дисперсия	$\sigma_{ост2} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\Theta 2(z_i) - \Theta 20_i)^2}{n} = 12{,}034$	$\sigma_{ост2} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\Theta 1(z_i) - \Theta 10_i)^2}{n} = 45{,}113$
Среднеквадратичное отклонение	$\sigma_{ост} = \sqrt{\sigma_{ост2}} = 3{,}469$	$\sigma_{ост} = \sqrt{\sigma_{ост2}} = 6{,}717$
Вариация	$v = \frac{\sqrt{\sigma_{ост2}}}{\Theta_{ср}} \cdot 100 = 0{,}403$	$v = \frac{\sqrt{\sigma_{ост2}}}{\Theta_{ср}} \cdot 100 = 0{,}734$
Индекс корреляции	$R_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\Theta 2(z_i) - \Theta 20_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\Theta 2(z_i) - \Theta_{ср})^2} = 0{,}998$	$R_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\Theta 1(z_i) - \Theta 10_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\Theta 1(z_i) - \Theta_{ср})^2} = 0{,}996$

Полученные результаты позволяют прогнозировать температуры в слое по всей толщине. Рассчитанные значения фактически совпадают с данными модели, достоверность которой была подтверждена ранее.

Как видно, значения корреляции близко к 1, что говорит о достаточной точности подбора уравнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные математические модели температурных полей в корпусе ковша позволяют при проектировании информационно-измерительных систем обоснованно выбирать основные параметры системы, а именно координаты установки датчиков температуры, в которых обеспечивается наибольшая достоверность измеренной информации. По измеренной информации с помощью разработанной модели соответственно более точно косвенным методом определяется температура расплава. По полученным зависимостям можно определить температуры между расчетными точками и спрогнозировать значения температур по всей толщине слоя. Таким образом, с помощью несложных технических средств за счет разработанной математической модели решается задача повышения точности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реснянская, А.А., Васильева, И.Л. Численное моделирование температурных полей в элементах промежуточного ковша / А.А. Реснянская, И.Л. Васильева // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – Вып. 3. – № 8 (81). – С. 120-122.

2. Реснянская, А.А., Васильева, И.Л. Математическое моделирование процесса разогрева футеровки промежуточного ковша / А.А. Реснянская, И.Л. Васильева // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – Вып. 5. – № 12 (115). – С. 107-111.

3. Реснянская, А.А., Шилин, А.Н. Определение координат установки датчиков температуры промежуточного ковша для непрерывной разливки стали / А.А. Реснянская, А.Н. Шилин // Приборы. – 2013. – № 4. – С. 39-44.

4. Реснянская, А.А., Шилин, А.Н. Применение методов интерполирования для прогнозирования изменения температуры рабочей поверхности теплоэнергетического оборудования / А.А. Реснянская, А.Н. Шилин // Двадцать первая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2015. – С. 32.

5. Кононов, В.А., Земсков, И.И. Современная высокотемпературная изоляция сталеразливочных ковшей [Электронный ресурс] / В.А. Кононов, И.И. Земсков. URL:https://www.teplopromproekt.ru/about/articles/sovremennaya-vysokotemperaturnaya-izolyatsiya-stalerazlivochnykh-kovshey/

УДК 628.1

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ТРУБОПРОКАТНОГО ЦЕХА ВОЛЖСКОГО ТРУБНОГО ЗАВОДА

В.И. Тикаиди – магистрант
М.В. Одоевцева – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Произведено исследование режимов работы действующей установки обратного осмоса. Выявлено влияние их коррекции на эффективность работы установки. Предложены оптимальные режимы её эксплуатации.

Доля потребления черной металлургией пресной воды составляет 15-20 % от общего потребления промышленными предприятиями страны. Металлургическое предприятие на производство 1 т стального проката расходует до 180-200 м^3 воды.

В ряде технологических процессов металлургических производств используется специально подготовленная обессоленная вода.

Ионитное обессоливание воды является одним из традиционных методов подготовки воды для металлургических производств. За последние годы существенно изменились стоимостные показатели, формирующие цену обессоленной воды. Используемые в ионитом обессоливании смолы повысились в цене на 15-20 %, кислота и щелочь – на 25-30 %, значительно выросла плата за водопользование и сброс стоков. Выгодная альтернатива ионитному обессоливанию – это практически безреагентная технология обратноосмотического обессоливания воды [1].

Реализация преимуществ такой технологии возможна только при грамотной разработке проекта с учетом качества воды и других условий, а также правильной эксплуатации установки. Поскольку большинство схем мембранного обессоливания воды внедряются в производство без предварительного опробования, то оптимизацию работы оборудования необходимо проводить в условиях промышленной эксплуатации. Улучшение схемы, оптимизации режимов работы и системы контроля за рабочими параметрами установки обратного осмоса в процессе эксплуатации позволят сократить объем людских и материальных ресурсов в производстве обессоленной воды и повысить энергетическую эффективность процесса [2].

Обследование производственной установки обратного осмоса (УОО) выявило следующие недостатки:

– низкое качество обессоленной воды, требующее дополнительного умягчения на ионитных фильтрах;

– нестабильные режимы работы УОО вследствие сезонной разности температуры исходной воды от 2,5 °С зимой до более 25 °С летом;

– высокая конверсия 80 %, что способствует росту интенсивности образования отложений на поверхности мембран.

– удельная производительность мембранных элементов 14 дм^3/м^{2}ч, что в два раз ниже паспортной величины.

Влияние температуры исходной воды, величины рецикла, конверсии на гидравлические и технологически показатели моделируемой установки оценивалось с использованием компьютерной модели фирмы IMSdesign в программе Hydranautics Membrane Solutions Design Software, v. 2017 и математических моделей [3, 4].

Как основа для проектирования установки обратного осмоса используется математическая модель (4).

$$L_к x_к = L_н x_н - L_{пер} x_{пер}. \qquad (1)$$

Конструктивно УОО представляет собой набор обратноосмотических элементов, соединенных внутри УОО. В первом приближении объемы концентрата и пермеата

аппарата, состоящего из N мембранных модулей, определялись:

$$V_к = V_{к\,min}. \quad (2)$$

$$V_{пер} = V_{пер}^1 + V_{пер}^2 + \ldots + V_{пер}^N. \quad (3)$$

Объем концентрата одного аппарата

$$L_к^{ап} = L_к^N = \frac{L_н^{II}}{n_1}. \quad (4)$$

Определение массовых расходов потоков для установки в целом:

$$L_н = L_н^I = L_{1н} n_1, \quad (5)$$

где $L_{1н}$ – массовый расход исходного раствора, подаваемого на один мембранный элемент аппарата.

Величина расхода пермеата

$$L_{пер} = n_1\left(L_{1пер} + L_{2пер} + \ldots + L_{пер}^N\right), \quad (6)$$

где слагаемое $n_1\left(L_{1пер} + L_{2пер} + \ldots + L_{пер}^N\right)$ относится к элементам аппарата установки.

Массовая доля примесей в пермеате определялась из формулы [4]:

$$x_{пер} = x_н K_о, \quad (7)$$

где $K_о$ – коэффициент, обратный коэффициенту очистки;

$$x_{пер} = x_н \frac{1 - K_{эл}^{\frac{-(1-\varphi)}{\varphi}}}{1 - K_{эл}^{\frac{-1}{\varphi}}}, \quad (8)$$

где $x_н$ – концентрация солей в исходном растворе, выраженная в массовых долях; φ – истинная селективность элемента; $K_{эл}$ – степень концентрирования одного элемента, определялась следующим образом [4]:

$$K_{эл} = \left(1/(1-R)\right)^{\varphi}. \quad (9)$$

Из уравнения материального баланса определялся $x_к$:

$$L_к x_к = L_н x_н - L_{пер} x_{пер};$$

$$x_к = \left(L_н x_н - L_{пер} x_{пер}\right)/L_к, \quad (10)$$

где $x_{пер}$ – массовая доля солей в пермеате, рассчитанная с помощью уравнения.

При расчете необходимо учитывать, что $x_к^{N-1} = x_н^N$.

Пермеат всех элементов аппарата определялся:

$$x_{пер}^I = \left(\sum_{n=1}^N L_{n\,пер} x_{пер}^n\right) \Big/ \sum_{n=1}^N L_{n\,пер}. \quad (11)$$

Эта методика имеет практическую реализацию при условии выполнения следующих ограничений:

• предельные расходы концентрата для аппарата с одним восьмидюймовым мембранным элементом – не менее 1,8 м^3/ч; с четырехдюймовым мембранным элементом – не менее 1,1 м^3/ч;

• для аппаратов с восьмидюймовыми мембранным элементами – 3,4 м^3/ч; с четырехдюймовыми мембранными элементами [3];

• удельная производительность мембранного элемента должна задаваться в диапазоне 24-27 дм^3/м^{2}ч.

Результаты численного эксперимента показали, что с увеличением температуры исходной воды с 5 до 25 °С возрастают коэффициент концентрационной поляризации на 15 и на 6 % – удельная производительность мембран. Это сопровождается ростом в 2 раза общей жесткости и солесодержания пермеата (рис. 1). В то же время энергопотребление установки ОО в летнее время снижается в 1,8 раза.

С уменьшением конверсии на 13 % улучшается качество пермеата. Снижаются солесодержание с 3 до 2,5 мг/дм^3 и жесткость обессоленной воды с 16,8 до 14,1 мкг-экв/дм^3 (рис. 2).

Снижение концентрационной поляризации с 1,21 до 1,12 улучшает условия работы мембран. Однако энергопотребление УОО увеличивается на 14 % (рис. 3).

Оптимальной из моделируемых схем является схема двухстадийной установки обратного осмоса с конверсией 70 %, температурой исходной воды 10 °С при удельной производительности мембраны 24-27 дм^3/м^{2}ч.

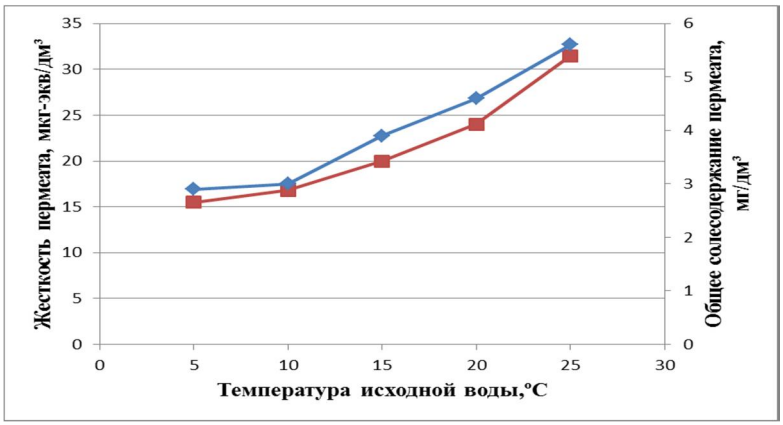


Рис. 1. Зависимость уровня общего солесодержания и жесткости пермеата от температуры исходной воды:

жёсткость пермеата, мкг-экв/дм³; общее солесодержание пермеата, мг/дм³

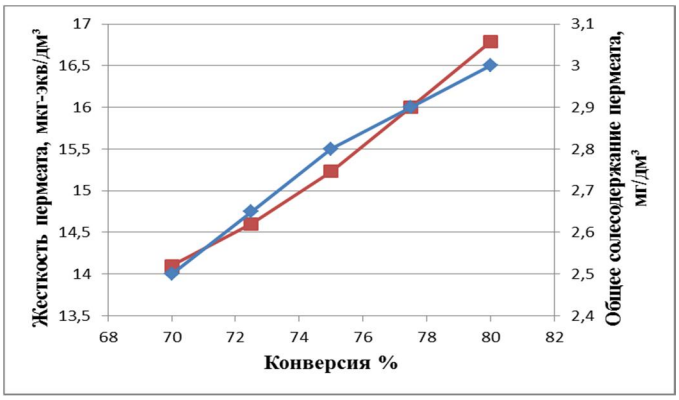


Рис. 2. Изменение общей жесткости и солесодержания пермеата от величины конверсии:

жёсткость пермеата, мкг-экв/дм³; общее солесодержание пермеата, мг/дм³

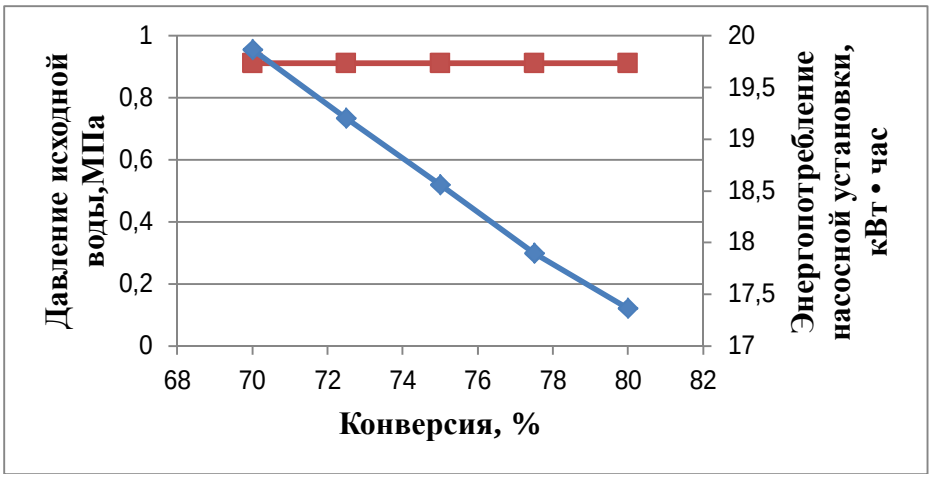


Рис. 3. Зависимость давления исходной воды и энергопотребления УОО от конверсии

давление исходной воды, МПа; энергопотребление насосной установки, кВт·ч

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, А.С. Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчёты: учеб. пособие [Электронный ресурс]/ А.С. Копылов, В.Ф. Очков, Е.В. Чудова. – М.: МЭИ, 2009. – 222 с. URL: http://www.nelbook.ru/?book=40

2. Свитцов, А.А. Основы проектирования производств, использующих мембранное разделение: учебное пособие / А.А. Свитцов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. – 443 с.

3. Криуля, А.О. Методика расчета установок обратного осмоса / А.О. Криуля, Е.В. Семенова, А.Ю. Настоящева, М.В. Одоевцева, В.М. Паначевный, П.А. Абрамов // Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием. – Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 17 декабря 2015 г.

4. Кочаров, Р.Г. Расчет установок мембранного разделения жидких смесей: учебное пособие / Р.Г. Кочаров, Г.Г. Каграманов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: РХТУ им. Менделеева, 2007. – 188 с.

УДК 621.98

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБРАТНОГО ОСМОСА

Ю.Н. Дорофеев, Д.А. Спиридонов – студенты
Е.А. Макаренко – магистрант
М.В. Одоевцева – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Большинство установок обратного осмоса внедряются в производство без предварительного опробования. В связи с этим оптимизацию работы оборудования проводят в условиях промышленной эксплуатации. Возможным решением данной проблемы является использование тестовых мембранных установок АО «НПК Медиана-Фильтр» для проведения оценки интенсивности загрязнений мембранных элементов и направленного выбора моющих растворов производственных установок.

Одним из главных факторов, влияющих на стабильность, эффективность и продолжительность работы мембран, является их загрязнение неорганическими, органическими и биологическими отложениями [1]. Химическая очистка обратноосмотических установок является неотъемлемой частью технологии обратного осмоса. Особенно значимой она является в условиях изменяющегося качества исходной воды, нестабильной работы системы предподготовки, а также в многоступенчатых системах обратного осмоса, работающих с высококонцентрированными растворами солей [2].

Поскольку большинство установок обратного осмоса внедряются в производство без предварительного опробования, то оптимизацию работы оборудования проводят в условиях промышленной эксплуатации. Поэтому применение тестовых установок с целью оптимизации технологических параметров действующих обратноосмотических установок является актуальным направлением исследований [3].

Тестовые установки фирмы АО «НПК Медиана-Фильтр» позволяют:

– определить преимущественные отложения на мембранных элементах;

– подобрать оптимальные очищающие растворы;

– определить порядок и рабочие параметры циклов очистки и число их повторений [4].

Гидравлическая схема тестовой двухступенчатой установки обратного осмоса приведена на рис. 1.

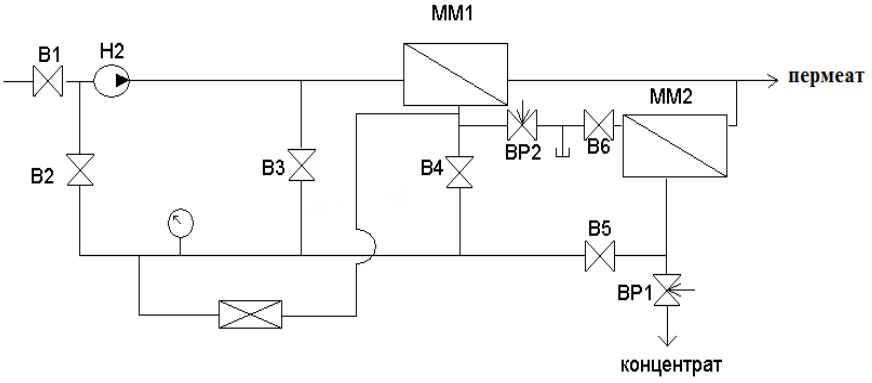


Рис.1. Гидравлическая схема двухступенчатой установки обратного осмоса:
Н2 – насос панели управления; ВР1 – регулирующий клапан
для установки давления питающего раствора на мембранных аппаратах ММ1 и ММ2

Лабораторно-тестовая установка работала параллельно с производственной установкой обратного осмоса. Гидравлическая схема производственной установки обратного осмоса (УОО) приведена на рис. 2.

Тестовая установка подключалась в двух точках производственной установки: к исходному раствору после пяти микронных фильтров и на концентрат после первой ступени.

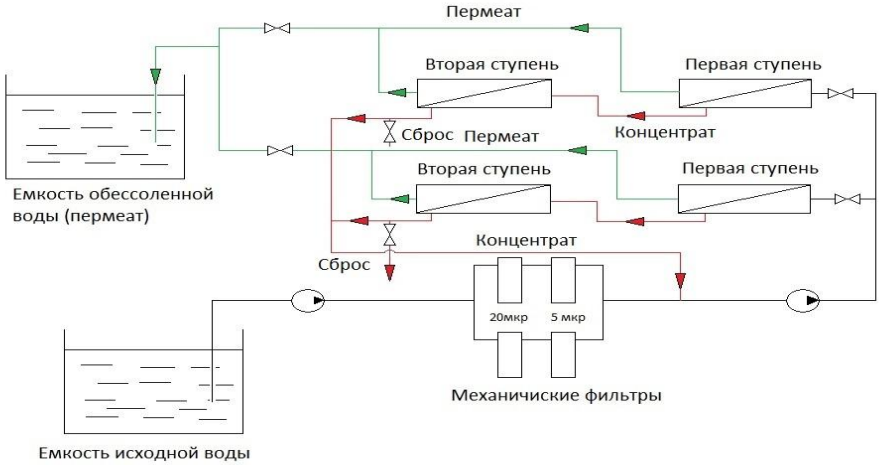


Рис. 2. Гидравлическая схема производственной УОО

Результаты испытаний при подключении тестовой установки после пяти микронных фильтров приведены в табл. 1. В процессе работы тестовой установки конверсия, селективность мембран и технологические показатели пермеата изменялись незначительно (табл. 1). Производительность тестовой установки после ее эксплуатации в течение 45 дней (по 12 часов в день) по концентрату снизилась в 2 раза. При ухудшении технологических показателей концентрата в 1,4-1,6 раза проведена химическая мойка мембран. Результаты анализа проб моющих растворов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты испытаний при подключении тестовой установки после пяти микронных фильтров

Показатели	Исх. раствор	Концентрат	Пермеат	Исх. раствор	Концентрат	Пермеат
	Начало работы			Окончание работы		
SDI	6	9	–	6	10	–
$Ж_о$, мг-экв/дм^3	3,40	4,60	0,02	4,50	6,40	0,02
$Ж_{Ca}$, мг-экв/дм^3	2,40	3,40	0,01	3,00	4,80	0,01
$Ж_{Mg}$, мг-экв/дм^3	1,00	1,20	0,01	1,50	1,60	0,01
$Щ_о$, мг-экв/дм^3	2,6	3,4	0,1	3,0	4,8	0,2
Хлориды, мг/дм^3	13,0	22,0	2,0	21,0	32,5	0,4
Солесодержание, мг/дм^3	733	1000	9	523	770	6
pH	7,4	7,6	5,1	7,7	7,7	5,8
Расход, л/ч	62,8	43,4	19,4	37,7	23,3	14,4
Конверсия, %	31			38		
Селективность мембран, %	98,7			98,9		

Таблица 2

Состав загрязнений моющих растворов мембранных элементов тестовой установки

Показатель/Раствор	Кислотный моющий раствор	Щелочной моющий раствор
pH	2,5	12,0
Fe общее, мг/дм^3	0,2	0,1
SiO_2, мг/дм^3	0	0
Взвешенные вещества, мг /дм^3	2	7

Для реализации химической мойки мембранный элемент подключали к станции химической мойки (рис. 3).

Рис. 3. Станция химической мойки АО «НПК Медиана-Фильтр»

Химическую мойку проводили в несколько этапов:

– циркуляция щелочного раствора MF-A-T10 АО «НПК Медиана-Фильтр» через мембранный элемент;

– замачивание мембранного элемента с последующей циркуляцией щелочного раствора через мембранный элемент;

– циркуляция кислотного раствора MF-B-L20 АО «НПК Медиана-Фильтр» через мембранный элемент;

– замачивание мембранного элемента с последующей циркуляцией кислотного раствора через мембранный элемент;

– отмывка мембран дистиллированной водой до значений pH = 6-7 после циркуляции щелочного и кислотного растворов. Результаты испытаний при подключении тестовой установки на концентрат после первой ступени приведены в табл. 3.

В ходе работы отслеживались следующие параметры работы тестовой установки: расходы потоков, давление на механических фильтрах, величина конверсии и селективность мембранных элементов.

Критериями к проведению химической мойки являлись: снижение производительности тестовой установки по пермеату на 9 %, снижение селективности мембранного элемента на 2 % и ухудшение качества пермеата.

Результаты исследований проб растворов после химической мойки приведены в табл. 4.

