МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ 60-ЛЕТИЮ ПУСКА ПЕРВОГО ГИДРОАГРЕГАТА ВОЛЖСКОЙ ГЭС

г. Волжский
17–19 декабря 2018 г.

ВОЛЖСКИЙ МЭИ 2019

УДК 620 + 621 + 628
ББК 31

Организационный комитет:
Рогалев Н.Д., ректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (председатель),
Шестопалова Т.А., и. о. директора ИГВИЭ «НИУ «МЭИ» (сопредседатель),
Султанов М.М., директор филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
в г. Волжском (зам. председателя),
Бологов С.Н., директор филиала ПАО «РусГидро» –
«Волжская ГЭС» (зам. председателя)

Научно-практическая конференция, посвященная 60-летию пуска первого гидроагрегата Волжской ГЭС: сборник докладов. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2019. – 142 с.

ISBN 978-5-94721-143-6

В сборнике докладов научно-практической конференции отражены актуальные проблемы в области гидро-, тепло- и электроэнергетики. Сборник может быть полезен студентам, аспирантам, преподавателям вузов и инженерам соответствующих областей знаний.

Печатается по решению Учебно-методического совета филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском.

УДК 620, 621, 628
ББК 31

ISBN 978-5-94721-143-6

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

СЕКЦИЯ № 1

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМЫХ РЕАКТОРОВ НА ПРЕДЕЛ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Николаева С.И. – канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, г. Волгоград

АННОТАЦИЯ. Рассматривается возможность повышения динамической устойчивости электропередачи за счет применения комплексного регулирования шунтирующих реакторов и устройства продольной компенсации (УПК). Оценивается влияние параметров реакторов и степени компенсации на предел передаваемой по линии мощности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Динамическая устойчивость электроэнергетических систем, шунтирующие управляемые реакторы, устройство продольной компенсации.

Повышение динамической устойчивости (устойчивости при больших возмущениях) – важная составляющая проблемы устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС). Нарушение динамической устойчивости приводит к существенным нарушениям режима энергосистемы и может привести к развитию аварии и распространению ее на большие энергетические районы [1].

Для обеспечения динамической устойчивости ЭЭС разработаны и применяются различные средства аварийного управления [2]. Среди них: автоматическое регулирование возбуждения (АРВ), импульсная разгрузка турбин, электрическое торможение и др. Из них можно отдельно выделить средства, направленные на изменение параметров и характеристик узлов электрических систем (электрическое торможение, регулирование синхронных компенсаторов, статическое регулирование источников реактивной мощности [3] и управляемые реакторы [4]). Причем если электрическое торможение предназначено для обеспечения динамической устойчивости, то регулирование синхронных компенсаторов, статическое регулирование источников реактивной мощности и управляемые реакторы могут улучшать и статическую устойчивость.

Важность и актуальность требований к увеличению пропускной способности электропередач высокого напряжения, к решению проблемы компенсации реактивной мощности в современных электроэнергетических системах и к увеличению устойчивости систем привело к развитию теории управляемых

электропередач. В настоящее время в энергосистемах России эта проблема решается применением технологии управляемых электропередач FASTS (FLEXIBLE AC TRANSMISION SYSTEM) [5].

Пропускная способность линий электропередачи определяется их параметрами. Рост протяженности линии приводит к повышению предельной передаваемой по линии мощности, однако передача ее не может быть реализована по условию обеспечения допустимых уровней напряжения. Это требует применения на дальних линиях электропередачи шунтирующих реакторов, которые могут устанавливаться по концам передачи и в промежуточных точках линии.

Применение шунтирующих реакторов позволяет осуществлять передачу мощности на большие расстояния, однако приводит к снижению предела передаваемой активной мощности по сравнению с естественным пределом мощности линии. Поэтому наиболее приемлемым является применение шунтирующих реакторов совместно с установкой на линии устройств продольной емкостной компенсации, позволяющие управлять напряжением в линии. За счет таких устройств, установленных в промежуточных точках линии, повышается одновременно и статическая и динамическая устойчивости электропередачи.