Таблица 3

Результаты испытаний при подключении тестовой установки на концентрат первой ступени

Показатели	Исх. раствор	Концентрат	Пермеат	Исх. раствор	Концентрат	Пермеат
	Начало испытаний			Окончание испытаний		
$Ж_о$, мг-экв/дм^3	17,00	19,00	0,07	17,00	24,00	0,30
$Ж_{Ca}$, мг-экв/дм^3	11,00	14,50	0,03	11,00	18,50	0,30
$Ж_{Mg}$, мг-экв/дм^3	5,50	4,50	0,04	5,50	5,50	0,03
$Щ_о$, мг-экв/дм^3	11,0	13,5	0,3	11,0	15,0	0,3
Хлориды, мг/дм^3	102,0	124,0	1,4	102.0	150,0	3,5
Солесодержание, мг/дм^3	1437,5	1725,0	11,5	1437,5	1950,0	11,5
pH	7,7	7,7	5,3	7,7	8,0	6,4
Расход, дм^3/ч	41,5	31,0	10,5	39,8	33,4	8,9
Конверсия, %	25			21		
Селективность мембран, %	98,6			96,6		

Таблица 4

Состав загрязнений моющих растворов мембранных элементов тестовой установки

Состав загрязнений	Единицы измерений	Кислотный раствор	Щелочной раствор
Кальций	мг/дм^3	–	–
Сульфаты	мг/дм^3	26	–
Железо	мг/дм^3	0,24	–
SiO_2	мг/дм^3	–	3,2

Исследования проб растворов после химической мойки выявили, что на мембранных элементах тестовой установки и, следовательно, на мембранах второй стадии производственной УОО преобладают отложения оксида кремния. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности сокращения химических очисток мембран кислотными растворами. Сокращение продолжительности контакта мембран с кислотным моющим раствором обеспечит повышение продолжительности их работы на водоподготовительном оборудовании металлургического предприятия при стабильном качестве обессоленной воды.

Результаты испытаний при подключении тестовой установки на концентрат после первой ступени после химической мойки приведены в табл. 5.

После химической мойки селективность мембран и качество пермеата восстановились (табл. 5).

По результатам исследований установлено, что в процессе работы производственной УОО наиболее загрязнена вторая стадия. Этому способствуют высокая степень насыщения концентрата первой стадии УОО соединениями железа и оксида кремния и завышенная конверсия производственной установки (80 %).

Таблица 5

Параметры испытаний после химической очистки при подключении тестовой установки на концентрат первой ступени

Показатели	Концентрат после первой ступени производственной установки	Пермеат с тестовой установки	Концентрат с тестовой установки
Жо, мг-экв/дм^3	18,00	0,14	23,00
$Ж_{Ca}$, мг-экв/дм^3	14,00	0,10	17,00
$Ж_{Mg}$, мг-экв/дм^3	4,00	0,04	6,00
$Щ_o$, мг-экв/дм^3	13,0	0,5	18,0
Хлориды, мг/дм^3	128,5	2,2	155,0
Солесодержание, мг/дм^3	1260,0	12,5	1680,0
pH	7,55	5,85	7,80
Расход, дм^3/ч	36,4	10,2	26,2
Конверсия, %	–	28,7	
Селективность мембран, %	98,6		

ВЫВОДЫ

Необходимо снизить величину конверсии производственной установки до 65-75 %; изменить режим проведения химических моек за счет снижения количества очисток кислотными растворами.

Данные мероприятия обеспечат уменьшение отложений оксида кремния и железа на мембранных элементах, увеличат срок эксплуатации мембранных элементов водоподготовительного оборудования металлургического предприятия, обеспечат стабильное качество обессоленной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантелеев, А.А. Технологии мембранного разделения в промышленной водоподготовке: Учебное пособие / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, О.В. Хоружий, С.Л. Громов, А.Р. Сидоров. – М.: ДеЛи плюс, 2012. – 429 с.

2. Кочаров, Р.Г. Теоретические основы обратного осмоса: Учебное пособие. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. – 143 с.

3. Свитцов, А.А. Мембранные технологии в России // The chemical journal / А.А. Свитцов. – 2010. – № 82. – С. 22-26.

4. Громов, С.Л. Современные технологии водоподготовки в промышленности и энергетике / С.Л. Громов, А.А. Пантелеев, А.Р. Сидоров. URL: http://www.mediana-filter.ru/water_prom_technology.html

УДК 621.98

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЛИНИЙ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Д.С. Янина, Д.Е. Широбоков – магистранты
Е.Г. Зенина – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведен ряд исследований защит для повышения чувствительности на линяниях дальнего резервирования, рассмотрены основные схемы и выявлено наиболее оптимальное устройство по функциям и простоте эксплуатации – самонастраивающаяся защита, реагирующая на приращение тока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: чувствительность, резервная защита, реле, самозапуск, реактивная мощность.

В настоящее время в большинстве случаев (если обеспечивается чувствительность при КЗ на смежном участке) функции дальнего резервирования могут выполнять серийно выпускаемые защиты. Для повышения чувствительности дальнего резервирования при многофазных замыканиях используются характеристики реле сопротивления дистанционных защит, обеспечивающие улучшенную отстройку от параметров нагрузочного режима: на линиях 110-330 кВ – эллиптическую (реле КРС-1 и КРС-2, устанавливаемые на панелях ЭПЗ-1636-67 и др.), на линиях 330 кВ и выше – со смещением в первый квадрат комплексной плоскости сопротивлений (реле КРС-3 защиты типа ДЗ-503). При КЗ на землю для повышения чувствительности последняя ступень токовой защиты нулевой последовательности выполняется ненаправленной (если это возможно по условию селективности), а также для этой защиты используется реле направления мощности, блокирующее защиту при направлении мощности КЗ от линии к шинам.

При применении защит панели типа ПЗ-201, ТЗ-751, шкафа ШДЭ2801 и др. применяется предусмотренная в этих защитах компенсация падения напряжения нулевой последовательности (смещение характеристики реле направления мощности «в зону»).

В тех случаях, когда угол нагрузки (с учетом пускового тока электродвигателя) значительно меньше угла при коротком замыкании, возможно, и достаточно применения реле направления мощности. Так, например, анализ нагрузок городских сетей 35 кВ и сетей 35-110 кВ сельскохозяйственного назначения показывает, что угол нагрузки с учетом пускового тока электродвигателя составляет около 20-30°, а угол при КЗ – примерно 80-90° [4]. Применение реле направления мощности с углом максимальной чувствительности $\varphi_{max\ ч}$ = 90° в данном случае позволяет получить максимальную чувствительность защиты и отстроиться от максимального тока нагрузки. Мощность срабатывания реле выбирается по условию отстройки от максимального тока I_{max}, определенного с учетом увеличения тока нагрузки $I_н$ в условиях протекания пускового электродвигателя:

$$S_{ср} = \frac{100 k_н I_{max} \sin\varphi_{max}}{k_в n_{Т.Т}}, \qquad (1)$$

где

$$\sin\varphi_{max} = \frac{I_н \sin\varphi_н + I_п \sin\varphi_п}{I_{max}};$$

$$I_{max} = \sqrt{\left(I_н \cos\varphi_н + I_п \cos\varphi_п\right)^2 + \left(I_н \sin\varphi_н + I_п \sin\varphi_п\right)^2},$$

где $n_{Т.Т}$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока; $k_н$ – коэффициент надежности; $k_в$ – коэффициент возврата.

Коэффициент чувствительности определяется из выражения

$$k_{ч} = \frac{I_{к}^{(2)} U_{к} \sin \varphi_{к}}{\frac{k_{н}}{k_{в}} I_{max} U_{м.ф} \sin \varphi_{max}}, \qquad (2)$$

где $U_{м.ф}$ – междуфазное напряжение до КЗ на шинах подстанции; $U_{к}$ – напряжение в месте установки реле при КЗ за трансформатором ответвления.

Из этого выражения видно, что чувствительность реле направления мощности при $\varphi_{к}$ = 90° примерно в $1/\sin\varphi_{max}$ раз больше, чем токовой.

Но при значительной двигательной составляющей нагрузки увеличивается расчетный максимальный ток и увеличивается отношение $1/\sin\varphi_{max}$, вследствие чего уменьшается коэффициент чувствительности и тем самым снижается чувствительность реле направления мощности.

В некоторых случаях дальнее резервирование удается осуществлять с помощью дистанционных защит с характеристикой реле сопротивления в виде эллипса, треугольника с вершиной в начале координат или четырехугольника. Распространенные в эксплуатации типовые дистанционные защиты имеют направленные дистанционные органы с характеристикой срабатывания в виде окружности, проходящей через начало координат, и подключаются на разность токов и линейные напряжения. Такое подключение позволяет получить на зажимах реле сопротивление, одинаковое при трехфазном, двухфазном КЗ и двухфазном замыкании на землю на защищаемой линии. Однако при двухфазном КЗ за трансформатором со схемой соединения звезда – треугольник замер получается искаженным, что не позволяет обеспечить чувствительность защиты. Кроме того, возможности третьей ступени дистанционной защиты линии для резервирования КЗ за трансформатором сильно ограничены нагрузкой, от сопротивления которой необходимо отстраниться.

В настоящее время существует ряд разработок, выполненных в Павлодарском индустриальном институте (ПИИ) и выпускаемых предприятием «Армэнергоналадка». Данные технические решения предназначены для резервной защиты воздушных линий с ответвлениями и односторонним питанием. Для оценки возможности их применения на ВЛ с двухсторонним питанием, а также дальних линиях ниже выполнен анализ.

В работе [1] предлагается использовать в качестве защиты от двухфазных коротких замыканий устройство, реагирующее на разность модулей токов фаз, а при симметричных, то есть трехфазных КЗ, – на приращение тока.

Структурная схема блока несимметричных КЗ приведена на рис. 1. При этом приняты следующие обозначения: ПТ – преобразователи тока; КАС – коммутатор аналоговых сигналов; ЛЗ – линия задержки; СС1 – схема сравнения двух величин; СС2 – схема сравнения абсолютных величин токов трех фаз между собой; И, ИЛИ, НЕ – логические элементы; В1-В4 – элементы ВРЕМЯ; ИСП – исполнительный орган; Q_{A}, Q_{B}, Q_{C} – выключатели фаз А, В, С; РПВ – реле положения «включено».

В нормальном режиме на выходе элемента СС1 сигнал практически равен *нулю*, вследствие того что данный элемент выделяет приращение тока за время $t_{ЛЗ}$ ($t_{ЛЗ}$ – время задержки), а приращение тока нагрузки за каждый период $t_{ЛЗ}$ происходит на величину, не превосходящую порога срабатывания элемента СС1. Из-за симметрии токов разность между модулями токов фаз меньше тока небаланса $I_{нб}$ и поэтому элемент СС2 не срабатывает. При двухфазных КЗ за трансформатором на выходе элемента СС2 появляется сигнал, что обеспечивает пуск элемента времени В1, который через выдержку времени $t_{ЛЗ}$ подает сигнал «логическая единица» на один из входов логического элемента И1. На второй вход данного элемента подается сигнал «логическая единица» от схемы контроля состояния всех трех фаз выключателя, что предотвращает неправильное действие защиты при недовключении одной из фаз выключателя и ОАПВ.

При трехфазных КЗ сигнал отключения формируется логическим элементом И2, который контролирует состояние выключателя и блока приращения модулей токов фаз.

Для исключения блокирования защиты при работе линии в неполнофазном режиме предусмотрен еще один канал (элементы НЕ, В4, ИЗ). При этом канал асимметричных КЗ выводится из действия из-за возможного ложного действия.

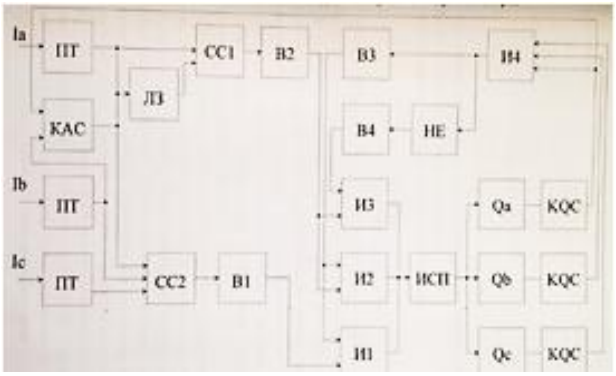


Рис. 1. Структурная схема резервной защиты, реагирующей на разность модулей токов фаз

Анализ схемотехнических решений показывает, что контроль разностей модулей токов фаз более сложен по сравнению с выполнением контроля токов обратной последовательности. Возможно, также избыточным является контроль состояния всех трех фаз выключателя, так как на ВЛ напряжением 110 кВ выключатели выполняются с трехфазным управлением.

Необходимо отметить, что возможна ложная работа устройства при обрыве фазного провода линии без касания с землей. Это объясняется тем, что фазы выключателя остаются во включенном состоянии, а появляются выходные сигналы схем сравнения, контролирующих разность модулей токов фаз и приращение тока.

В работе [2] предлагается также для повышения чувствительности применение защит, реагирующих на приращение токов (реактивных являющих) или самонастраивающихся защит.

Ток срабатывания $I_{с.з}$ самонастраивающейся защиты определяется по выражению

$$I_{с.з,i} = \frac{I_{нg} \sin \varphi_н - I_п \sin \varphi_п + I_{КЗ} \sin \varphi_{КЗ}}{K_ч},$$

(3)

где $I_{нg}$ – ток нагрузок линии в доаварийном режиме; $I_п$ – номинальный ток трансформатора, за которым произошло КЗ; $I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания; $\varphi_н$, $\varphi_п$, $\varphi_{КЗ}$ – угол нагрузки линии, нагрузки за рассматриваемым трансформатором, короткого замыкания соответственно. Ток срабатывания пускового органа $I_{нi}$ i-й ступени определяется соотношением

$$I_{н,i} = \frac{K_ч}{K} I_{с.з,i} - I_{отв,1} \sin j_1, \qquad (4)$$

где K – коэффициент запаса; $K_ч$ – коэффициент чувствительности.

Минимальный ток срабатывания защиты при $I_{нg} = 0$ и $I_{нg} = I_{p\max}$ соответственно равен

$$I_{\min} = \frac{kI_1 \sin j_1 + I_п \sin j_п}{\sin j_{КЗ}}, \qquad (5)$$

где $I_{p\max}$ – максимальный нагрузочный ток; I_1, φ_1 – номинальный ток и угол нагрузки наиболее мощного трансформатора.

Авторы данной работы предлагают осуществлять переключение уставок устройств в зависимости от предшествующего тока.

На рис. 2 представлена структурная схема данного устройства. При этом принять следующие обозначения: 1 – преобразователь тока в постоянное напряжение; 2 – управляемая линия задержки; 3 – схема сравнения; 4 – реле времени; 5 – исполнительный орган; 6 – задатчик уставки; 7 – блок логики.

В нормальном режиме ток преобразуется в постоянное напряжение, которое поступает на вход линии задержки 2 и схемы сравнения 3. В линии задержки 2 выходной сигнал появляется определенное время задержки $t_{зад}$. Данный сигнал также поступает на вход задатчика уставки, в котором в зависимости от уровня входного сигнала дискретно изменяется выходное напряжение, поступающее также на вход схемы сравнения. При значительных приращениях тока на выходе схемы внешние 3 появляется выходной сигнал, так как выполняется условие $U_3 = U_1 - U_2 - U_6 > 0$, где U_1, U_2, U_3, U_6 – выходные сигналы элементов 1, 2, 3, 6.

Срабатывание схемы сравнения 6 приводит к изменению состояния блока логики, который формирует выходной сигнал на реле времени и управляемую линию задержки 2. При появле-

нии единичного сигнала на управляющем входе предыдущее состояние сохраняется.

В устройстве предусмотрено запоминание предшествующего состояния (величины тока) при действии АПВ.

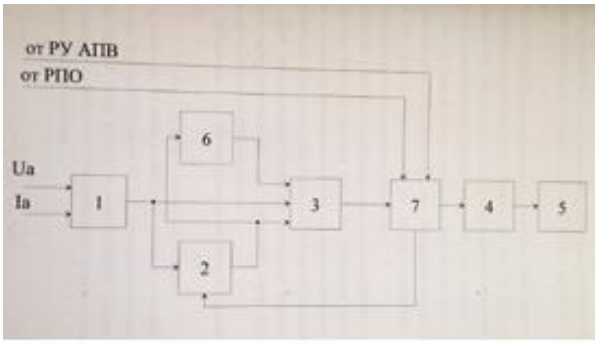


Рис. 2. Структурная схема самонастраивающейся защиты, реагирующей на приращение тока

Для выявления режима самозапуска электродвигателей, являющихся нагрузкой трансформаторов на ответвлениях линий, авторами работы предлагается устройство, сравнивающее максимальный ток обратной последовательности с током обратной последовательности каждой линии. При этом работоспособность устройства при симметричных КЗ обеспечивается при учете, что оно начинается с несимметричного КЗ.

Для отличия трехфазного КЗ от режима пуска (самозапуска) электродвигателей авторами предлагается учитывать изменение тока во времени. При трехфазных КЗ предполагается, что ток практически не затухает, при самозапуске электродвигателей происходит затухание тока, что фиксирует пусковой орган.

Для того чтобы не отстраивать измерительные органы самонастраивающейся защиты от токов самозапуска электродвигателей ответвлений при включении трансформаторов и линий, время срабатывания защиты и время переключения с одной уставки на другую должны выбираться больше времени самозапуска данных электродвигателей. То есть применение самонастраивающейся защиты более целесообразно на линиях с незначительной двигательной нагрузкой или малым временем самозапуска. Количество ступеней самонастраивающейся защиты определяется выражением

$$n = \frac{\ln\left(1 - \dfrac{K_{\text{отс}} - 1}{I_{k\min} - I_{\text{отв}\min} - K_{\text{отс}} I_{\text{отс}\max}}\right)}{\ln\left(1/K_{\text{отс}}\right)}, \quad (6)$$

где $I_{\text{отв min}}$, $I_{\text{отв max}}$ – минимальный и максимальный ток нагрузки трансформатора; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки; I_{mn} – минимальный ток короткого замыкания за трансформатором.

Алгоритм действия защиты i-й ступени имеет вид:

$$V_i = \left(T_{\text{A}i} + T_{\text{B}i} + T_{\text{C}i}\right)\left(T_{\text{п}i} + D_{1i}\right), \quad (7)$$

где V_i – выходной сигнал i-й ступени защиты; $T_{\text{A}i}$, $T_{\text{B}i}$, $T_{\text{C}i}$ – выходные сигналы измерительных органов тока фаз А, В, С соответственно; $T_{\text{п}i}$ – выходной сигнал пускового органа; D_{1i} – выходной сигнал органа выдержки времени пускового органа.

Алгоритм действия защиты в целом может быть представлен в виде

$$Y_{\text{з}} = \left\{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(T_{\text{A}i} + T_{\text{B}i} + T_{\text{C}i}\right)\left(T_{\text{п}i} + D_{1i}\right)\right)\right\} D_{\text{з}} Y_{\text{РПВ}} D_5, \quad (8)$$

где $D_{\text{з}}$, D_5 – выходные сигналы органов выдержки срабатывания защиты и срабатывания реле положения «включено» выключателя на время соответственно.

Для исключения ложной работы защиты в цикле АПВ предлагается запоминать аварийный ток и сравнивать его с током после АПВ. По факту снижения контролируемого тока можно судить об успешности АПВ. В противном случае АПВ – неуспешное. Алгоритм действия данного блока защиты формируется по выражению

$$Y_{2i} = \left(T_{\text{A}i} + T_{\text{B}i} + T_{\text{C}i}\right) Z_i Z_{\text{АПВ}}, \quad (9)$$

где Z_i, $Z_{\text{АПВ}}$ – логические функции ПАМЯТЬ i-й ступени и срабатывания АПВ:

$$Z_i = \left(\overline{T_{\text{п}i} D_i} D_{2i} Y_{\text{РПО}} + Z_i\right)\overline{T_{ni} D_i + Y_{\text{РПО}} D_6},$$

$$Z_{\text{АПВ}} = \left(Y_{\text{РПВ}} + Y_{\text{АПВ}}\right)\overline{Y_{\text{РПВ}} D},$$

где $Y_{\text{АПВ}}$, $Y_{\text{РПО}}$ – выходные сигналы срабатывания АПВ и реле положения «отключено» выключателя.

Алгоритм формирователя сигнала отключения линии после неуспешного АПВ имеет вид:

$$Y_2 = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left(T_{\mathrm{A}i} + T_{\mathrm{B}i} + T_{\mathrm{C}i} \right) Z_i Z_{\text{АПВ}} \right\} D_4 , \quad (10)$$

где D_4 – выходной сигнал органа выдержки времени.

Таким образом, сигнал отключения линии формируется по-разному до АПВ и после неуспешного АПВ, а именно

$$Y_\Sigma = Y_1 + Y_2 . \quad (11)$$

Структурная схема самонастраивающейся защиты дана на рис. 3. На рисунке приняты следующие обозначения: $T_{\mathrm{A}1}$, $T_{\mathrm{B}1}$, $T_{\mathrm{C}1}$ – измерительные органы первой ступени; ТП1 – реле переключения первой ступени; ИЛИ, НЕ, И – логические элементы; В1-В6 – реле положения «включено» и «отключено»; ИСП – исполнительный орган; Q – выключатель; En – измерительно-логические блоки n-ступеней защиты.

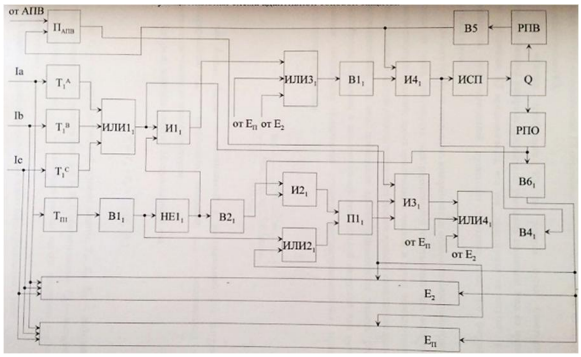


Рис. 3. Функциональная схема адаптивной токовой защиты

В нормальном режиме работы ВЛ при увеличении тока нагрузки до уставки первого реле переключения $T_{\text{П}1}$ оно срабатывает и через элемент времени B_{11} посылает сигнал на элемент HE_1, $\mathrm{И1}_1$, что обеспечивает формирование блокирующего сигнала первого блока измерений и переход к следующей ступени. С помощью реле переключения $\mathrm{T}_{\text{П}1}$-$\mathrm{T}_{\text{П}n}$ обеспечивается переход с одной ступени защиты на другую. При возникновении КЗ сигнал на отключение выключателя Q подается с выдержкой времени t_3 (ВЗ), через логический элемент И4, так как на втором входе имеется сигнал «1» (реле положения «включено» РПВ находится в сработанном состоянии). Если же КЗ происходит при включении линии на закоротку реле положения «отключено», РПО предотвращает запоминание сигналов в момент отключения выключателей, что повышает чувствительность защиты к КЗ за трансформаторами.

Срабатывание элемента времени В6 (при условии, что за данный промежуток времени линия не включается от АПВ) приводит к стиранию памяти элементов П1, П2,…, Пn. Выдержка времени данного элемента времени t_6 выбирается из условия $t_6 \geq t_{\text{АПВ}} + t_{\text{ВКЛ}} + \Delta t$, где $t_{\text{АПВ}}$ – время действия АПВ линии; $t_{\text{ВКЛ}}$ – время включения выключателя Q; Δt – ступень селективности.

Если АПВ включает линию на устройстве КЗ, то формируются сигналы $\text{П}_{\text{АПВ}}$ и на одном из выходов П1-Пn, что приводит к отключению выключателя. При успешном АПВ возможно срабатывание измерительных органов от тока самозапуска электродвигателей. Отключение же в этом случае не происходит из-за того, что время задержки элемента ВЗ больше времени самозапуска и измеренные органы возвращаются в исходное состояние, а на элемент $\text{П}_{\text{АПВ}}$ через время t_5 элемента времени В5 подается стирающий сигнал на элемент $\text{П}_{\text{АПВ}}$.

В работе [3] рассмотрена защита, реагирующая на приращение реактивного тока. В схеме защиты предусматривается преобразователь реактивной составляющей тока линии. В Павлодарском индустриальном институте под руководством А. В. Богдана был разработан преобразователь реактивной мощности, структурная схема которого представлена на рис. 4, где ПН и ПТ – преобразователи напряжения и тока; СН – стабилизатор синусоидального напряжения; ПС1, ПС2 – аналоговые перемножители сигналов; АВЧ – аналоговый сумматор.

Принцип действия преобразователя основан на попарном перемножении четырех сдвинутых по фазе синусоидальных сигналов, у которых периодические составляющие находятся в фазе. Стабилизатор СН создает опорный сигнал независимо от величины напряжения. В этом случае заданная составляющая тока, которая определяется заданием углов поворота φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 фазоповоротных схем ФП1-ФП4.

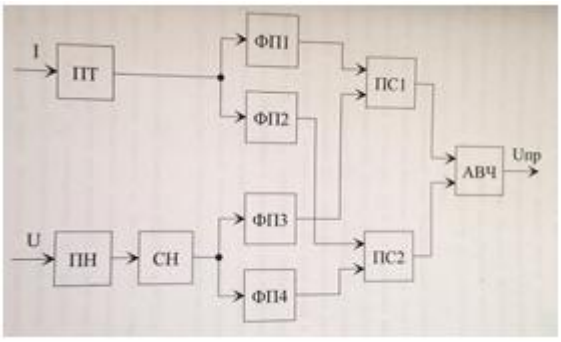


Рис. 4. Структурная схема преобразователя реактивной мощности на измерении приращения реактивного тока

При этом в перемножителях ПС1 и ПС2 выполняются операции:

$$U_{\text{ПС1}} = U_1 U_3 =$$
$$= U_m U_{\text{СН}} \sin\left(wt + j_1 + \frac{p}{4}\right) \sin\left(wt + \frac{p}{4}\right), \quad (12)$$

$$U_{\text{ПС2}} = U_2 U_4 =$$
$$= U_m U_{\text{СН}} \sin\left(wt + j_1 - \frac{p}{4}\right) \sin\left(wt + \frac{p}{4}\right), \quad (13)$$

где $U_{\text{СН}} = 1$.

После преобразований можно получить следующие выражения:

$$U_{\text{ПС1}} = \frac{1}{2} I_m U_{\text{СН}} \left(\cos\left(j_1 + \frac{p}{2}\right) - \cos(2wt + j_1)\right), \quad (14)$$

$$U_{\text{ПС2}} = \frac{1}{2} I_m U_{\text{СН}} \left(\cos\left(j_1 - \frac{p}{2}\right) - \cos(2wt + j_1)\right), \quad (15)$$

Выходной сигнал аналогового сумматора получается

$$U_{АВЧ} = U_{\text{ПС1}} - U_{\text{ПС2}} = I_m \sin \varphi_1 . \quad (16)$$

Таким образом, выходной сигнал данного преобразователя представляет постоянное напряжение, что практически исключает частотную фильтрацию.

Недостатком данного преобразователя является достаточно высокая сложность, так как требуется применение аналоговых перемножителей, стабилизатора синусоидального напряжения.

По результатам анализа для повышения чувствительности могут применяться резервная защита, реагирующая на разность модулей токов фаз, самонастраивающаяся защита, реагирующая на прорастание тока, преобразователь реактивной мощности на измерение приращения реактивного тока. Наиболее оптимальным является вариант [2] – защита, реагирующая на приращение токов. Это устройство проще использовать в эксплуатации, оно имеет расширенный функционал и возможность исключить ложные срабатывания. Целесообразно использовать на линиях с малым самозапуском.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АПВ – автоматическое повторное включение;

ВЛ – воздушная линия;

КЗ – короткое замыкание;

ОАПВ – однофазное автоматическое повторное включение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубинчик, В.А. Резервирование отключений коротких замыканий в электрических сетях / В.А. Рубинчик. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 120 с.

2. Шабад, М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей / М.А. Шабад. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1981. –136 с.

3. Клецель, М.Я., Никитин, К.И. Анализ чувствительности резервных защит распределительных сетей энергосистем / М.Я. Клецель, К.И. Никитин. – Электричество, № 2.

4. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2016.

УДК 621.28

АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЭС

Д.Е. Широбоков, Д.С. Янина – магистранты
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведено исследование статистических отказов трансформаторов ЛЭС за период с 2012 по 2017 гг. после ввода их в эксплуатацию. Проанализированы методики оценки надежности электрооборудования, а именно интенсивность отказов и наработка на отказ на примере трансформаторов 6-10 кВ ЛЭС. По результатам исследования получены конкретные числовые значения и установлен закон распределения для показателей надежности по критериям: интенсивность отказов и наработка на отказ по количеству трансформаторов и по времени эксплуатации. Полученные результаты рекомендуется учитывать при дальнейшей эксплуатации оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трансформатор, надежность, интенсивность, наработка, отказ, критерий.

Обеспечение надежности электрооборудования после длительной эксплуатации является актуальной проблемой. Срок службы трансформаторов определяется конкретными режимами работы и условиями эксплуатации. Средний срок службы оценивается в 45-50 лет. Основными причинами отказов трансформаторов являются:

1) нарушение изоляции обмоток вследствие воздействия внешних и внутренних перенапряжений, сквозных ТКЗ, дефектов изготовления. Причинами повреждения изоляции обмоток трансформаторов является износ и старение ее вследствие перезагрузок, недостаточного охлаждения, также выходят из строя вследствие повреждения устройств, регулирующих напряжение;

2) повреждения вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции;

3) повреждение контактных соединений;

4) потеря масла.

Целью данного исследования является определение количества отказов как показателя надежности. Для решения задачи необходимо проанализировать методики оценки надежности оборудования, оценить показатели надежности в виде интенсивности отказов оборудования на примере трансформаторов 6-10 кВ ЛЭС, установить закон распределения отказов.

Новизна данной статьи заключается в том, что впервые будет исследовано и оценено по показателям надежности электрооборудование ЛЭС.

Для статистического анализа были взяты 329 ТП-6-10/0,4 кВ со сроком эксплуатаций от 20 до 30 лет. Данные по статистике представлены в табл. 1 за последние 6 лет. За это время было зафиксировано 198 отказов, при этом капитального ремонта требовали 15 % трансформаторов, а ремонта отдельных узлов – 23 %.

Расчетные формулы для оценки показателей надежности:

$$\lambda_{i,n} = \frac{m_i}{\Delta n_i m}; \quad \lambda_{i,n_{\text{ср}}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} n_i m}{10};$$

$$T_{i,n} = \frac{1}{\lambda_{i,n}}; \quad T_{i,n_{\text{ср}}} = \frac{1}{\lambda_{i,n_{\text{ср}}}}, \qquad (1)$$

где m_i – число отказов на количество трансформаторов; Δn_i – число трансформаторов; m – число отказов за период 2012-2017 гг.; $\lambda_{i,n}$ – интенсивность отказов по количеству трансформаторов; $T_{i,n}$ – наработка на отказ по количеству трансформаторов.

Полученные расчётные оценки показателей надежности по количеству трансформаторов сведены в табл. 2.

$$\lambda_{i,n_{ср}} = 0{,}00345; \quad T_{i,n_{ср}} = 289 .$$

Расчетные формулы для оценки показателей надежности по годам эксплуатации:

$$\lambda_i = \frac{m_i}{\Delta t_i}; \quad \lambda_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{6} \lambda_i}{6\Delta t_i};$$

$$T_i = \frac{1}{\lambda_i}; \quad T_{ср} = \frac{1}{\lambda_{ср}}, \qquad (2)$$

где m_i – число отказов в i-м году эксплуатации; Δt_i – 1 год эксплуатации $T_{эксп} = \Delta t_i = 8760$ ч; λ_i – интенсивность отказов, полученная на каждом году эксплуатации; T_i – наработка на отказ, полученная по каждому году эксплуатации.

$$\lambda_{i\,сн} = \frac{\sum m_i}{\sum \Delta t_i}, \qquad (3)$$

где $\lambda_{i,сн}$ – оценка интенсивности отказов, полученная с учетом накопления как по отказам, так и по наработке.

Полученные расчётные оценки показателей надежности по годам эксплуатации сведены в табл. 3. $\lambda_{i,ср} = 0{,}00375$; $T_{i,ср} = 266$.

Таблица 1

Статистика отказов трансформаторов ТМ 6-10/0,4 кВ за 2012-2017 гг.

Мощность трансформаторов, кВт	Количество трансформаторов	Количество отказов по годам						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	Сумма
25	8	0	1	0	2	0	0	3
40	15	1	3	2	0	0	4	10
63	26	3	0	5	1	6	1	16
100	81	15	3	7	23	1	0	49
130	2	0	1	0	0	1	0	2
160	54	8	3	4	6	0	14	35
180	5	0	0	1	1	1	0	3
250	54	4	7	0	15	7	2	35
320	7	1	2	1	0	1	1	6
400	44	4	3	5	10	11	6	39
–	329	36	23	25	58	28	28	198

Таблица 2

Исходные статистические данные для проверки закона распределения по количеству трансформаторов

Δn_i	m_i	$\lambda_{i,n}$	$T_{i,n}$
8	3	0,0019	526
15	9	0,0030	333
26	16	0,0031	322
81	49	0,0031	322
2	2	0,0051	196
54	35	0,0033	333
5	3	0,0030	303
54	35	0,0033	333
7	6	0,0043	232
44	39	0,0044	227

Таблица 3

Исходные статистические данные для проверки закона распределения погодам эксплуатации

Δt_i	m_i	$m_{i\,сн}$	λ_i	$T_{i,n}$	$\Sigma\Delta t_i$	$\lambda_{iсн}$	$T_{i,n}$
8760	36	36	0,0041	243	8760	0,0041	243
8760	23	59	0,0026	384	17520	0,0033	303
8760	25	84	0,0028	357	26280	0,0031	322
8760	58	142	0,0066	152	35040	0,0041	343
8760	28	170	0,0032	313	43800	0,0038	263
8760	28	198	0,0032	313	52560	0,0038	263

По результатам полученных оценок интенсивности отказов по количеству трансформаторов и годам эксплуатации построены графики изменения интенсивности отказов, представленные на рис. 1-3. Из графиков видно, что интенсивность отказов как по количеству трансформации, так и по их годам эксплуатации подчиняется экспоненциальному закону распределения.

Для проверки используется критерий хи-квадрат χ^2.

Тогда вероятность безотказной работы по количеству трансформаторов будет определяться по формуле

$$P_i(n_i) = \exp(-\lambda_i n_i), \qquad (4)$$

где n_i – количество трансформаторов.

Аналогично вероятность безотказной работы по времени эксплуатации определяется по формуле

$$P_i(t_i) = \exp(-\lambda_i t_i), \qquad (5)$$

где t_i – время эксплуатации.

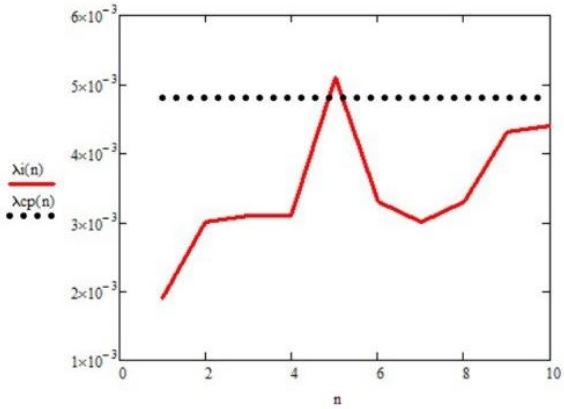


Рис. 1. График интенсивности отказов по количеству трансформаторов

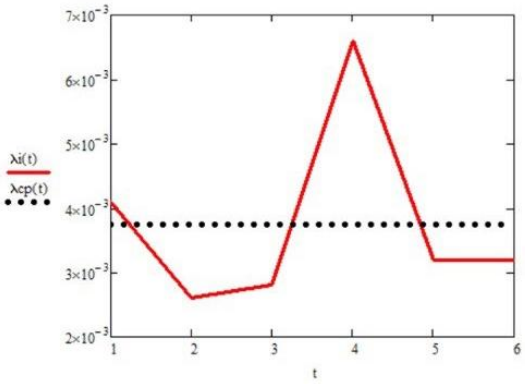


Рис. 2. График интенсивности отказов по годам эксплуатации

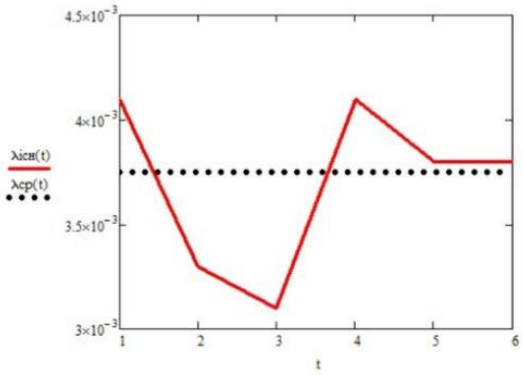


Рис. 3. График интенсивности отказов по годам эксплуатации с накоплением

Если предположительно отказы распределены по экспоненциальному закону, то оценка интенсивности отказов по количеству трансформаторов составит

$$\lambda_N = \frac{m}{N} = \frac{198}{329} = 0{,}602.$$

Оценка интенсивности отказов по годам эксплуатации

$$\lambda_T = \frac{m}{T} = \frac{198}{8760} = 0{,}0022.$$

Критерий хи-квадрат может использоваться для проверки допущения о любом распределении, даже если неизвестны параметры распределения. Но он нечувствителен к обнаружению адекватной модели, когда число наблюдений невелико.

Для применения его полученные данные группируют по интервалам частот и сравнивают с ожидаемым числом наблюдений для принятого распределения. На основании сравнения вычисляют критерий, приближенно следующий χ^2 – распределению тогда, когда модель выбрана правильно. В противном случае значение критерия превысит значение случайной величины, распределенной по закону χ^2. Для оценки правильности модели используются численные значения, приведенные в [2]. Эту проверку проводят в несколько этапов:

1) находят оценки неизвестных параметров принятого распределения, при этом могут использоваться различные методы их нахождения;

2) разделяют полученные данные на k интервалов и определяют вероятность попадания

случайной величины в каждый интервал. Можно воспользоваться двумя способами разделения статистических данных на интервалы. Первый состоит в том, что полученные данные делят так, чтобы в каждый интервал попадало не менее пяти наблюдений. Если в каком-либо интервале число наблюдений будет меньше, то его объединяют с соседним, так чтобы ожидаемое число наблюдений в объединенном интервале было не меньше пяти. Вероятность попадания случайного наблюдения определяют по формуле

$$P\left(\underline{x_i} \le x \le \overline{x_i}\right),\ i = 1, 2, \ldots, k, \qquad (6)$$

где $\underline{x_i}$ – нижняя граница i-го интервала; $\overline{x_i}$ – верхняя граница; k – число интервалов. Для нахождения этой вероятности используется принятое распределение с использованием оценок параметров.

Когда число наблюдений n велико, то число интервалов можно найти по формуле приближенно:

$$k = 4 \cdot \left(0{,}75 \cdot (n-1)^2\right)^{1/5}. \qquad (7)$$

Границы интервала $x_1, x_2, \ldots, x_k$ определяют с помощью теоретического распределения с использованием следующих значений оценок параметров:

$$P(x \le x_1) = \frac{1}{k},\ P(x \le x_2) = \frac{2}{k},$$

$$P(x \le x_{k-1}) = \frac{k-1}{k}. \qquad (8)$$

Нижняя граница первого интервала и верхняя граница последнего интервала являются наименьшим и наибольшими значениями, которые может принимать случайная величина. Границы интервалов установлены так, что для каждого вероятность попадания случайной величины в него оценивается в $1/k$;

3) умножают каждую вероятность попадания наблюдений в интервал на объем n выборки. Получают математическое ожидание E_i числа наблюдений в каждом интервале для принятой теоретической модели. Для второго метода

$$E_i = \frac{n}{k},\ i = 1, 2, \ldots, k; \qquad (9)$$

4) подсчитывают число наблюдений в каждом интервале и обозначают его M_i, где $i = 1, 2, \ldots, k$;

5) вычисляют критерий

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\lambda} (M_i - E_i)^2. \qquad (10)$$

При использовании второго метода деления интервалов выражение (10) упрощается:

$$\chi^2 = \frac{k}{n}\left(\sum_{i=1}^{\lambda} M_i\right)^2 - n; \qquad (11)$$

6) сравнивают вычисленные значения χ^2 с табличным из [2] для заданного уровня γ и числа степеней свободы $m = k - r - 1$, где r – число параметров принятого теоретического распределения. Если вычисленное значение χ^2 превышает его табличное значение для $\gamma = 0{,}95$, то полученные данные удовлетворяют принятому распределению с вероятностью γ в пределах от 0,5 до 0,999.

Для проверки гипотезы об экспоненциальном законе распределения с помощью критерия χ^2 разобьём суммарное число трансформаторов и суммарное число лет эксплуатации на интервалы в порядке возрастания от $n_1 < n_2 < \ldots < n_k$ и $t_1 < t_2 < \ldots < t_k$, где k – число интервалов (табл. 2 и 3).

Используя формулу (9), получаем значение критерия $\chi^2 = 30{,}25$ (по количеству трансформаторов). Табличное значение для $\gamma = 1 - \alpha$ и числа степеней свободы $m = k - r - 1 = 10 - 1 - 1 = 8$ равно $\chi^2 = 29{,}6$. Следовательно, $30{,}25 > 29{,}6$, значит, $\alpha = 0{,}001$, а $\gamma = 1 - 0{,}001 = 0{,}999$.

Аналогично проводим расчёт для критерия χ^2 по годам эксплуатации.

Получаем, что $36{,}23 > 19{,}31$, следовательно, $\alpha = 0{,}001$, а $\gamma = 1 - 0{,}001 = 0{,}999$.

ВЫВОДЫ

1. Анализ обработки статистических данных свидетельствует о том, что распределение отказов трансформаторов 6-10 кВ подчиняется экспоненциальному закону с параметрами: по количеству трансформаторов $\lambda_{i,n_{\text{ср}}} = 0{,}00345$, $T_{i,n_{\text{ср}}} = 289$, по времени $\lambda_{i,\text{ср}} = 0{,}00375$, $T_{i,\text{ср}} = 266$.

2. Распределение отказов по экспоненциальному закону подтверждено критерием

согласия хи-квадрат с достоверностью γ = 0,999.

3. Полученные оценки показателей надежности рекомендуется использовать при проектировании трансформаторов 6-10/0,4 кВ, и при их дальнейшей эксплуатации для поддержания оценок показателей надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Султанов, М.М. Оценка надежности, продление ресурса и оптимизация ремонта оборудования ТЭС и энергетических систем : учеб. пособие / М.М. Султанов. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском», 2016.

2. Султанов, М.М. Надежность и безопасность энергетики / М.М. Султанов. – 2017. – № 2. – С. 113-119.

3. Паспорт трансформаторов ТП 6-10/0,4 кВ ОАО «МРСК Юга» «Волгоградэнерго».

4. Перечень отказов трансформаторов ТП ТП 6-10/0,4 кВ ОАО «МРСК Юга» «Волгоградэнерго» за 2012-2017 гг.

5. Труханов, В.М. Надежность в технике / В.М. Труханов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО Издательский дом «Спектр», 2017.

УДК 621.7

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ТРЁХФАЗНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Д.М. Дубровин – магистрант
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Трёхфазные электродвигатели переменного тока получили широкое распространение во всех отраслях. Ни одно современное производство не обходится без применения трёхфазных электродвигателей, поэтому оптимизация потерь в трёхфазных электродвигателях очень актуальна. Это влияет не только на снижение себестоимости производимой продукции, но и на экологию и систему электроснабжения в целом, потому что более 50 % всей электроэнергии потребляют электродвигатели.

ВВЕДЕНИЕ

Предлагается оптимизировать потери в трёхфазных электродвигателях за счёт изменения схемы укладки обмотки в пазы статора, без ухудшения технических характеристик.

Для оптимизации потерь в трёхфазном электродвигателе переменного тока предлагается изменить схему намотки обмотки статора.

В предлагаемой модели статор электродвигателя содержит три однофазных двухслойных обмотки, то есть катушки полюса фазы заменены на расщепленные катушки на две части ровно пополам по количеству витков и уложены в пазы статора таким образом, чтобы не нарушить общую конфигурацию вращающегося магнитного поля, что позволяет применить данную технологию для электродвигателей с любым количеством пазов статора и любым количеством пар полюсов. Конструктивно двухслойная обмотка выполняется с меньшим пазовым шагом (распределяется более равномерно по всем пазам статора), что улучшает форму магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, и при этом подавляются высшие гармоники кривой ЭДС, что позволят минимизировать магнитные потери между обмоткой статора и ротором, а также искажения формы, падение напряжения питающей сети. При этом улучшается плавность хода на более низких частотах работы, снижается величина шумов, нагрева и вибраций электродвигателя. Увеличивается жесткость скоростной характеристики электродвигателя, увеличивается вращающий момент на валу электродвигателя, повышается устойчивость к опрокидыванию и увеличивается КПД электродвигателя до 10 %.