В данной статье рассматриваются вопросы влияния характеристик и параметров управляемых реакторов и степени емкостной компенсации на предел передаваемой по линии мощности.

Исследуемая электрическая система состоит из электростанции, представленной эквивалентным генератором. Электростанция связана через дальнюю линию электропередачи, имеющую устройство продольной компенсации (УПК) с управляемыми реакторами, с мощной энергосистемой, представленной шинами неизменного напряжения и частоты (рис. 1).

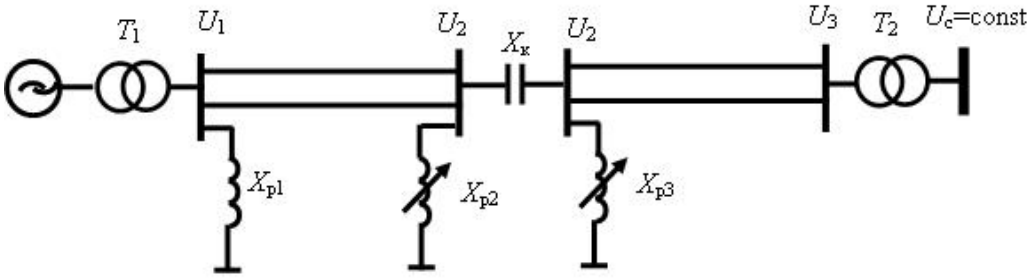

Рис. 1. Исследуемая система

Степень влияния управляемых реакторов на поведение электроэнергетической системы при больших возмущениях зависит от диапазона и скорости регулирования реакторов. В качестве больших возмущений рассматриваются короткие замыкания на линии.

Задача исследования состоит в разработке закона регулирования реакторов, максимально реализующего их качества для повышения устойчивости системы при больших возмущениях, что позволит создать комплексный регулятор реактора, воздействующий как на установившиеся режимы, так и на переходные процессы.

Основными элементами рассматриваемой системы являются: синхронный генератор, линия электропередачи и управляемый реактор. Математические модели этих элементов были приняты исходя из следующих соображений. Модель синхронного генератора принята в соответствии с рекомендациями по области использования тех или иных моделей синхронного генератора [6], схема замещения линии электропередачи – обычная, Т-образная, схема замещения реактора принята в соответствии с [7].

Была поставлена задача определения диапазона изменения параметров реактора, для которого он будет эффективным, мощным и быстродействующим регулируемым элементом. Такими параметрами являются постоянная времени и диапазон регулирования реакторов. Постоянная времени и диапазон регулирования шунтирующих реакторов определяются типом реактора и конструкцией цепей регулирования. Поскольку управляемые реакторы в рассматриваемой системе являются частью устройства компенсации, включающего УПК, можно ожидать, что на эффективность реакторов будет влиять и степень продольной емкостной компенсации.

Для оценки влияния постоянных времени управляемых реакторов был задан коэффициент α, определяющий относительное снижение предела мощности по динамической устойчивости при увеличении постоянной времени реактора $T_р$:

$$\alpha = \frac{P_{(T\text{р}=0)} - P_{(T\text{р})}}{P_{(T\text{р}=0)}} \cdot 100\%,$$

где $P_{(T\text{р} = 0)}$ – предел мощности при $T_р = 0$, т. е., при мгновенном изменении индуктивного сопротивления реактора $X_р$; $P_{(T\text{р})}$ – предел мощности при заданном значении $T_р$.