Данный вид обмотки может выполняться автоматизировано, так как шаг намотки и количество витков всех частей обмоток одинаковы, только меняется направление намотки витков обмоток. При намотке двухслойной обмотки с укороченным шагом трёхфазного электродвигателя переменного тока уменьшается длина вылета лобовых частей, что приводит к сокращению длины активной части машины и потерь энергии в обмотке.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С РАСЩЕПЛЁННОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ОБМОТКОЙ

Момент M можно определить по следующей формуле:

$$M = \frac{3}{2} p \frac{K_r}{L_s \sigma} \left(\psi_s i_s \right),$$

где p – число пар полюсов; $K_r = \frac{L_m}{L_s}$ – коэффициент связи обмотки ротора с обмоткой статора; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$, где L_s – индуктивное сопротивление обмотки статора; L_r – индуктивное сопротивление обмотки ротора.

В итоге получаем систему из четырех уравнений, которая описывает электромеханические преобразования в электродвигателе:

$$U_s = \frac{d\psi_s}{dt} + i_s R_s;$$

$$0 = \frac{\psi_k}{dt} + i_r R_r;$$

$$j\frac{d\omega}{dt} = M - M_c;$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{K_r}{L_s \sigma}(\psi_s i_s).$$

В неподвижной системе координат вещественная ось обозначается как ось α, а мнимая – как ось β.

Используя уравнения электромагнитных связей, выразим токи через потокосцепления в виде

$$i_s = \frac{L_r\psi_s - L_m\psi_r}{L_r L_s - L_m^2} i_r = \frac{L_s\psi_r - L_m\psi_s}{L_r L_s - L_m^2},$$

где ψ_s и ψ_r – потокосцепления обмоток, соответственно, статора и ротора; L_m – индуктивное сопротивление магнитопровода электродвигателя.

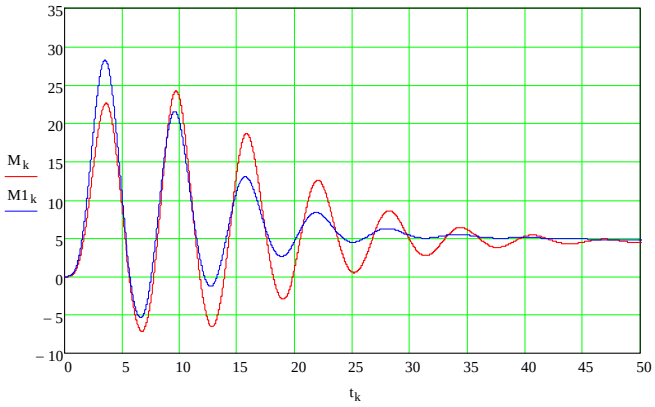


Рис. 1. Зависимость электромагнитного момента от времени двигателя со стандартной схемой обмотки $M_k = f(t)$ и зависимость частоты вращения вала двигателя с изменённой схемой обмотки $M_{1k} = f(t)$.

В момент пуска двигателя, пока вал не разогнался до скорости, близкой к скорости вращения электромагнитного поля статора, в машине с короткозамкнутым ротором протекают пусковые токи. Эти токи обусловлены тем, что пока ротор неподвижен или его скорость невысока, он работает как трансформатор с короткозамкнутой вторичной обмоткой. В дальнейшем при наборе скорости частота пересечения электромагнитным полем статора обмотки ротора снижается, а следовательно, и снижается ЭДС, наводимая в обмотке ротора, и токи статора и ротора. Так как момент двигателя прямо пропорционален току статора, то и он снижается с увеличением частоты вращения вала. На рис. 2 видно, что на двигателе с изменённой схемой обмотки в первое время электромагнитный момент вращения на валу электродвигателя больше, а при увеличении частоты вращения происходит уменьшение момента, вследствие чего снижаются пусковые токи.

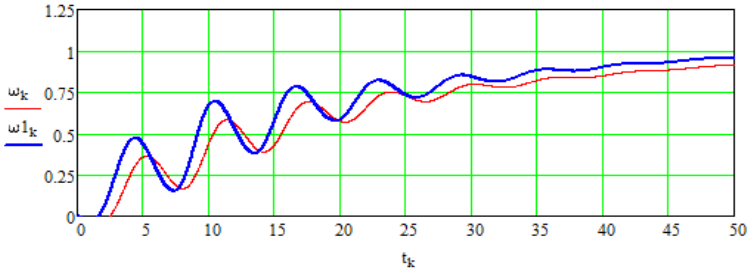


Рис. 2. Зависимость частоты вращения вала двигателя со стандартной схемой обмотки $\omega_к = f(t)$ и зависимость частоты вращения вала двигателя с изменённой схемой обмотки $\omega_{1к} = f(t)$

Скорость вращения ротора возрастает до уравновешивания момента двигателя и момента сопротивления привода.

На рис. 3 видно, что на двигателе с изменённой схемой обмотки быстрее увеличивается частота вращения, и он быстрее выходит на номинальные обороты вращения ротора.

Механическая характеристика двигателя с изменённой схемой обмотки больше при начале вращения ротора из неподвижного состояния.

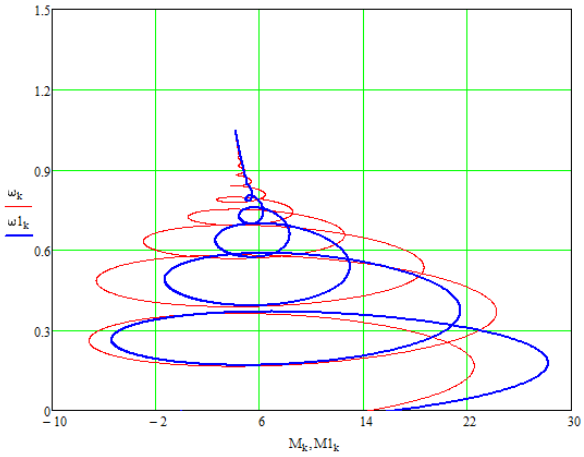
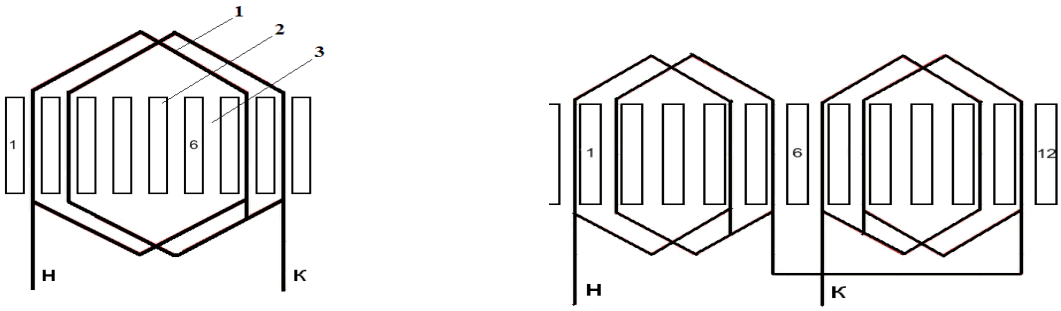


Рис. 3. Механическая характеристика двигателя со стандартной схемой обмотки $\omega_k = M_k(t)$ и механическая характеристика двигателя с изменённой схемой обмотки $\omega_{1k} = M_{1k}(t)$



а *б*

Рис. 4. а) Стандартная катушка (схема 1-7).
Общий вид: 1 – обмотка; 2 – статор; 3 – паз статора; Н – начало обмотки; К – конец обмотки
б) Расщеплённая катушка (схема 1-5). Н – начало обмотки; К – конец обмотки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При такой схеме укладки обмотки статора можно оптимизировать потери трёхфазного электродвигателя переменного тока до 10 %, а также улучшить электромеханические характеристики электродвигателя.

Данную схему можно применять как на уже существующих моделях электродвигателей при проведении капитальных ремонтов или выходе (повреждении) из строя электродвигателей, так и на вновь выпускаемых электродвигателях.

СПИСОК ЛЕТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг, О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг. – М.: Высшая школа, 2001. – 512 с.

2. Митрофанов, С.В. Дифференциальные уравнения асинхронной машины в фазной системе координат / С.В. Митрофанов, Н.Г. Никиян, Д.В. Сурков // Всерос. науч.-практ. конф. «Интеграция науки и практики в профессиональном развитии педагога». – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. – С. 2583-2594.

3. Архипцев, Ю.Ф., Котеленец, Н.Ф. Асинхронные электродвигатели / Ю.Ф. Архипцев, Н.Ф. Котеленец. – 2-е изд., перераб. и доп. . – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 104с.: ил.

4. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов втузов / А.И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

УДК 681.5

СТРУКТУРА САР ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Б.Г. Севастьянов – доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Автор предлагает структуру САР повышенной надёжности, что важно в энергетике, атомной промышленности, в нефтехимии и нефтепереработке. Подробное изложение затронутых вопросов можно найти в приведённом списке литературы [1-20].

ВВЕДЕНИЕ

Автор обращает внимание, что разработка и реализация надёжного регулятора требует знания особенностей ОУ [2-8, 16]. Надёжность системы повышается за счёт дополнительных функций, реализуемых программно [5, 15-18]. При разработке структуры регулятора необходимо знать специфику технологического процесса, учитывать вероятные сбои и отказы измерительного канала (канал ввода значения регулируемой переменной) и канала регулирования [17]. Кроме того, следует учитывать человеческий фактор, например ошибочный некорректный ввод задания (канал ввода задания) [4]. Рассматривается структура комбинированного регулятора с защитами по всем каналам, с безударными переключениями режимов управления как по отклонению, так и по каналу возмущения [14, 16].

1. МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

1.1. Передаточная функция ОУ

Допустим, что ОУ – стационарный, линейный, который можно аппроксимировать апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием. Передаточную функцию или характер ОУ выявляют активным экспериментом: подачей ступенчатого воздействия. Ступенька – это теоретическая абстракция математиков, которую физически реализовать невозможно. Фактически мы имеем входное воздействие в виде развёртки. Поэтому необходимо оценить допустимую погрешность реакции ОУ на сигнал развёртки, которую принимают за ступеньку [9]. Из этого анализа делают вывод: реакцию объекта на развёртку принимать как на ступеньку или необходимо провести преобразования полученной характеристики к реакции объекта как бы на ступеньку.

Если переходную характеристику ОУ представляют апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием, то для нахождения постоянной времени T и коэффициента усиления K целесообразно использовать методику получения переходной функции по двум точкам, а не проведением касательной в начальной точке [12], где помеха соизмерима с полезным сигналом. При этом точки на переходной характеристике выбирают на участке, где явно виден характер поведения ОУ [2]. Передаточную функцию чистого запаздывания $e^{-p\tau}$ достаточно представить в виде двух членов ряда Пада [7]:

$$e^{-p\tau} \approx \frac{\tau^2 p^2 - 6\ p\ \tau + 12}{\tau^2 p^2 + 6\ p\ \tau + 12}$$

или эту передаточную функцию представим в виде дифференциального уравнения

$$\frac{d^2}{dt^2}(Y - X) = -\frac{6}{\tau}\cdot\frac{dx}{dt} + \frac{12}{\tau^2}\cdot x - \frac{6}{\tau}\cdot\frac{dy}{dt} - \frac{12}{\tau^2}\cdot y.$$

Необходимо использовать методику решения дифференциального уравнения на микропроцессорном контроллере, аналогичную той, которая применялась на аналоговых вычислительных машинах [1, 19].

Комплексная величина $p = j\omega$ [12, с. 64]. Во временной области этой же буквой p обозначают символ дифференцирования:

$p = d/dt$ [3].

Допустим, передаточная функция ОУ имеет следующий вид:

$$W1(p) = \frac{K}{Tp+1} e^{-p\tau}.$$

1.2. Защита САР от сбоя или отказа измерительного канала

Блок контроля на достоверность аналоговой информации или блок защиты выявляет сбои (выброс или провал сигнала) и отказ измерительного канала (обрыв или «замирание» сигнала). На рис. 1 показаны вероятные ситуации по аналоговому каналу. X – сигнал до проверки на достоверность. $X1$ – после блока проверки на достоверность. Задача этой проверки является не пропустить ложный (недостоверный) сигнал в систему контроля и регулирования. Программная реализация блока защиты по аналоговому каналу приведена в работах [15-17]. Ситуация I соответствует обрыву в измерительном канале. При обрыве значение сигнала будет меньше нуля, если на вход контроллера поступает токовый сигнал от 4 до 20 мА. Для токовых сигналов от 0 до 5 мА или от 0 до 20 мА в момент обрыва сигнал отличается от нуля на величину смещения АЦП. Ситуация II представляет случайный выброс. Ситуация III представляет случайный провал сигнала. «Замирание» сигнала – ситуация IV. Под «замиранием» сигнала понимается значительное уменьшение разброса значений относительно среднего значения сигнала (параметра). При «замирании» сигнал находится в технологических границах, но не отражает реальное изменение параметра ОУ. А – допустимое изменение параметра за время Δt. Разброс значений параметра оценивают по среднеквадратическому отклонению σ. В случае «замирания» уменьшается σ и изменяется частотный спектр сигнала, уменьшается взаимосвязь между параметрами процесса, которую оценивают по коэффициентам корреляции или взаимнокорреляционным функциям [8].

2. КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕГУЛЯТОР

На рис. 2 представлена структура комбинированного регулятора, в котором объединены два принципа регулирования: по отклонению и по возмущению.

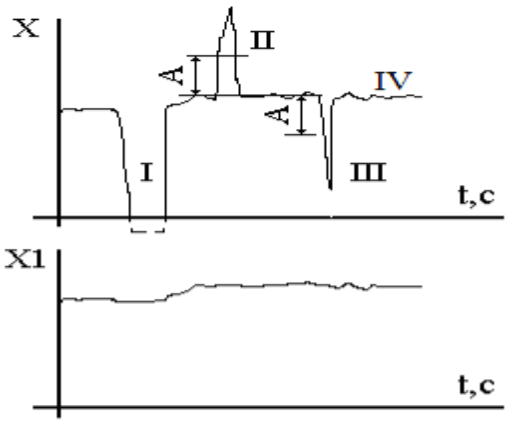


Рис. 1. Иллюстрация сбоя или отказа измерительного канала

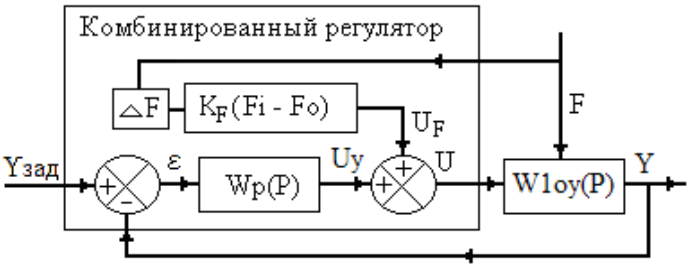


Рис. 2. Структура комбинированного регулятора

F – возмущение; F_i – текущее значение контролируемого возмущения; F_0 – начальное (базовое) значение возмущения, которое формируется в момент включения регулятора или перехода из ручного режима в автоматический; U_x – выход регулятора по отклонению; U_F – выход регулятора по возмущению; U_y – выход регулятора по отклонению; K_F – коэффициент компенсации возмущения F; F_0 – начальное (базовое) значение контролируемого возмущения перед включением регулятора в автоматический режим; Y – регулируемая величина; $Y_{зад}$ – значение задания регулятору; $W_p(p)$ – передаточная функция регулятора; $W1_{оу}(p)$ – передаточная функция объекта управления.

Например, при регулировании температуры воды (Y) на выходе теплообменника возмущением можно считать изменение расхода холодной воды перед теплообменником. То есть возмущением F является расход холодной воды, а точнее – произведение расхода на температуру жидкости и на её теплоёмкость.

Безударность перехода с ручного режима управления на автоматический – как по каналу отклонения, так и по каналу контролируемого возмущающего воздействия. В ручном режиме базовое значение F_0 формируется в момент включения регулятора в автоматический режим, и оно равно текущему значению возмущения $F_0 = F_i$. В автоматическом режиме значение управления по возмущению будет определяться по формуле: $K_F (F_i - F_0)$. В ручном режиме работы включается режим слежения по обоим каналам: по каналу отклонения $Y_{зад} = Y_i$ и по каналу возмущения $F_0 = F_i$. По каналу отклонения и возмущения устанавливается своя зона нечувствительности (ΔY и ΔF). Величина зоны нечувствительности зависит от погрешности измерительного канала и может быть оценена по формуле $\Delta Y \approx 3\sigma_y$; $\Delta F \approx 3\sigma_F$, где σ_y – погрешность измерительного канала; σ_F – погрешность контролируемого возмущения.

Если модуль рассогласования и модуль отклонения возмущения от базового значения меньше зоны нечувствительности, то рассогласование равняется нулю и сигнал регулирования не изменяется.

Безударность при отключении регулятора и переходе на ручной режим регулирования обеспечиваются запоминанием в регуляторе последнего сигнала регулирования и сохранением его значения, относительно которого оператор может изменять положение исполнительного механизма.

Рассмотрим ситуацию, которая может привести к возникновению удара. Это ступенчатое изменение задания регулятору. Например, при регулировании расхода жидкости недопустимо резкое прикрытие отверстия между седлом и затвором исполнительного механизма.

При ступенчатом уменьшении задания ПИ-регулятору исполнительный механизм начнёт сразу отрабатывать пропорциональную и интегральную составляющие. Резкое перекрытие потока жидкости может вызвать гидравлический удар. Рассмотрим другой случай: регулирование соотношения газ/воздух перед горелкой газовой печи. Резкое увеличение расхода воздуха может привести к срыву пламени после горелки. С целью исключения таких моментов следует предусмотреть в ПИ-регуляторе возможность плавного изменения задания регулятору. При этом оператор вводит задание ступенчато, а система автоматически осуществляет плавный переход с одного задания на другое. В контроллере Р-130 этот признак назвали «динамической балансировкой» [11]. Признаки статической и динамической балансировки устанавливаются в алгоритме ЗДН. Автор обращает внимание на необходимость совершенствования библиотек алгоритмов промышленных контроллеров [15].

3. СТРУКТУРА РЕГУЛЯТОРА ПОВЫШЕННОЙ НАДЁЖНОСТИ

К вышеперечисленным возможностям комбинированного регулятора добавляется контроль и защита по каналам: по каналу ввода задания – защита от некорректного ввода задания Z, по каналу обратной связи и каналу возмущения (Y, F) – защита от обрыва, выброса или провала значения, по выходу регулятора – контроль отработки сигнала регулирования.

Команды переключения режимов (С):

РУЧ – ручной режим. Положение исполнительного органа изменяется оператором вручную: по месту или дистанционно;

ДИСТ – дистанционный режим регулирования;

АВТ – автоматический режим регулирования;

КАСК – каскадный режим регулирования;

ВКЛ – включить регулятор. Это состояние автоматически формируется, если выбран один из режимов: АВТ, КАСК;

F – контролируемое возмущение.

Крег – настройки регулятора: постоянная времени экспоненциального фильтра, зона нечувствительности, ограничения сигнала регулирования по минимуму и максимуму (могут формироваться автоматически в процессе регулирования), задание настроек ПИД – регулятора с возможностью ограничения изменения интегральной составляющей или её «замораживания» [6, 15], или обнуления [13]. Вводят значение погрешности измерительного канала, вероятную длительность выброса или провала сигнала, обрыва параметра, максимальную систематическую погрешность измерительного канала, величину смещения АЦП, допустимую величину А изменения сигнала за время цикла контроллера.

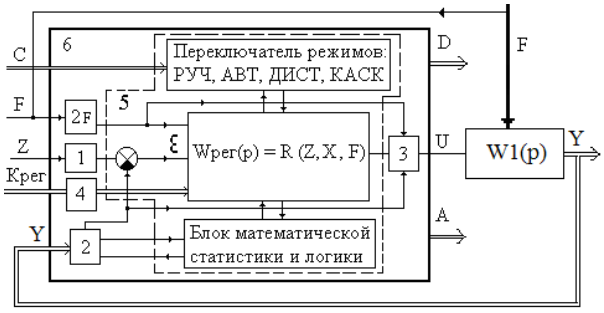


Рис. 3. Структура регулятора повышенной надёжности

1 – алгоритм защиты от некорректного ввода информации; 2 – алгоритм проверки на достоверность по каналу обратной связи, то есть по каналу регулируемой величины Y; 2F – алгоритм проверки на достоверность по каналу контролируемого возмущения F; 3 – алгоритм контроля отработки управляющего воздействия; 4 – алгоритм контроля корректности задания настроек регулятору; 5 – структура исходного регулятора; 6 – регулятор повышенной надёжности (с алгоритмами контроля и защиты); D – дискретные признаки состояния регулятора (включен, отключен, режим работы: АВТ, РУЧ, ДИСТ, КАСК); U – сигнал регулирования; A – сигнализация нарушений или аварийных ситуаций при регулировании; ⇒ – двойной линией обозначается векторная величина

Если по каким-либо причинам значение регулируемой переменной становится недостоверным, то автоматически формируется команда на переход регулятора в ручной режим.

Для ОУ повышенной опасности реализуется аппаратное дублирование измерительного и канала возмущения с автоматическим переключением на исправный канал [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценку параметров математической модели ОУ лучше получать из системы уравнений, полученным по точкам переходной характеристики. На практике ступенчатое воздействие физически нереализуемо, поэтому реакция ОУ идёт на развёртку. Для повышения надёжности измерительный канал дублируется (аппаратная часть). В контроллере реализована программа, которая автоматически выбирает и переключает на исправный канал. Предложена структура комбинированного регулятора повышенной надёжности, в котором реализованы безударные переключения из автоматического режима в ручной и обратно, как по каналу обратной связи, так и по каналу контролируемого возмущения. Предусмотрен плавный переход с одного задания на другое. Для ОУ с запаздыванием качество регулирования повышает упредитель Смита или другие системы упреждения. В случае выхода сигнала регулирования на ограничение останавливают изменение интегральной составляю-

щей, не допуская её насыщения. Надёжность и эффективность САР повышается, если при разработке программы придерживаться принципов программирования [18].

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОУ – объект управления;

ТАУ – теория автоматического управления;

САР – система автоматического регулирования;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

τ – время запаздывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, Б.В., Голубкин, В.Н. Аналоговые вычислительные машины / Б.В. Анисимов, В.Н. Голубкин. – М.: Высшая школа, 1971. – 448 с.

2. Балакирев, В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.

3. Бесекерский, В.А. Попов, Е.П. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – С. 55.

4. Гасов, В.М., Соломонов, Л.А. Организация взаимодействия человека с техническими средствами АСУ: кн. 1 «Инженерно-психологическое проектирование взаимодействия человека с техническими средствами» / В.М. Гасов, Л.А. Соломонов. – М.: Высшая школа, 1990.

5. Гласс, Р. Руководство по надежному программированию / Р. Гласс. – М.: Финансы и статистика, 1982.

6. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть I / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 2.

7. Догановский, С.А. Устройства запаздывания и их применение в автоматических системах / С.А. Догановский, В.А. Иванов. – М.: Машиностроение, 1966. – 280 с.

8. Ицкович, Э.Л., Трахтенгерц, Э.А. Алгоритмы централизованного контроля и управления производством / Э.Л. Ицкович, Э.А. Трахтенгерц. – М.: Советское радио, 1967. – 352 с.

9. Коровина, Е.В., Севастьянов, Б.Г. Вычисление переходной характеристики по реакции на развёртку / Е.В. Коровина, Б.Г. Севастьянов // Одиннадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых учёных и студентов, май-июнь. – ВФ МЭИ. – 2005. – С. 48-49.

10. Парр, Э. Программируемые контроллеры. Руководство для инженера / Э. Парр. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. – С. 180-185.

11. Певзнер, В.В. Микропроцессорный контроллер Ремиконт Р-130 / В.В. Певзнер, Н.В. Лахова, И.В. Никольская, Н. И. Прохорова. – М.: Ниитеплоприбор, 1990. – 330 с.

12. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 73.

13. Севастьянов, Б.Г. а.с. 1566318 СССР, МКИ G 05 B 11/00. Пропорционально-интегральный регулятор / Б.Г. Севастьянов. – № 4601819/24-24; Опубл. 23.05.90. Бюл. № 19, 1990. – Приоритет 02.11.88.

14. Севастьянов, Б.Г. Безударность и надёжность систем автоматического регулирования / Б.Г. Севастьянов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 1-4.

15. Севастьянов, Б.Г. Повышение качества библиотек промышленных контроллеров / Б.Г. Севастьянов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 1. – С. 37-46.

16. Севастьянов, Б.Г. Реализация законов аналогового регулирования на контроллерах : учебное пособие / Б.Г. Севастьянов. – Волжский: Филиал «МЭИ» в г. Волжском, 2014. – 158 с.

17. Севастьянов, Б.Г. Реализация на контроллере блока переключения на резервный канал / Б.Г. Севастьянов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – № 11. – С. 54-60.

18. Севастьянов, Б.Г., Севастьянов, Д.Б. Принципы программирования в АСУТП на языке FBD / Б.Г. Севастьянов, Д.Б. Севастьянов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – № 12. – С. 22-27.

19. Урмаев, А.С. Основы моделирования на АВМ / А.С. Урмаев. – М.: Наука, 1978. – 272 с.

20. Шубладзе, А.М. Интегральное насыщение в нелинейных режимах ПИ и ПИД-регуляторов / А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, В.А. Малахов, В.Р. Ольшванг и др. // Приборы и системы управления. Управление, Контроль, Диагностика. – 2008. – № 12. – С. 10-13.

УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ВОДОРОДНОМ ГЕНЕРАТОРЕ

А.В. Пивченко – аспирант
С.Б. Шевцова – магистрант
Г.Ф. Терентьев – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

В филиале ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском ведутся работы по разработке генератора водорода на основе гидролиза алюминия. В основу разработки положены патенты RU 2545290 и RU 2553885.

Данный генератор содержит вертикальный цилиндрический реакционный сосуд 1, магистраль подачи суспензии алюминиевого порошка 2, магистраль подачи водного щелочного раствора 3, магистраль вывода продуктов гидролиза 4, рис. 1. Сопловые вводы 5 реагентов расположены в верхней части реакционного сосуда и ориентированы тангенциально по отношению к оси реакционного сосуда. Благодаря такому их расположению в реакционном сосуде образуется вертикальный вихрь, который способствует интенсивному перемешиванию реагентов и смещению реакции в кинетическую область. В результате взаимодействия воды, едкого натра и алюминия образуется водород, который отбирается через магистраль вывода 6.

Алюминий подается в реакционный сосуд в виде суспензии, приготовленной из алюминиевого порошка и гелеобразной пасты на основе загустителя агар-агар.

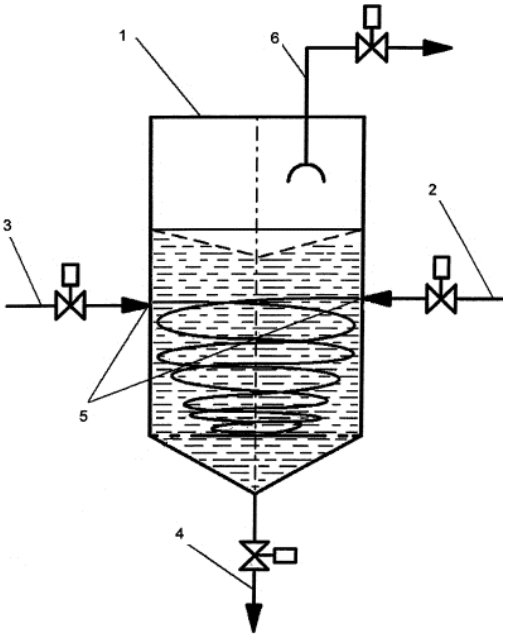


Рис. 1. Принципиальная схема водородного генератора

Процессы тепло- и массообмена, сопровождающие химическую реакцию выделения водорода, достаточно сложны для описания. Поэтому на первом этапе представляет интерес моделирование на основании трех идеальных базовых моделей: реактора идеального вытеснения, реактора идеального смешивания непрерывного действия, реактора идеального смешения периодического действия.

Моделирование на основе реактора идеального смешения периодического действия представляет приоритетный интерес, поскольку гипотезы и постулаты,

закладываемые в основу математической модели, да и сама модель могут быть достаточно просто проверены экспериментально. От реактора периодического действия будет проще перейти к реактору идеального вытеснения посредством преобразования временной координаты в пространственную.

Немаловажное значение имеет то, что первые испытания экспериментального исследовательского стенда во избежагие аварийной ситуации предполагается проводить в повторно-кратковременном режиме, а этот режим максимально близок к режиму работы реактора периодического действия. На данном этапе будем руководствоваться следующими предположениями и допущениями.

В основе работы реактора лежит химическая реакция:

$$2Al + 6H_2O + 2Na[Al(OH)_4] + 3H_2.$$

Принимаем форму частиц алюминия идеально сферической, а состав – монофракционным.

Работа реактора происходит при атмосферном давлении. Изменением давления по глубине пренебрегаем.

Считаем, что смешение реагентов происходит мгновенно в нулевой начальный момент времени.

Твердые и жидкие реагенты и продукты реакции равномерно распределены по всему объему реактора (выполняется принцип постоянства концентраций, характерный для реактора идеального смешения) и не выводятся за пределы реактора до момента окончания процесса.

Газообразные продукты реакции (водород) не подчиняются принципу постоянства концентраций (в противном случае водород просто не смог бы отводиться).

На скорость всплытия пузырьков не оказывают существенного влияния интенсивность перемешивания, концентрация частиц алюминия, концентрация твердых продуктов реакции, концентрация щелочи. Интенсивность перемешивания такова, что обеспечивает протекание реакции в кинетической области. Пузырьки содержат как водород, так и водяные пары. Парциальное давление водяных паров соответствует температуре в зоне реакции.

При расчете температур, задаваясь теплоемкостью раствора реагентов в реакционном пространстве, пренебрежем теплоемкостью щелочи, будем принимать теплоемкость раствора, равной теплоемкости воды. Влиянием температуры на теплоемкость раствора также пренебрежем ввиду малости интервала возможного изменения температуры.

На скорость протекания реакции влияют температура и концентрация раствора щелочи. Будем считать, что концентрация твердых продуктов реакции (по мере ее нарастания) не влияет на скорость реакции.

Считаем, что загуститель, присутствующий в суспензии (агар-агар), в реакционном пространстве находится в ничтожном количестве и, таким образом, не влияет на скорость реакции.

Скорость всплытия пузырьков водорода определяется только размером пузырьков и плотностью и вязкостью жидкого раствора, плотностью самого водорода в пузырьке. Размер пузырьков определится давлением (то есть глубиной, на которой находится пузырек, а также плотностью и вязкостью жидкого раствора реагентов). Таким образом, скорость всплытия пузырька будет зависеть от глубины, температуры, концентрации реагентов. Теоретически эту зависимость определить будет довольно сложно. Пренебрежем этой зависимостью и будем считать таким образом, что на скорость всплытия пузырьков не оказывают существенного влияния интенсивность перемешивания, концентрация частиц алюминия, концентрация твердых продуктов реакции, концентрация щелочи. Будем считать эту скорость неизменной и постоянной, а величину этой скорости определим с помощью видеосъемки и раскадровки.

Работа генератора может сопровождаться образованием поверхностно активных веществ и пенообразованием, возникающим в результате взаимодействия жира, которым изготовитель покрывает частицы алюминия для предохранения от окисления и загустителя (агар-агар) со щелочью. Будем считать,

что концентрация поверхностно активных веществ мало влияет на скорость всплытия пузырьков.

Отвод тепла происходит только с продуктами реакции (водород, водяные пары). Отвод тепла через стенки аппарата отсутствует и происходит только с газообразными продуктами реакции.

Зависимость скорости реакции для алюминия от концентрации щелочи близка к линейной и ее можно достаточно точно выразить в виде

$$\gamma = k(c_{\mathrm{NaOH}})^m,$$

где m – показатель степени, близкий к единице; k – константа скорости химической реакции, которая будет зависеть от температуры.

Для выражения константы скорости химической реакции от температуры будем пользоваться законом Ван-Гоффа. Значения коэффициентов определим экспериментально.

Математическая формализация процесса осуществлена в приложении Matchad.

Основными входными параметрами являются: объем раствора щелочи, ее концентрация, начальная температура, количество загруженного алюминия, фракционный размер частиц.

Основными выходными параметрами являются: выход водорода (секундный), температура в реакторе, высота реакционного слоя.

Процесс разбивается на N элементарных актов, каждый из которых рассматривается протекающим при постоянных температуре и концентрации раствора. По истечении кванта разбиения времени $\Delta\tau$ температура и концентрация принимают новые значения, и просчитывается следующий элементарный акт.

Результаты расчета представляют собой матрицу $m_{i,j}$, где i – порядковый номер элементарного фрагмента времени; j – условный номер, который обозначает либо концентрацию раствора, либо температуру, либо средний радиус твердых частиц, либо суммарную площадь поверхности твердых частиц, либо изменение объема реакционной субстанции, вызванное насыщением раствора газообразными продуктами реакции и т. д. (всего 15 величин).

По результатам расчета могут быть построены зависимости скорости выделения водорода, скорости изменения концентрации щелочи и других продуктов реакции, скорости изменения температуры и т. д., рис. 2-4.

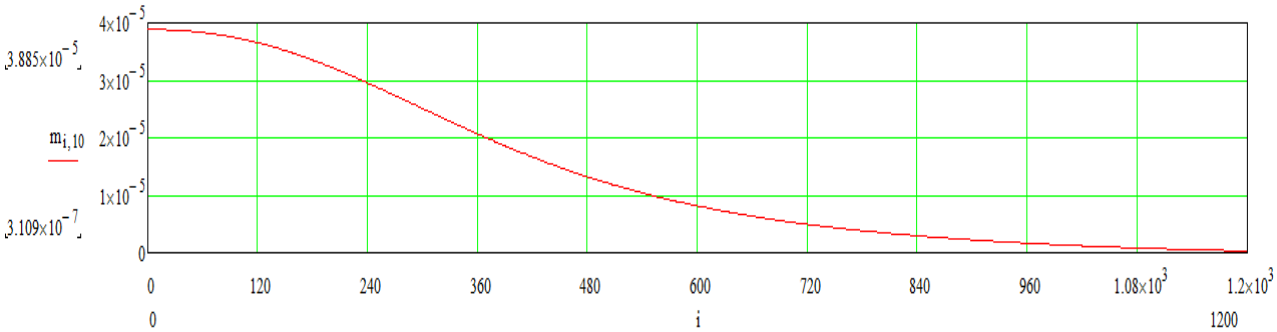


Рис. 2. График скорости выделения водорода

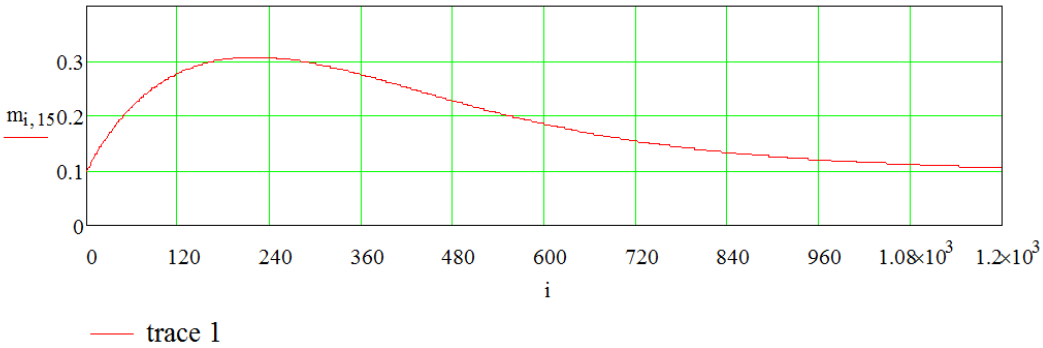


Рис. 3. График изменения уровня в реакторе

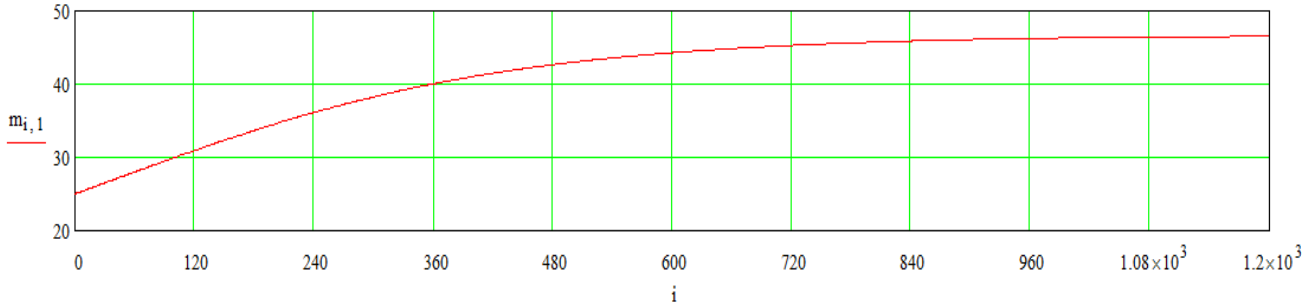


Рис. 4. График изменения температуры

Для проверки математической модели была проведена серия экспериментов. Реагенты загружались единовременно в реактор, снабженный мешалкой, и с помощью термоэлектрического преобразователя проводилось непрерывное измерение температуры (рис. 5).

На рис. 6 изображены графики изменения температуры, полученные в результате двух экспериментов, совмещенные с графиком, полученным в результате реализации математической модели. Их соответствие представляется удовлетворительным.

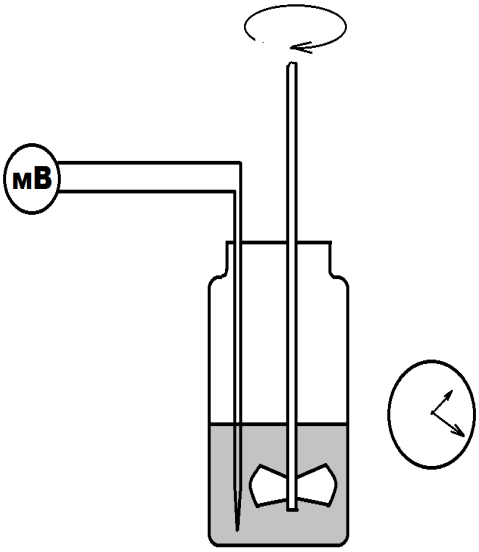


Рис. 5. Схема проведения эксперимента

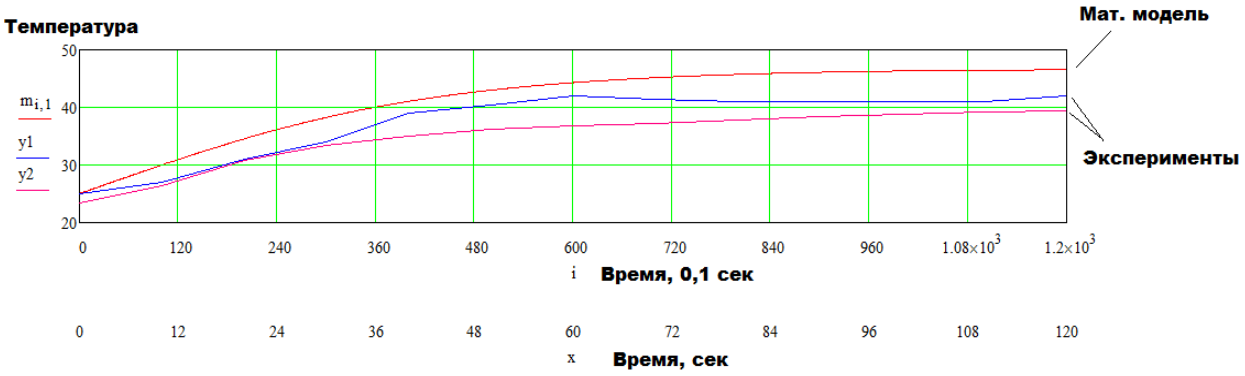


Рис. 6. Графики изменения температуры, полученные в результате двух экспериментов, совмещенные с графиком, полученным в результате реализации математической модели

УДК 62-523

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ Г. ВОЛЖСКОГО

Н.Н. Голишников – магистрант
С.А. Агринская – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье предложен алгоритм регулирования напора насосного агрегата, основанный на использовании частотного преобразователя, что позволяет значительно повысить энергоэффективность насосной станции. Проведенное математическое и имитационное моделирование системы управления насосной установки с помощью пакета прикладного программного обеспечения VisSim подтвердило работоспособность предложенного алгоритма регулирования напором насосной установки.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях постоянно растущих цен на топливно-энергетические ресурсы, дефицита средств в федеральном, областном и муниципальном бюджетах особую актуальность приобретает оптимизация энергопотребления и затрат на энергоносители.

Насосные системы являются одними из основных потребителей электроэнергии во многих отраслях промышленности. По некоторым оценкам, насосы потребляют около 20 % всей вырабатываемой электроэнергии. Поэтому вопрос энергоэффективности насосных систем является ключевым для экономики страны в целом.

1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Насосные станции представляют собой сложный электрогидравлический технический комплекс сооружений и оборудования, в котором осуществляется преобразование электрической энергии в механическую энергию потока жидкости и управление этим процессом преобразования.

Основным энергетическим элементом насосной станции является насосная установка, содержащая один или несколько насосов, всасывающую и нагнетательную систему трубопроводов, запорную арматуру, электропривод, а также датчики технологических параметров установки.

Анализ методов снижения энергопотребления в насосных системах показал, что простая замена насосов и двигателей позволяет снизить энергопотребление на 2-3 %, тогда как переход на более качественное регулирование увеличивает эту цифру до 60 %. Одним из таких методов является замена регулирования подачи задвижкой на регулирование частотным преобразователем.

В качестве объекта исследования в данной работе выбран насосный агрегат, состоящий из центробежного насоса и асинхронного двигателя.

1.1. Математическое описание центробежного насоса

Основными параметрами насоса являются напор и подача. Подачей Q называется объем жидкости, подаваемый насосом в единицу времени. Напор H определяется как разность содержания энергии в 1 кг жидкости (удельной энергии) на участке от входа в насос до выхода из него.

Насос и гидравлическая сеть – инерционные звенья, которые могут быть представлены апериодическим звеном первого порядка

$$W_{\text{нас}}(p) = \frac{k_{\text{нас}}}{T_{\text{нас}} p + 1}, \qquad (1)$$

где $T_{\text{нас}}$ – постоянная времени насоса.

Насос является нелинейной сложной системой, но при работе в малых отклонениях возможно линеаризовать его коэффициент передачи. Так как значение $T_{\text{нас}}$ = 0,001 с, то при синтезе системы столь малой постоянной

времени допустимо пренебречь и считать насос безынерционным звеном:

$$W_{нас}(p) = k_{нас}\,. \qquad (2)$$

Тогда структурную схему насоса в случае управления напором H возможно представить в следующем виде (рис. 1):

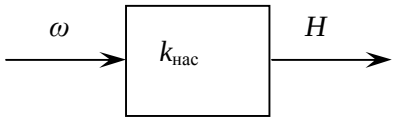


Рис. 1. Структурная схема насоса

По паспортным данным центробежного насоса 1Д315-71 выбираем H = 71 м;

$\omega_н = \pi\, n_{ном} = \pi \cdot 48{,}3 = 152$ с$^{-1}$, тогда

$$W_{нас}(p) = k_{нас} = 0{,}06\,. \qquad (3)$$

1.2. Математическая модель асинхронного двигателя

При математическом описании АД как объекта управления принимаются следующие допущения:

– намагничивающие силы обмоток двигателя распределяются строго синусоидально вдоль окружности воздушного зазора;

– потери в «стали» статора и ротора отсутствуют;

– обмотки статора и ротора строго симметричны со сдвигом оси на 120°;

– насыщение магнитной цепи отсутствует.

Поскольку при стабилизации напора система работает в малых отклонениях относительно рабочей точки стабилизации, возможно использование линейной модели асинхронного двигателя. Структурную схему линеаризованной модели асинхронного двигателя можно представить в виде модели, приведенной на рис. 2.