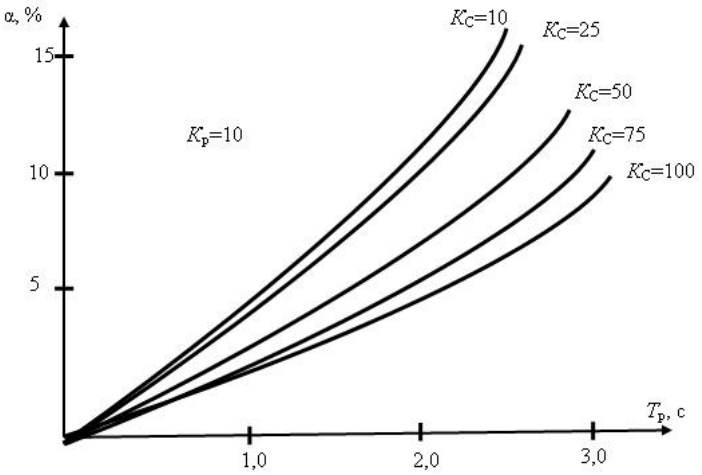

Рис. 2. Зависимость относительного снижения предела мощности от постоянной времени реактора: $К_р$ – диапазон регулирования реактора, равный $\frac{X_{\text{р.max}}}{X_{\text{р.min}}}$

Влияние изменения диапазона регулирования реактора $K_р$ и степени продольной компенсации $K_с$ на предел мощности по динамической устойчивости оценивается коэффициентом

$$\beta = \frac{P' - P''}{P'} \cdot 100\%,$$

где P' и P'' – пределы мощности по динамической устойчивости для регулируемых и нерегулируемых реакторов соответственно.

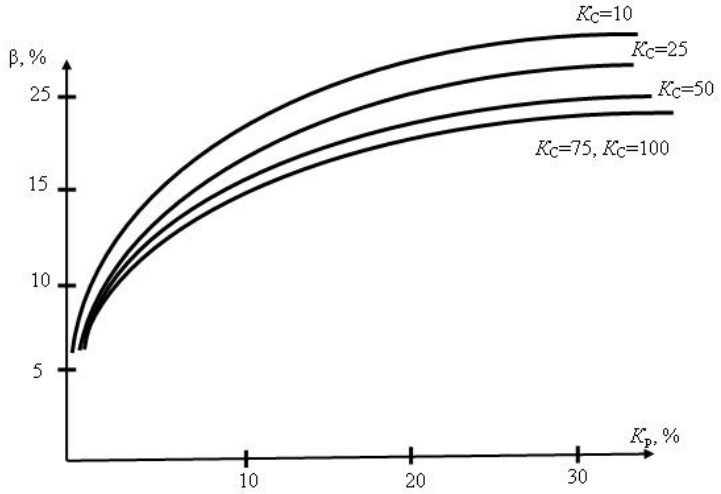

Рис. 3. Зависимость относительного увеличения предела мощности управляемого реактора от диапазона регулирования

Результаты исследования по оценке влияния диапазона регулирования реакторов на относительное увеличение предела мощности управляемого реактора по сравнению с неуправляемым показаны на рис. 3.

Как следует из рис. 3, оптимальное значение диапазона регулирования реактора составляет около 10. Этот же результат соответствует оптимальному значению $K_р$ по условию увеличения мощности по статической устойчивости.

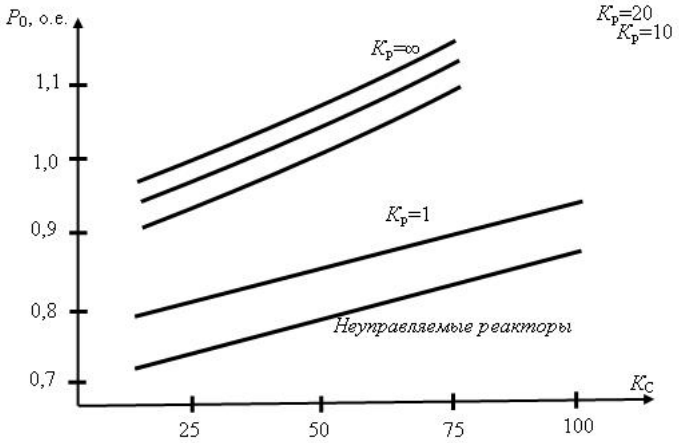

Рис. 4. Зависимость предела мощности управляемого реактора от диапазона регулирования реактора и степени компенсации УПК