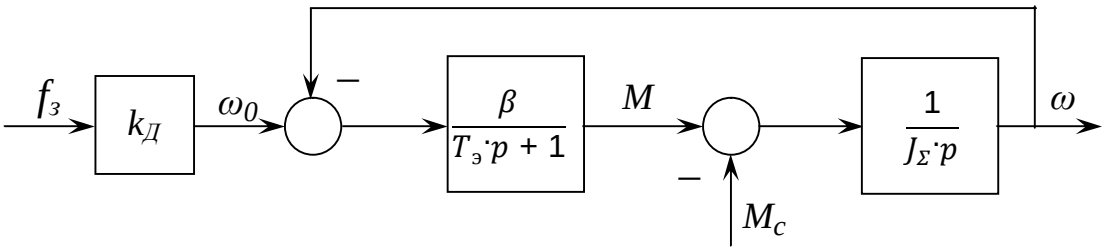


Рис. 2. Линеаризованная модель АД: $f_з$ – частота задания, Гц; $k_Д$ – коэффициент передачи двигателя; ω_0 – задающая круговая частота вращения, рад/с; β – жесткость линейного участка механической характеристики; $T_э$ – электромагнитная постоянная времени, с; M – механический момент двигателя, Н·м; J_Σ – суммарный, приведенный к валу двигателя, момент инерции, кг·м^2

Для асинхронного двигателя АИР280S2 передаточная функция выглядит следующим образом:

$$W_{АД}(p) = \frac{\dfrac{\beta k_д}{J_\sum (T_э p + 1)}}{1 + \dfrac{\beta k_д}{J_\sum\, p(T_э p + 1)}} = \frac{\beta k_д}{J_\sum T_э p^2 + J_\sum\, p + \beta} =$$

$$= \frac{k_д}{T_м T_э p^2 + T_м p + 1} = \frac{3{,}14}{52{,}6 p^2 + 6{,}6 p + 1}\,. \qquad (4)$$

1.3. Математическое описание частотного преобразователя

В состав преобразователя частоты со звеном постоянного тока входит управляемый выпрямитель, фильтр и автономный инвертор напряжения. При синтезе системы управления будем использовать линеаризованную модель преобразователя частоты, представленную на рис. 3.

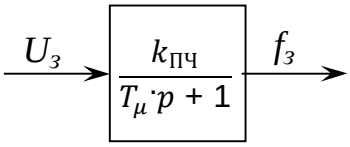


Рис. 3. Линеаризованная модель преобразователя частоты: $K_{ПЧ}$ – коэффициент усиления преобразователя частоты; $T_μ$ – постоянная времени ПЧ

Передаточная функция преобразователя частоты 3G3HV-B11K имеет вид:

$$W_{\text{П.Ч}}(p)=\frac{k_{\text{П.Ч}}}{T_{\mu}p+1}=\frac{3{,}125}{0{,}01p+1}. \qquad (5)$$

Таким образом, передаточная функция насосного агрегата имеет вид:

$$W(p)=W_{\text{П.Ч}}(p)W_{\text{АД}}(p)W_{\text{нас}}(p)=$$

$$=\frac{k_{\text{П.Ч}}}{T_{\mu}p+1}\frac{k_{\text{д}}}{T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2+T_{\text{м}}p+1}k_{\text{нас}}=$$

$$=\frac{3{,}125}{0{,}01p+1}\frac{3{,}14}{52{,}6p^2+6{,}6p+1}0{,}06=$$

$$=\frac{0{,}59}{(0{,}01p+1)(52{,}6p^2+6{,}6p+1)}.$$

2. СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ

Исследуемая система управления представляет собой одноконтурную систему с одним внешним контуром – контуром давления, структурная схема которой представлена на рис. 4.

Синтез контура регулирования давления проведем методом последовательной коррекции. Коррекция – это изменение частных характеристик с целью придания им желаемой формы. Она обеспечивается с помощью различных звеньев, вводимых в систему и называемых «корректирующим устройством». Регулятор – совокупность корректирующих устройств. С помощью корректирующих звеньев можно решить многие задачи: повышение запаса устойчивости, повышение точности регулировки, уменьшение влияния возмущений, улучшение качества устройств.

Передаточная функция разомкнутого контура системы регулирования, представленной на рис. 4, имеет вид:

$$W_{\text{р.с}}(p)=W_{\text{рег}}(p)W_{\text{оу}}(p), \qquad (6)$$

где

$$W_{\text{ОУ}}(p)=W_{\text{П.Ч}}(p)W_{\text{АД}}(p)W_{\text{нас}}(p)=$$

$$=\frac{k_{\text{П.Ч}}k_{\text{д}}k_{\text{нас}}}{(T_{\mu}p+1)(T_{\text{м}}T_{\text{э}}p^2+T_{\text{м}}p+1)}$$

– передаточная функция объекта управления.

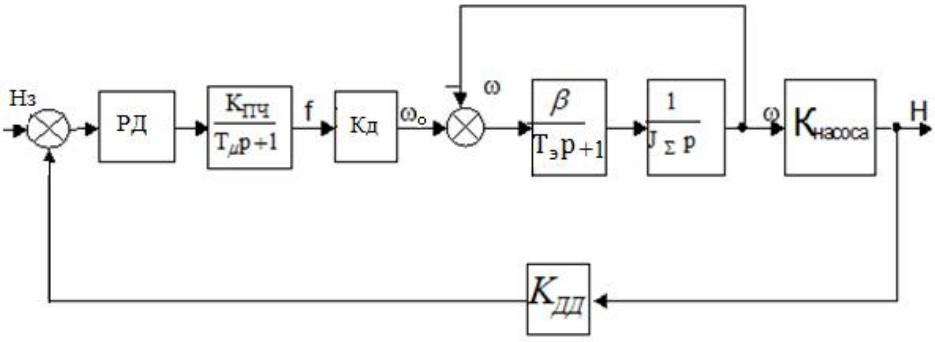


Рис. 4. Структурная схема системы управления насосной установкой:
РД – регулятор давления; $K_{\text{ДД}}$ – коэффициент обратной связи (по давлению)

Из формулы (6) найдем передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{рег}}(p)=\frac{W_{\text{р.с}}(p)}{W_{\text{ОУ}}(p)}. \qquad (7)$$

Для синтеза регулятора воспользуемся желаемой передаточной функцией разомкнутой системы $W_{\text{р.с}}(p)$, в которой скомпенсированы все большие постоянные времени объекта управления путем исключения их из контура регулирования. Кроме того, исключим из разомкнутого контура регулирования все коэффициенты усиления, а для устранения статической ошибки введем в него интегрирующее звено с малой постоянной времени.

Таким образом, исходный разомкнутый контур регулирования заменяем результирующим контуром, который имеет общий

коэффициент усиления, равный $\frac{1}{k_{дд}}$ ($k_{дд} = 0{,}225$ – коэффициент передачи датчика давления), но обладающий астатизмом первого порядка и обеспечивающий высокое быстродействие благодаря малости постоянных времени, оставшихся нескомпенсированными. То есть желаемая передаточная функция разомкнутой системы будет иметь следующий вид:

$$W_{р.с}(p) = \frac{\frac{1}{k_{дд}}}{\alpha_1 T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \qquad (8)$$

где α_1 – параметр, влияющий на перерегулирование. Для обеспечения перерегулирования ≤ 5 % этот параметр принимает значение 2.

Подставив (8) в (7), получим передаточную функцию регулятора

$$W_{рег}(p) = \frac{W_{р.с}(p)}{W_{ОУ}(p)} = \frac{\frac{\frac{1}{k_{дд}}}{2T_\mu p (T_\mu p + 1)}}{\frac{k_{П.ч} k_д k_{нас}}{(T_\mu p + 1)(T_м T_э p^2 + T_м p + 1)}} =$$

$$= \frac{(T_\mu p + 1)(T_м T_э p^2 + T_м p + 1)}{k_{дд} k_{П.ч} k_д k_{нас} 2T_\mu p (T_\mu p + 1)} = \frac{T_м T_э p^2 + T_м p + 1}{k_{дд} k_{П.ч} k_д k_{нас} 2T_\mu p},$$

где T_μ – малая нескомпенсированная постоянная времени.

Полученная передаточная функция является передаточной функцией пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора:

$$W_{рег}(p) = k_п + \frac{k_и}{p} + k_д p \qquad (9)$$

с соответствующими коэффициентами усиления: $k_п = \frac{T_м}{2k_{дд} k_{П.ч} k_д k_{нас} T_\mu} = 25{,}4$ – пропорциональной составляющей;

$k_и = \frac{1}{2k_{дд} k_{П.ч} k_д k_{нас} T_\mu} = 3{,}85$ – интегрирующей составляющей;

$k_д = \frac{T_м T_э}{2k_{дд} k_{П.ч} k_д k_{нас} T_\mu} = 200$ – дифференцирующей составляющей.

Подставив числовые значения коэффициентов усиления в (9), получаем искомую передаточную функцию регулятора:

$$W_{рег}(p) = 25{,}4 + \frac{3{,}85}{p} + 200p.$$

Проверку работоспособности полученного алгоритма управления насосной установкой проведем с помощью программного средства VisSim (рис. 5).

Проанализируем данную систему в следующих режимах: на холостом ходу ($M_с = 0$); при нагрузке, равной $M_с = 0{,}9M_н = 0{,}9 \cdot 707 = 636{,}3$ Н·м.

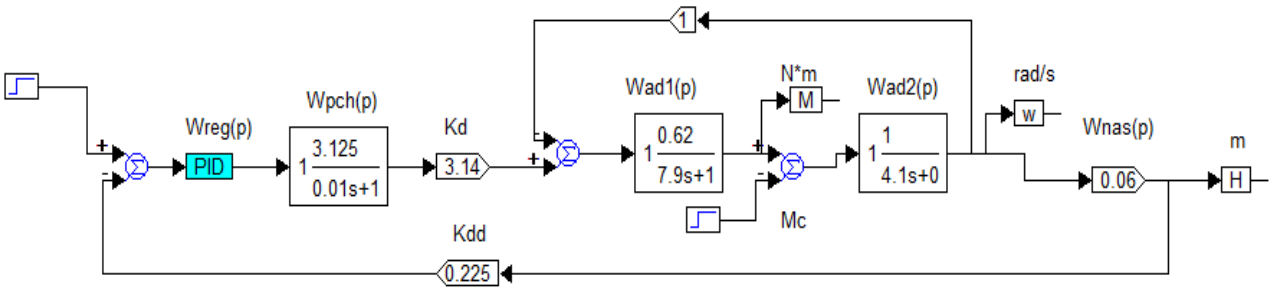


Рис. 5. Структурная схема системы регулирования напором насосной установки в VisSim

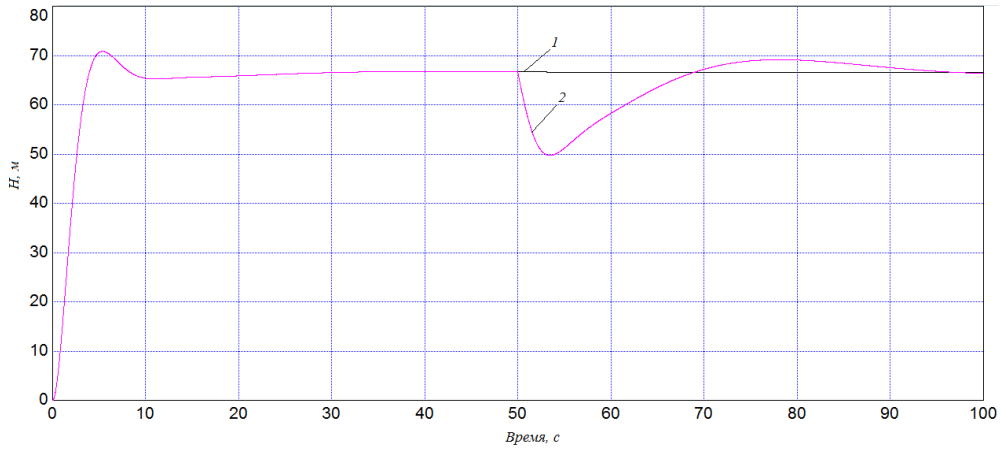


Рис. 6. График переходного процесса системы регулирования напора насосной установки: 1 – на холостом ходу; 2 – при нагрузке

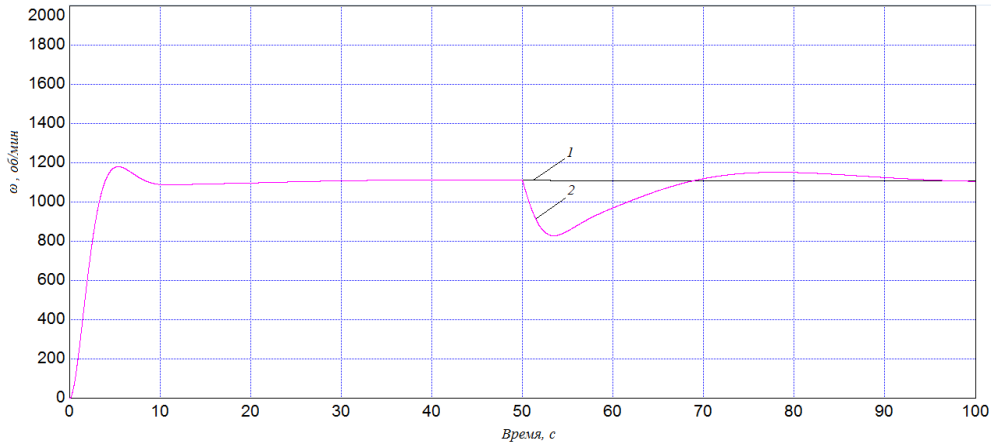


Рис. 7. График изменения скорости вращения асинхронного двигателя насосной установки: 1 – на холостом ходу; 2 – при нагрузке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование частотного преобразователя в данной системе регулирования позволяет значительно снизить энергопотребление как самой насосной установки, так и всей насосной станции в целом. Частотное регулирование в системах водоснабжения кроме экономии электроэнергии имеет и другие преимущества: плавный пуск и останов насосов, вследствие чего исключаются пусковые токи и гидроудары; повышение надежности системы, поскольку преобразователь частоты осуществляет защиту двигателя насоса при нештатных режимах работы; повышается возможность автоматизации насосной станции при дальнейшей необходимости.

УДК 697.34

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ В Г. ВОЛЖСКОМ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Е.Н. Целуйко – магистрант
М.М. Султанов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Действующие системы теплоснабжения спроектированы и построены в середине XX века. За прошедшее время многие, заложенные в основу проектов теплоисточников, систем транспорта теплоты и теплоиспользующих систем, концептуальные технологии устарели. В настоящее время назрела настоятельная необходимость модернизации существующей системы теплоснабжения.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО РЕЖИМА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Теплоснабжение г. Волжского является централизованным, осуществляется от двух источников: Волжской ТЭЦ и Волжской ТЭЦ-2. Расчетный температурный график тепловых магистралей в момент их создания – 150/70 °С, регулирование тепловой нагрузки – качественное. Система теплоснабжения преимущественно открытая. Действующий температурный график работы тепловых сетей, присоединенных к теплоисточникам, 150/70 °С (со срезкой на 115 °С). На источниках тепловой энергии города регулирование происходит преимущественно по отопительной нагрузке [1].

Одним из весомых достоинств качественного режима регулирования является стабильный гидравлический режим тепловых сетей, поскольку при таком режиме изменяется только температура воды в тепловой сети в зависимости от метеорологических условий при постоянном эквиваленте расхода теплоносителя в тепловой сети.

Многие города сталкиваются с морозными зимами, что приводит к замораживанию воды в отопительной системе дома и потребителя, разрыву трубопроводов, авариям, а температура отапливаемого помещения резко снижается, потребитель начинает увеличивать тепловой потенциал за счет газового оборудования, дополнительных калориферов, работающих от электросети. Самое пагубное воздействие на стабильность гидравлического режима работы тепловых сетей может нанести несанкционированный слив теплоносителя из отопительных приборов самовольно потребителями. Разрегулировка отопительной системы у одного абонента приводит к разрегулировке отопительной системы у другого абонента, в целом происходит гидравлический дисбаланс всего дома. Такого рода аварийная ситуация зачастую может обойти стороной систему теплоснабжения г. Волжского, поскольку климатические условия здесь более благоприятные, чем в северных городах. Однако большинство многоквартирных домов г. Волжского построены во второй половине XX века, у многих домов системы теплоснабжения не обновлялись в течение нескольких десятилетий, трубопроводы страдают от коррозии и ржавчины. Учитывая этот факт, потребители также могут несанкционированно сливать теплоноситель из отопительных приборов самовольно, тем самым дисбалансируя гидравлический режим.

Серьезные осложнения в работе магистральных теплопроводов связаны с изменением их гидравлического режима вследствие увеличения циркуляционного расхода сетевой воды и большими ее утечками в абонентских системах. Наиболее ощутимо это проявляется в изменении пьезометрического графика системы теплоснабжения, снижении располагаемых перепадов давлений и ухудшении теплоснабжения удаленных потребителей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что, даже если насосные станции теплоисточников г. Волжского работают стабильно, это вовсе не означает, что система теплоснабжения города гидравлически устойчива, а значит, существующий качественный режим регулирования тепловой нагрузки является несовершенным.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕЖИМА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Авторами предлагается рассмотреть возможность применения количественного режима регулирования тепловой нагрузки в г. Волжском, а также получения положительного эффекта от внедрения данного режима. Температуру сетевой воды в подающей магистрали $\tau_{1кол}$ поддерживают постоянной. Расход сетевой воды в базовой части графика регулирования тепловой нагрузки $Q = f(t_н)$ регулируют изменением количества включенных сетевых подогревателей, в условиях изменяющихся метеорологических условий насосные группы начинают работать либо с большей мощностью (в периоды низких холодных температур), либо с меньшей мощностью (в условиях высоких тёплых температур).

Смоделируем количественный режим регулирования для г. Волжского (табл. 1). Температуру сетевой воды в подающей магистрали $\tau_{1кол}$ зададим 100 °С, поскольку при значениях ниже данного в трубах будут проходить коррозионные процессы. Зная относительную величину тепловой нагрузки $\bar{Q}p_0$, среднюю разность температур в отопительном приборе между греющей водой и воздухом в отапливаемом помещении $\Delta t_0'$, методом приближенных расчетов находим температуру обратной воды $\tau_{2кол}$ с обязательным условием поддержания температуры внутри помещения на уровне 18 °С [2]:

$$\tau_{2кол} = \tau_{1кол} - \delta\tau'_0\cdot(1 + (\Delta t_0'/\delta\tau'_0 - 0{,}5\cdot\theta') \times \times (1 - \bar{Q}p_0\cdot 0{,}8),$$

где $\tau_{2кол}$ – температура сетевой воды в обратном трубопроводе, ºС; $\tau_{1кол}$ – температура сетевой воды в прямом трубопроводе, ºС; $\delta\tau'_0 = \tau_{2кол} - \tau_{1кол}$ – перепад температур сетевой воды в отопительной установке, ºС; $\tau_{3кол}$ – температура воды в подающем стояке местной системы после смешения на вводе, ºС; $\Delta t_0' = (\tau_{3кол} + \tau_{2кол})/2 - t_{в.р}$ – средняя разность температур в отопительном приборе между греющей водой и воздухом в отапливаемом помещении, ºС; $t_{в.р}$ – расчетная температура воздуха отапливаемых помещений, ºС (18 °С); $\theta' = \tau_{3кол} + \tau_{2кол}$ – перепад температур воды в местной системе при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления, ºС ($t_{н.0}$ = –22 ºС для г. Волжского); $\bar{Q}p_0 = Qp_0/Q_0' = (t_{в.р} - t_н)/(t_{в.р} - t_{н.0})$ – относительная величина тепловой нагрузки; $t_н$ – текущая температура наружного воздуха, ºС.

В табл. 1 сведем данные температур сетевой воды в прямом и обратном трубопроводах при количественном и качественном режимах регулирования $\tau_{1кач}$, $\tau_{2кач}$.

Таблица 1

Данные температур сетевой воды сетевой воды в прямом и обратном трубопроводах при количественном и качественном режимах регулирования $\tau_{1кач}$, $\tau_{2кач}$

$t_н$, ºС	$\tau_{1кол}$	$\tau_{2кол}$	$\tau_{1кач}$	$\tau_{2кач}$
8	100	30	70	44
0	100	37	78	45
–8	100	46	102	54
–16	100	53	115	70
–22	100	70	115	70

Принимаем то, что тепловая нагрузка системы теплоснабжения не меняется с переводом её на новый температурный график. Поэтому сведем данные относительной величины эквивалентов расходов сетевой воды и относительной величины мощностей насосов при качественном и количественном режимах регулирования в табл. 2 [2].

$$W_{кол}/W_{кач} = (\tau_{1кач} - \tau_{2кач})/(\tau_{1кол} - \tau_{2кол})$$

$$(W_{кол}/W_{кач})\ 3 = N_{кол}/N_{кач},$$

где $W_{кол}$ – эквивалент расхода сетевой воды при количественном режиме регулирования; $W_{кач}$ – эквивалент расхода сетевой воды при качественном режиме регулирования.

Очевидный факт, что при постоянной температуре сетевой воды $\tau_{1кол}$ в целях недопущения снижения тепловой нагрузки системы необходимо увеличивать расход воды при низких холодных температурах, то есть увеличивать мощность насосного оборудования и снижать расход при высоких теплых

температурах, а значит, снижать мощность насосов.

Таблица 2

Данные относительной величины эквивалентов расходов сетевой воды и относительной величины мощностей насосов при качественном и количественном режимах регулирования, $W_{кол}/W_{кач}$, $N_{кол}/N_{кач}$

$t_н$, °C	$\tau_{1кол}$	$\tau_{2кол}$	$\tau_{1кач}$	$\tau_{2кач}$	$W_{кол}/W_{кач}$	$N_{кол}/N_{кач}$
8	100	30	70	44	0,371	0,051
0	100	37	78	45	0,524	0,144
–8	100	46	102	54	0,889	0,703
–16	100	53	115	70	0,957	0,876
–22	100	70	115	70	1,5	3,375

Рассмотрим, как изменятся удельные потери на трение $R_л$ и изменится диаметр труб d [2]:

$$R_л = (0{,}0894 \cdot k_э 0{,}25 \cdot G_2)/(\rho \cdot d5{,}25),$$

где $k_э$ – эквивалентная шероховатость труб, м; G – расход сетевой воды, м^3/с.

Приравниваем удельные потери на трение при качественном и количественном режимах регулирования: $R_{л.кач} = R_{л.кол}$.

Относительная величина диаметров труб $d_{кол}$ и $d_{кач}$ при качественном и количественном режимах регулирования будет равна [2]:

$$d_{кол}/d_{кач} = (G_{кол}/G_{кач}) \cdot 2/5{,}25.$$

Относительная величина годового расхода электроэнергии при качественном и количественном режимах регулирования $Э_{год.кол}$ и $Э_{год.кач}$ будет равна [2]:

$$Э = Э_{год.кол}/Э_{год.кач} =$$
$$= (d_{кач} \cdot 5{,}25/dкол \cdot 5{,}25) \cdot ((V_{1кол}{}^3 \cdot n_1/V_{кач}{}^3 \cdot n) +$$
$$+ (V_{2кол}{}^3 \cdot n_2/V_{кач}{}^3 \cdot n) + \ldots + (V_{iкол}{}^3 \cdot n_i/V_{кач}{}^3 \cdot n)),$$

где n – число часов работы системы теплоснабжения (4224 ч для г. Волжского); n_1, n_2, …, n_i – число часов работы системы теплоснабжения при разных температурах наружного воздуха.

Сведем данные в табл. 3.

Анализируя график, рисунок, можно сделать вывод, что при неизменных диаметрах труб (примерно до –16,5 °С) годовой расход электроэнергии при количественном регулировании в 4 раза меньше потребления электроэнергии при качественном регулировании. Таким образом, перейдя на количественный режим регулирования тепловой нагрузки в городе, экономия электроэнергии на транспорт теплоносителя будет очевидна, к тому же перекладку трубопроводов производить нет необходимости.

Таблица 3

Значения годового расхода электроэнергии при качественном и количественном режимах регулирования, $Э_{год.кол}$ и $Э_{год.кач}$

$t_н$, °C	$\tau_{1кол}$	$\tau_{2кол}$	$\tau_{1кач}$	$\tau_{2кач}$	$d_{кач}/d_{кол}$	n_i/n	$Э_{год.кол}/Э_{год.кач}$
8	100	30	70	44	0,685	0,166	0,00116
0	100	37	78	45	0,782	0,216	0,008569
–8	100	46	102	54	0,956	0,31	0,172
–16	100	53	115	70	0,983	0,3	0,24
–22	100	70	115	70	1,167	0/4224	0

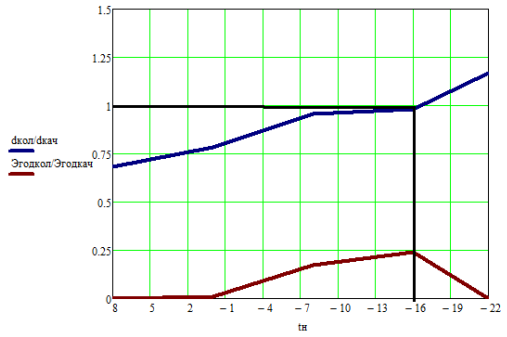


Рисунок. Зависимость относительной величины диаметров и годового расхода электроэнергии от температуры наружного воздуха

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Султанов, М.М., Орлов, Ю.В. Схема теплоснабжения города Волжский. Обосновывающие материалы. Актуализация схемы на 2018 год. / М.М. Султанов, Ю.В. Орлов. – Волжский, 2017. – 326 с.

2. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., стереот. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.

УДК 378.147

ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ ПРИ МОДУЛЬНО-ЦИКЛОВОМ ОБУЧЕНИИ

Е.В. Якимович – д-р филол. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

АННОТАЦИЯ. Автор показывает изменение роли самостоятельной работы при модульно-цикловом обучении. В статье описываются факторы, влияющие на эффективность обучения иностранному языку в новых условиях.

ABSTRACT. The author shows the changed role of self-study in cycle based modular learning. The factors determining the efficiency of foreign language learning under the new conditions are described in the article.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: иностранный язык, самостоятельная работа, отбор учебного материала, распределение речевой деятельности, автоматизированный контроль.

KEY WORDS: foreign language, self-study, selection of educational content, distribution of language activities, computer-controlled monitoring.

Характерной чертой модульно-циклового обучения выступает изменение соотношения между аудиторной работой студента и его самостоятельной подготовкой к занятиям с преподавателем. Увеличение количества часов, выделяемых студенту на самостоятельную работу, согласуется с современными задачами вузовского обучения, когда конечным ориентиром выступает формирование творческой личности. Так, в качестве важнейшей общекультурной компетенции, формируемой, в том числе, на занятиях по иностранному языку в техническом вузе, становится способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала. В новых изменившихся условиях было бы целесообразным внести коррективы в организацию самостоятельной работы студента. Количественные изменения в сложившейся ситуации позволяют сменить приоритеты и рассматривать самостоятельную работу не просто как одну из форм организации процесса обучения, выполняющую вспомогательную роль и дополняющую лекции и семинары, а подойти к ней как к основе, на которой базируется формирование компетенций выпускника.

Применительно к иностранному языку, самостоятельная работа должна использоваться не только при повторении пройденного на занятии лексического и грамматического материала или для закрепления ранее выработанных коммуникативных умений и навыков, но и для первоначального знакомства с иноязычными структурами, сбора, обобщения, анализа и систематизации информации, представленной на иностранном языке, в целях формирования исследовательских умений и профессионально-ориентированных компетенций. При этом такая задача, как обеспечение студента максимально большим объемом информации, вытесняется с ключевых позиций, а на первый план выходит задача снабдить обучающегося алгоритмом поиска и приемами использования иностранного языка как инструмента выполнения профессионально-ориентированных заданий, а также формирования стратегий самообучения и самообразования, развития навыков рефлексии и объективной оценки собственной деятельности и ее результатов. Примерами подобных заданий могут быть создание проекта, подготовка презентации, отчета или обзора, организация дискуссий, конференций, форумов и т. д. В данном слу-

чае на первоначальном этапе необходимым и обязательным является организация самостоятельной работы под непосредственным управлением преподавателя в учебной аудитории. Самостоятельная работа должна найти свое место во время внеаудиторной и аудиторной учебной деятельности, что подчеркивает необходимость введения новой формы обучения, именуемой как «самостоятельная работа студента с преподавателем».

При изменении подхода к организации самостоятельной работы по иностранному языку следует обратить внимание на следующие ключевые моменты: 1) тщательный отбор учебного материала, предлагаемого студентам для самостоятельного изучения и/или заучивания, 2) эффективное перераспределение предречевых, речевых и коммуникативных упражнений, направленных на развитие пассивных (чтение и аудирование) и активных (говорение и письмо) видов речевой деятельности, 3) организацию регулярного и доступного в любое время автоматизированного контроля самостоятельной работы со стороны преподавателя и обучающегося.

В первом случае актуальность приобретает создание электронного учебного контента, который бы охватывал наглядный материал (грамматические схемы и таблицы, визуализированный словарь-минимум), видео- и аудиозаписи, электронные словари и учебники, рабочие тетради, материалы для чтения. К созданию подобного контента могут быть привлечены сами студенты, а накопление большого объема предоставит возможность выбора заданий и будет способствовать индивидуализации обучения. Безусловно, при организации учебного материала ведущая роль остается за преподавателем, который формулирует базовые критерии его отбора и структурирования.

Наш опыт показывает, что при составлении словаря-минимума энергетических терминов необходимо опираться на принципы частотности употребления лексем в специальных текстах, принимать во внимание словообразовательный потенциал языковых единиц, их сочетаемость и семантические взаимосвязи. Важнейшим показателем выступает семантическая значимость, определяющая информационную ценность слова, его принадлежность к номинантам тех категорий, которые участвуют в процессах классификации и спецификации различных областей той или иной профессиональной сферы энергетики. При этом следует быть готовым к тому, что изучаемые языки будут обладать определенной спецификой при номинации понятийных сфер. Например, при сопоставлении терминологических систем альтернативной энергетики немецкого, английского и русского языков обнаружены особенности при наименовании типов электростанций и технологий энергосбережения [1]. Кроме того, при обращении к конкретному языку различия касаются необходимости обращения к заимствованиям, а следовательно, к языковым структурам второго иностранного языка. Так, для немецкого языка характерно умеренное заимствование и параллельное употребление англоязычного и исконно немецкого терминов и точное понимание часто достигается через обращение к языку-источнику (Repowering – переоборудование старых ветроустановок, от английского power – сила, мощь, энергия) [2].

Перераспределение заданий, направленных на развитие конкретного вида речевой деятельности, между аудиторными и внеаудиторными часами работы предусматривает учет таких факторов, как возможность их успешного выполнения без непосредственного присутствия преподавателя, необходимость в увеличении или уменьшении количества повторений, обязательность проговаривания вслух при заучивании, учет индивидуальных психических особенностей, например неспособность отдельных студентов сосредоточиться в присутствии посторонних. Подчеркнем, что на всех этапах обучения в число заданий должны включаться как репродуктивные, так и продуктивные задания.

Автоматизация контроля выполнения самостоятельной работы предполагает определенный уровень материально-технического обеспечения, доступность и разнообразие программ для тестирования качества выполнения репродуктивных задач, а также сроков выполнения заданий творческого характера.

Перспективы исследования автор видит в поиске возможностей использования иностранного языка при изучении других дисциплин, например, при прослушивании курса лекций на английском языке, защите курсовых и дипломных работ, участии в международных видеоконференциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якимович, Е.В., Опара, А.А. Соотношение терминологических систем русского, английского и немецкого языков в области альтернативной энергетики / Е.В. Якимович, А.А. Опара // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 14 (136). – С. 71-75.

2. Якимович, Е.В. Английские заимствования в современной немецкой энергетической терминологии / Е.В. Якимович // Ресурсоэнергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Пятая Всероссийская научно-практическая конференция, г. Волжский, 23-26 сентября 2014 г. / Сборник материалов конференции. Волжский: Филиал «МЭИ» в г. Волжском, 2014. – С. 174-179.

УДК 620.9

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ЕДИНОМ ЦИКЛЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ

И.В. Колесников – студент
В.Н. Курьянов – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, Россия

На сегодняшний день всё больше предприятий уходят на собственную генерацию тепловой энергии, строя новые котельные, или используют для отопления электронагревательные приборы. Чтобы снизить затраты на приобретение тепловой и электрической энергии из сети, предлагается внедрять собственную генерацию энергии на мини-ТЭС, а также внедрять в рамках одной энергоустановки производство холода. Кроме того, так как в вышеуказанных объектах малой генерации для уменьшения трения и охлаждения используется масло, предлагается очищать его и восстанавливать его физические и химические свойства, а не утилизировать согласно технической документации при работе агрегата от 2000 до 5000 моточасов в зависимости от мощности энергоустановки.

Исследовав современный рынок собственной генерации по производству электрической энергии, можно отметить, что не всю полезную энергию топлива используют на производстве. Расходы на отопление значительно падают при использовании системы утилизации тепла (СУТ) (результаты классификации источников малой генерации см. на рис. 1).

Проведя анализ рынка, можно сделать вывод, что, помимо совместного производства тепла и электроэнергии, на нужды предприятия можно производить холод в рамках одной энергоустановки – мини-ТЭС (табл.). Холод можно использовать в целях обеспечения как бытовых нужд, так и сложных технологических процессов.

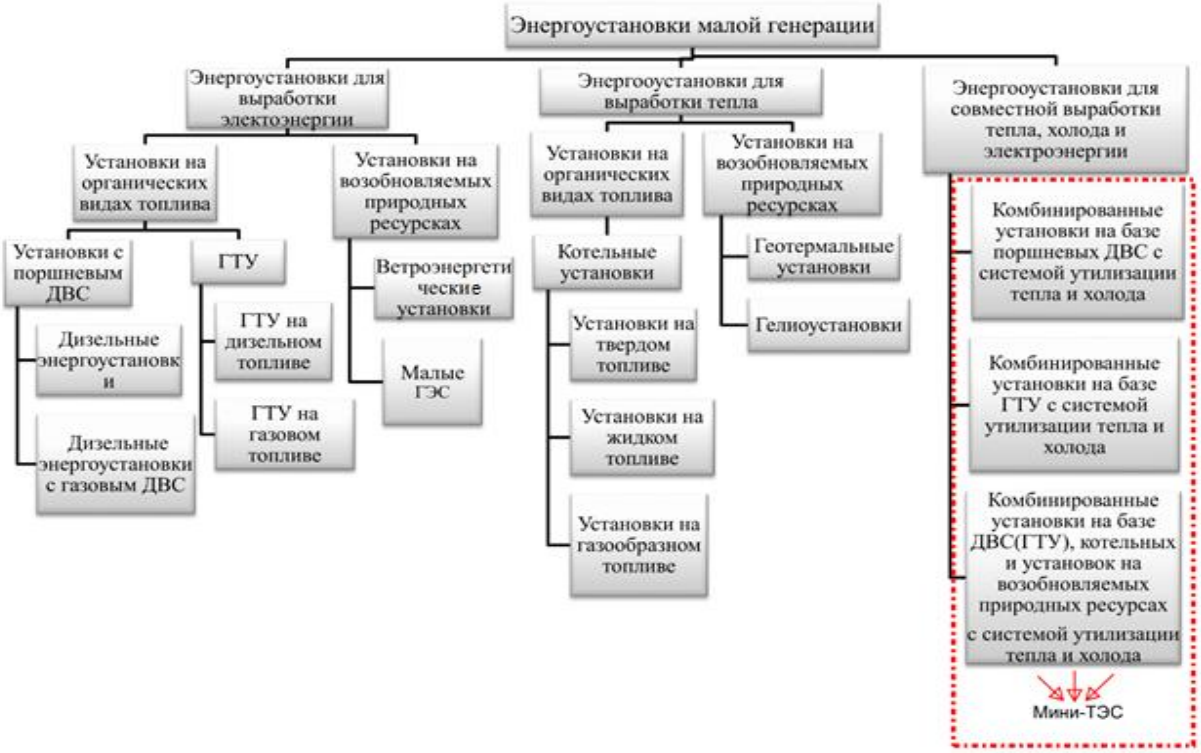


Рис. 1. Классификация источников малой генерации

Расчет технико-экономических показателей для мини-ТЭС в режиме генерации только электроэнергии

Для электрической части. Цена установки 103 200 тыс. руб. Цена пусконаладки 3096 тыс. руб. Общая стоимость 106 296 тыс. руб. Состав оборудования 2×GazEcos 2250 16ГДГ49 Начальные данные: $S_{ср.\ ном}$ = 4,5 МВт; $U_{ном}$ = 10,5 кВ; $C_{э.э}$ = 3,5 руб./кВ·ч; $C_{т.э}$ = 1200 руб./Гкал; $C_г$ = 5 руб./м^3				
Статья расходов	**Параметр**	**Размерность**	**Время, ч**	**Стоимость, руб.**
Расход топлива в день (цена топлива 5 руб./м^3)	787,5	м^3/ч	24	94 500
Расход топлива за срок амортизации (цена топлива 5 руб./м^3)	787,5	м^3/ч	20 000	78 750 000
Расход масла за срок амортизации (опт. цена масла 80 руб./л)	0,3	г/кВт·ч	20 000	2 160 000
Полная стоимость оборудования на срок амортизации	–	руб.	20 000	106 296 000
Общая стоимость за срок амортизации	–	руб.	20 000	187 206 000
ТО	–	руб.	7 раз	744 072
Материалы для ТО	–	руб.	7 раз	744 072
Текущий ремонт профилактика	–	руб.	1 раз	5 314 800
Выработка электроэнергии	–	кВт	20 000	63 000 000
Итого общая себестоимость за срок амортизации (2,5 года)	–	руб.	20 000	194 008 944
Общая стоимость полученной электроэнергии (тариф 3,5 руб./кВт·ч)	–	руб.	20 000	220 500 000
Полная себестоимость 1 кВт·ч (ускоренная амортизация)	–	руб.	20 000	3,08
Себестоимость 1 кВт·ч после 2,5 года эксплуатации (после амортизации)	–	руб.	20 000	1,39
Чистая экономия при тарифе 3,5 руб./кВт·ч в месяц	–	руб.	–	952 560
Период окупаемости	37	месяц	–	–

Один из простых в эксплуатации видов малой генерации – газопоршневые агрегаты, основанные на технологии ДВС, – имеет ряд преимуществ: более высокие технико-экономические показатели, например: оптимальное соотношение электрической и тепловой мощности, которые благодаря совместной выработке в одном агрегате имеют высокий КПД, они быстро строятся и вводятся в эксплуатацию, так как имеют высокую заводскую готовность.

Процентное соотношение преобразования энергии в ГПА составляет: на 100 % энергии топлива приходится 55 % электрической энергии, 45 % тепловой энергии и 10 % тепловой энергии уходящих газов.

Исследуем когенерацию (одновременная выработка тепловой и электрической энергии) и её экономические показатели, экономический эффект от внедрения, который будет складываться из разницы в тарифе на электроэнергию и тепло, потребляемые от ТЭЦ в сравнении с себестоимостью выработки энергии на объектах малой генерации.

По годовому и месячному графику нагрузки одного из цехов АО «Газпром химволокно» определим потребление энергии. Рассчитаем технико-экономические показатели при выработке только электроэнергии. Для когенерации, тригенерации с регенерацией свойств масла проведем такие же расчеты, сравним тариф на электрическую и тепловую энергию из сети с себестоимостью произведённой электрической и тепловой энергии на мини-ТЭС, с учетом затрат на холодоснабжение и очистку масла.

ВЫВОДЫ

Анализ графиков (рис. 2) показывает, что при внедрении собственной генерации на предприятии себестоимость производства тепловой энергии составляет в среднем 650 руб./Гкал, при когенерации себестоимость электроэнергии в среднем составляет 2,33 руб./кВт·ч, при

тригенерации – 2,54 руб./кВт·ч, цена больше, чем в предыдущем режиме, но она на 10 % меньше, чем при холодоснабжении предприятия с помощью бытовых кондиционеров.

Рис. 2. Эффект от внедрения собственной генерации за период 2018-2027 гг.

Срок окупаемости для генерации только электроэнергии составил 37 месяцев, для режима когенерации – 20 месяцев, для тригенерации и регенерации свойств масла – 5 месяцев.

Произведено сравнение производства холода с помощью бытовых кондиционеров, абсорбционных холодильных машин и водяного парокомпрессионного чиллера, где АБХМ оказалась самой энергоэффективной машиной, её использование приводит к снижению себестоимости производства электрической энергии по сравнению с использованием бытовых кондиционеров на 10 и на 6 % при использовании водяного парокомпрессионного чиллера. Средняя себестоимость производства электроэнергии при учете генерации холода составила 2,79; 2,54 и 2,69 руб./кВт·ч.

Из анализа технико-экономических показателей видно, что внедрение тригенерации и очистки масла является наиболее эффективными методами по снижению себестоимости производимой энергии, это позволяет сокращать эксплуатационные затраты на 1,5 %.

УДК 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ В ЭНЕРГОСИСЕМЕ

Н.М. Толстоноженко, А.А. Артёмов – магистранты
В.Н. Курьянов – доцент, канд. тех. наук
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Современная энергетика нуждается в модернизации. В данной статье рассматривается современная проблема надежности работы релейной защиты (проблема обеспечения надежности систем энергетики, систем электроснабжения потребителей). В связи с этим появляется необходимость в использовании нового оборудования. Выбор показателей и критериев эффективности и надежности, а также методов выбора оптимального по эффективности варианта релейной защиты защищаемого объекта играют решающую роль в выборе основных направлений развития техники РЗА.

Приоритетным направлением электрических сетей является повышение надежности оборудования и всей энергосистемы в целом. Ежегодно значительные денежные потери от аварий несет энергосистема. Одной из главных причин высокой степени аварийности является физическое, моральное старение оборудования. Аварийность возрастает резко по истечении срока службы. Это основополагающая причина необходимости замены оборудования.

Микропроцессорные устройства релейной защиты в последнее время существенно потеснили электромеханические и даже электронные, особенно в энергосистемах западных стран. Россия пока находится только в начале этого пути, однако процесс более широкого применения микропроцессорных реле набирает силу и в нашей стране. Опыт применения микропроцессорных устройств релейной защиты во многих энергосистемах позволил выявить их преимущества и недостатки. Микропроцессорные устройства релейной защиты являются весьма сложными устройствами со специфическим принципом действия, не имеющим ничего общего с обычными (традиционными) реле защиты.

Количество срабатываний (то есть перемещений подвижных элементов) электромеханических реле защиты совершенно мизерно по сравнению с их ресурсом. Были случаи, когда на проверку поступали реле с заводским дефектом, которые находились в эксплуатации свыше 10 лет. Тот факт, что эти дефекты не были выявлены в течение или свыше 10 лет до того времени, пока не происходило срабатывание реле (проверки реле проводились редко).

Количество элементов, из которых построено микропроцессорное реле, в сотни, тысячи раз больше, чем количество элементов, из которых состоит электромеханическое реле. А из теории надежности известна обратно пропорциональная зависимость между количеством элементов и надежностью сложных систем. В электромеханическом реле под воздействием внешних факторов, способных вызвать повреждение, находятся лишь катушки электромагнитов и изоляция внутренних монтажных проводов. Сами по себе это очень надежные и устойчивые элементы, но если бы возникла необходимость в дальнейшем повышении надежности, то катушки можно было бы пропитать эпоксидным компаундом под вакуумом и использовать монтажные проводники во фторопластовой изоляции [1].

Не удивительно поэтому, что исследования, выполненные исследовательским отделом Israel Electric Corporation, привели к выводу о том, что надежность микропроцессорных реле ниже, чем электромеханических и полупроводниковых статических реле. Компоненты микропроцессорных реле выходят из строя чаще, чем элементы реле других видов. При этом отмечается, что имеющийся в сложных микропроцессорных реле внутренний мониторинг ис-

правности не спасает дело, так как, во-первых, это мониторинг только основных режимов крупных функциональных блоков, а не исправности элементов, и, во-вторых, информация о выходе из строя какого-то блока реле поступает к персоналу уже после того, как состоялся отказ реле. То есть наличие такой внутренней самодиагностики не увеличивает надежность реле.

Существует ситуация, при которой быстродействующие микропроцессорные защиты реагируют на аварийный режим гораздо медленнее, чем электромеханические. Связано это с тем, что внутри микропроцессорных реле идет обработка информации, а если это переходные режимы, то времени на обработку информации уходит еще больше.

По статистике (табл.) причинами неправильных срабатывания реле, в том числе выявленных при техническом обслуживании, являются: дефекты и неисправности реле, витковые замыкания, неисправности вторичных цепей, механический износ, отказ (связано со старением оборудования электромеханические реле), реже – ошибки персонала (микропроцессорные) или причины не выявлены.

Статистика повреждения реле

Параметр / Вид реле	мп	мэ	эм
	2016	**2016**	**2016**
Общее количество реле в эксплуатации	3000	2500	12 000
Количество повреждений	1	20	152
Относительное количество повреждений, %	0,02	0,35	3,3

Релейная защита и автоматика выполнены с использованием электромеханических реле (~95 %), которые имеют большие габариты и значительное электропотребление, разброс характеристик срабатывания по току и времени, невысокую чувствительность.

Около 85 % всех комплектов релейной защиты находятся в эксплуатации более 25 лет и морально устарели.

Более 80 % воздушных и кабельных линий, 87 % подстанций находятся в эксплуатации более расчетного срока службы. Процесс старения сетевых объектов продолжается.

Наряду с физическим износом происходит моральное старение оборудования. Средний технический уровень установленного подстанционного оборудования по многим позициям соответствует оборудованию, эксплуатируемому в зарубежных странах 30 лет назад.

В результате показатели надёжности электроснабжения в последние годы практически не изменяются, оставаясь невысокими в сравнении с аналогичными показателями зарубежных стран.

Надежность релейной защиты обеспечивается простотой схемы и отдельных элементов устройства, хорошим качеством изготовления и уровнем эксплуатации.

Немаловажное значение в эффективности и надежности работы релейной защиты имеет проведение технического обслуживания.

На примере осциллограмм (рис. 1-4) представлена правильная работа устройств релейной защиты, а срабатывание данных реле и есть показатель надежности.

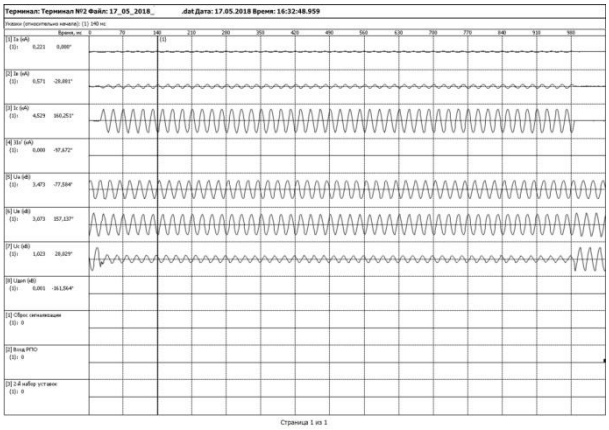


Рис. 1. Однофазное короткое замыкание фазы *С* ВЛ № 1

На осциллограмме в фазах *A*, *B* представлен ток нагрузки в неповрежденных фазах, в фазе *C* – ток короткого замыкания. Напряжение в неповрежденных фазах неизменно. Напряжение в фазе *C* приближается к нулю.

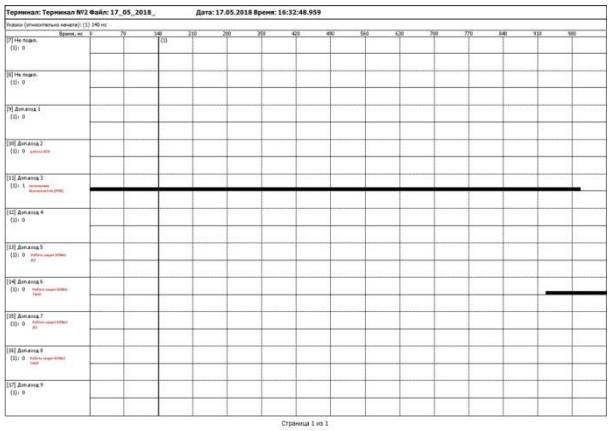


Рис. 2. Однофазное короткое замыкание фазы *C*, работа защит

Выключатель включен. Работа 2-й ступени ТЗНП время срабатывания защиты – 0,9 секунды.

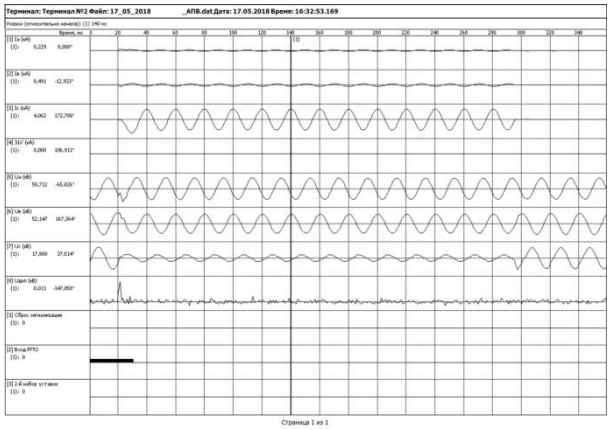


Рис. 3. Неуспешная работа АПВ

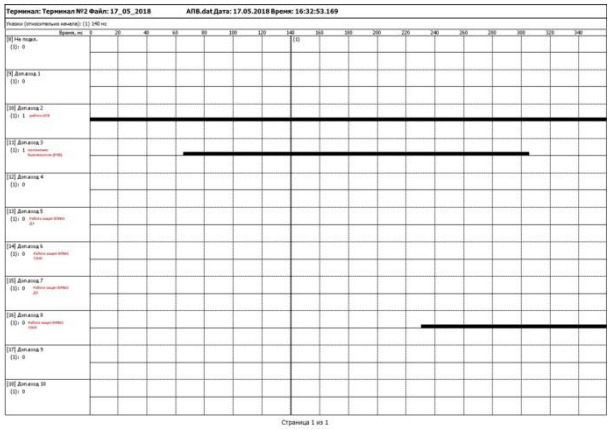


Рис. 4 Неуспешная работа АПВ, работа защит

Повреждение фазы *C* на ВЛ № 1-110кВ. Работает защита ВЛ № 1 (ТЗНП 2-я ступень, время срабатывания защиты – 0,9 секунды). Работает АПВ на выключателе, время срабатывания защиты – 3 секунды. АПВ работает неуспешно. Срабатывают защиты ВЛ № 2 (ТЗНП 1-я ступень). Защиты ВЛ № 2 ТЗНП 1-я ступень работают «за спину», из-за того что направленность выведена при работе АПВ и включении от ключа управления. При включении РПВ направленность исчезает и работает та защита, у которой выдержка времени меньше, поэтому и срабатывает защита ТЗНП ВЛ № 2.

Функционирование систем РЗА на современной элементной базе позволит повысить такие составляющие эффективности работы систем релейной защиты в современных условиях, как надежность программного обеспечения, защищенность от внешних электромагнитных и других воздействий и человеческого фактора.

Для того чтобы учесть различные аспекты надежности (надежность срабатывания и несрабатывания), использование коэффициентов, оценивающих частоту разного рода отказов (ложных срабатываний, излишних срабатываний, отказов в срабатывании), технические (внешнее механическое воздействие на устройства РЗА и их вспомогательные элементы, дефекты, неисправности, сбой программного обеспечения и др.) и организационные причины (недостоверные исходные данные, дефекты проекта, конструкции, монтажа, непринятие необходимых мер или несвоевременное их принятие) неправильной работы РЗА в дальнейшем целесообразно построить систему мониторинга уровня надежности («отслеживание» уровня эксплуатационной надежности техники различных фирм-изготовителей), сбор информации по надежности комплектующих элементов, о последствиях неправильных действий защит для дальнейшего уточнения расчётов и т. д. Расчеты показателей надежности систем РЗА на этапе проектирования, эксплуатации выполнить в среде Excel, Access на основе информации о статистических дан-

ных по процентам неправильных действий защит, что является важным для решения поставленных задач и их практического использования. Для каждого объекта в процессе проектирования должны быть выбраны оптимальный состав и алгоритм взаимодействия элементов РЗА.

Устанавливаемое микропроцессорное и микроэлектронное оборудование снизит аварийность по причине ошибок персонала, по техническим причинам благодаря возможности использования современных подходов к оперативному обслуживанию.

Сегодня интенсивные исследования в области электромагнитного оружия ведутся в России, США, Англии, Германии, Китае. В последние годы многие разработки прошлых лет, например такие, как компактные сверхмощные импульсные источники направленного электромагнитного излучения, свободно предлагаются к продаже как на Западе, так и в России.

Вопросы «электромагнитного терроризма», способного вызвать техногенные аварии национального масштаба (подобные той, которая произошла в Нью-Йорке в августе 2003 года), были сформулированы в статье Мануэля Вика [2]. В этой статье, в частности, отмечается, что электронные компоненты, такие как микропроцессоры, работающие на высоких частотах при низких уровнях напряжений, особенно подвержены воздействию внешних преднамеренных электромагнитных излучений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич, В. Микропроцессорные реле защиты. Новые перспективы или новые проблемы? [Электронный ресурс]/ В. Гуревич // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36). URL: http://www.news.elteh.ru/ arh/2005/36/10.php

2. Wik M.W. Electromagnetic Terrorism – What are the Risks? What can be Done? – International Product Compliance Magazine, 1997.

УДК 621.31

ELECTRICAL POWER TECHNOLOGIES

Dr. Ing. *Leu*
Technical University Ilmenau: Institute for Electric Power and Control Engineering, Germany

SUMMARY. The article presents some directions which are research and science unit high-voltage technologies ongoing in Institute for Electric Power and Control Engineering of Technical University Ilmenau.

1. INTRODUCTION

Research and science unit high-voltage technologies ongoing in Institute for Electric Power and Control Engineering of Technical University Ilmenau perform research using modern high-tech facilities. Students have the opportunity to explore the many processes associated with the production and transmission of electricity from renewable energy sources with the transfer of energy to end users.

2. REPORT

It is known that Germany is one of the largest consumers of energy in the world. Power engineeringis sourced predominantly by fossil fuels, followed by nuclear power, biomass (wood and biofuels), wind, hydro and solar. For energy production, transmission and distribution the country uses up-to-date electrical power technologies. Fig. 1 presents the main units of Research and Science Unit High-Voltage Technologies in Germany and TU Ilmenau.

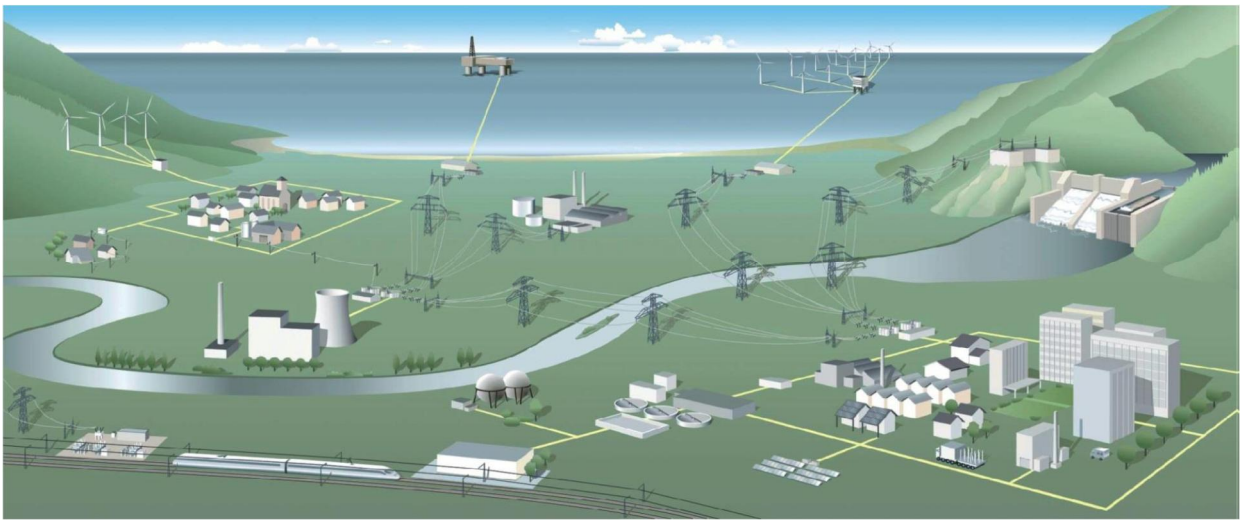


Fig. 1. Research and Science Unit High-Voltage Technologies

TU Ilmenau is the Institute for Electric Power and Control Engineering research Unit High-Voltage Technologies. Current Topics such as:

– «Energy Transition», Topologies for integrating regenerative Energy Sources (Photovoltaics, Biomass, Wind) and Energy-Storage;

– Medium- and High-Voltage Transmission- and Distribution-Systems (Design, Dimensioning, Control, Stability, Power-Electronic-Topologies);

– Cable-based High-Voltage-DC-Transmission-Systems (Dimensioning, Assembly, Testing, Error Tracking, Materials [Space Charge, Ageing, Behaviour during Switching-Cycles]);

– Switches and Systems comprising alternative Insulation- and Switching-Gases, Vacuum Switches up to 145 kV (also for DC);

– Intelligent Power Grids (Power-Measuring and – Control, Fault-Detection, Optimization of Energy-Generation).

On fig. 2 presented power technologies: HV and MV DC – grids with AC-DC converter.

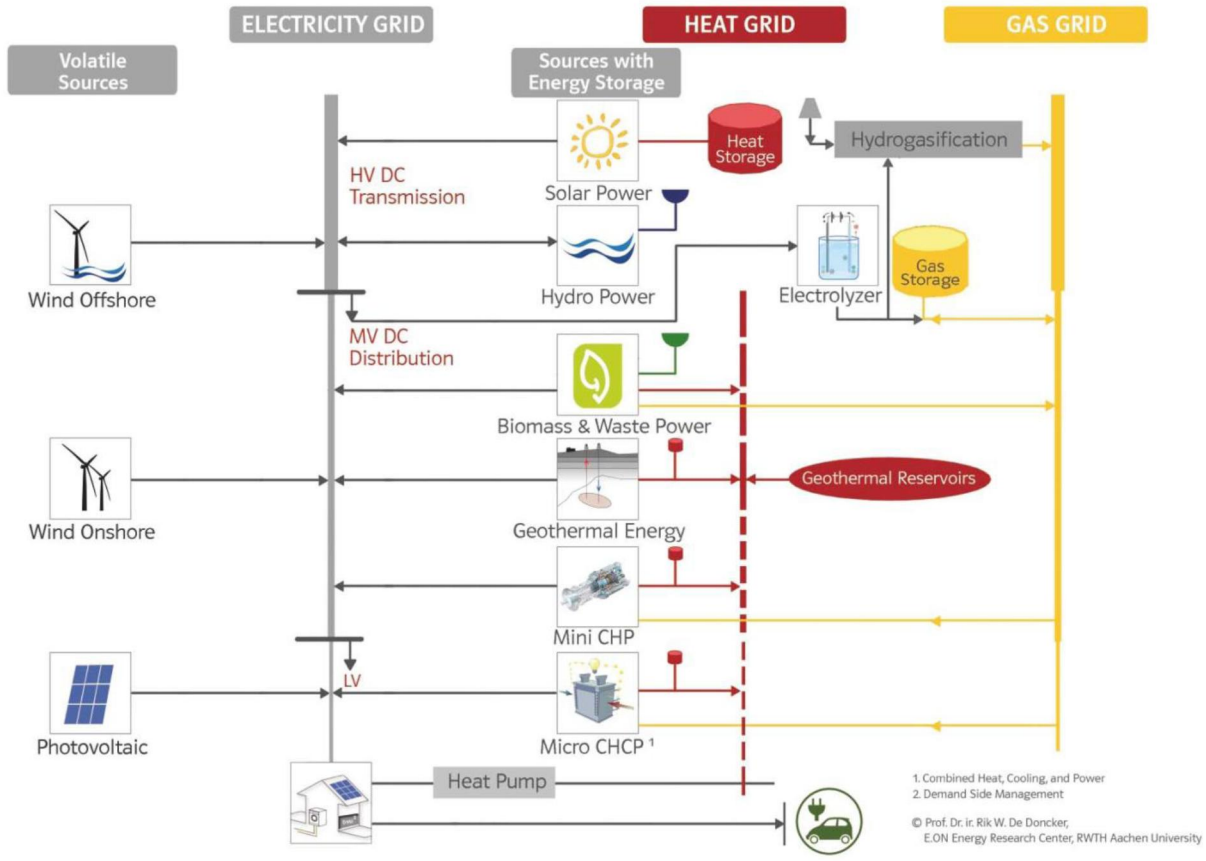


Fig. 2. HV and MV DC – Grids

Power Engineering: Subjects

• HVDC/HVAC-Transmission and – Distribution-Systems (Planning, Dimensioning, Control, Stability);

• Arcing Fault in electrical Switchgear (AC, DC);

• Electromobility;

• Electrochemic Storage;

• SST in Medium-Voltage, passive and active Filters, Drives, Power-Electronic-Sources;

• Electric Insulation Systems for mixed Voltage;

• High-Voltage-Cable-Assembly for DC and AC (closures and terminations);

• Electostatic Air Filters;

• Protection Elements for DC and 3-Phase-AC-Grids (Arresters, Shorters and Switchgear).

High-Voltage Technologies 50Hz-Voltage + Transients Measurement of transient Currents and Voltages on High-Voltage Potential:

• Controlled;

• Stress of Switching-Contacts.

DC: Connectors

• 150 kV;

• Ethylene-Propylene-Rubber, Resin, Mineral-Oil, Silicone-Oil;

• Shape-Optimization of Termination-Elements;

• Continuous Change of the electric Field as a function of the temperature (up to 90°C).

DC: Ripple, Transients in Converters

Fig. 3 presents HVDC with superposed sinusoidal kHz-voltage.

Fig. 4 presents sinusoidal kHz-voltage with superposed HVDC-voltage.

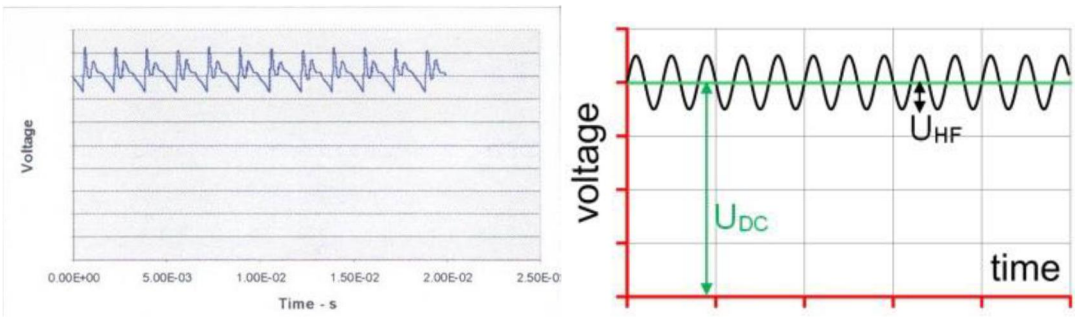
Fig. 5 presents HVAC with superposed sinusoidal kHz-voltage.

Dielectric Warming on superposed kHz-Voltages

Losses are calculated by:

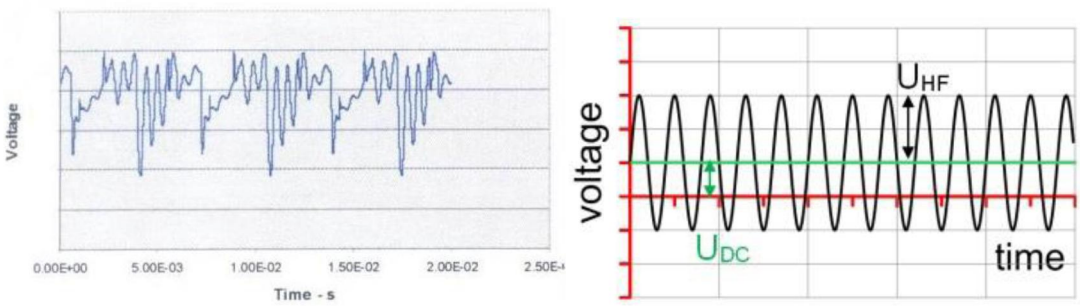
$$P_v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \tan\delta \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{2}}\right)^2.$$

Fig. 6 presents Minimal Warming on unpolar materials.



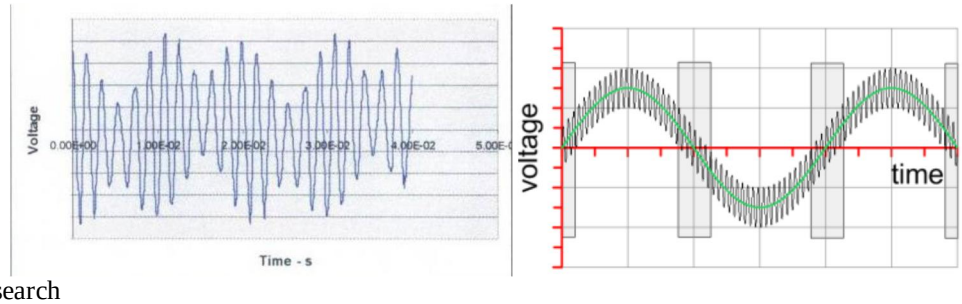
ExperienceResearch

Fig. 3. HVDC with superposed sinusoidal kHz-voltage



ExperienceResearch

Fig. 4. Sinusoidal kHz-voltage with superposed HVDC-voltage



ExperienceResearch

Fig. 5. HVAC with superposed sinusoidal kHz-voltage

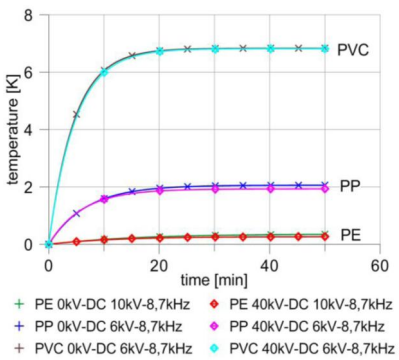


Fig. 6. Minimal Warming on unpolar materials

High-Voltage Technologies kHz-Transformer (SST)

Warming Medium-Frequency Transformer comprising Oil/Paper Insulation

• Determination of dielectric Parameters of dry and impregnated Materials under realistic medium-frequency electric Fields;

• Dielectric Warming;

• Material Parameters as a function of Temperature;

• Warming of cunductive Parts due to magnetic Induction.

3. CONCLUSION

The presented research results are only a small part of the large research conducted by scientific groups of research and science unit high-voltage technologies ongoing in Institute for Electric Power and Control Engineering of Technical University Ilmenau.