Результаты исследования по оценке влияния диапазона регулирования реакторов на предел мощности показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что с увеличением степени компенсации растет предел мощности по динамической устойчивости. Следует отметить, что относительное изменение этого предела будет больше при меньшей степени компенсации. Если учесть, что степень компенсации, равная 50 %, является оптимальной с точки зрения экономической эффективности, а также соответствует требованиям релейной защиты, то, как следует из рис. 4, такая же степень компенсации целесообразна и по условиям обеспечения динамической устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешкин, Г.А. Устойчивость энергосистем: монография / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2006. – 389 с.

2. Кощеев, Л.А. Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах / Л.А. Кощеев. – Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отделение, 1990. – 140 с.

3. Основы современной энергетики: учебник для вузов / под общ. ред. чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Том 2. Современная электроэнергетика / под ред. профессоров А. П. Бурмана и В. А. Строева. – 632 с.

4. Александров, Г.Н. Управляемые реакторы / Г.Н. Александров, В.П. Лунин. – СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2005. – 200 с.

5. Шакарян, Ю.Г. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока / Ю. Г. Шакарян. – М.: ВНИИЭ, 2005. – 41 с.

6. Николаева, С.И. Моделирование элементов системы автоматического регулирования в расчетах устойчивости электроэнергетических систем / С.И. Николаева // Стратегические ориентиры инновационного развития АПК в современных экономических условиях: материалы Международной научно-практической конференции, Волгоград, 26–28 января 2016 г. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2016. Том 3. – С. 289 – 294.

7. Николаева, С.И. Математическое описание переходных процессов в обмотках управляемых реакторов / С.И. Николаева // Изв. ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. / Изд-во ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 12. – С. 264–266.

УДК 621.314

АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЭС

Широбоков Д.Е., Янина Д.С. – магистранты
Султанов М.М. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Проведено исследование статистических отказов трансформаторов ЛЭС за период с 2012 по 2017 год после ввода их в эксплуатацию. По результатам исследования получены конкретные числовые значения и установлен закон распределения для показателей надежности по следующим критериям: интенсивность отказов, 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 следующие факторы:

– нарушение изоляции обмоток вследствие воздействия внешних и внутренних перенапряжений, сквозных ТКЗ, дефектов изготовления. Причинами повреждения изоляции обмоток трансформаторов являются ее износ и старение вследствие перезагрузок, недостаточного охлаждения, также выход из строя вследствие повреждения устройств, регулирующих напряжение;

– повреждения вводов трансформаторов вследствие перекрытия изоляции;

– повреждение контактных соединений;

– потеря масла.

Целью данного исследования является определение количества отказов как показателя надежности. Для этого 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 эксплуатации 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 %.

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

Расчетные формулы для оценки показателей надежности:

$$\lambda_{i,n} = \frac{m_i}{\Delta n_i m}; \quad \lambda_{i,n_{\text{ср}}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} n_i m}{10}; \quad T_{i,n} = \frac{1}{\lambda_{i,n}}; \quad T_{i,n_{\text{ср}}} = \frac{1}{\lambda_{i,n_{\text{ср}}}}, \tag{1}$$

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 расчетные оценки показателей надежности по количеству трансформаторов сведены в табл. 2. $\lambda_{i,n\,\text{ср}} = 0{,}0345$; $T_{i,n\,\text{ср}} = 289$.

Расчетные формулы для оценки показателей надежности по годам эксплуатации:

$$\lambda_i = \frac{m_i}{\Delta t_i}; \quad \lambda_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{6} \lambda_i}{6\Delta t_i}; \quad T_i = \frac{1}{\lambda_i}; \quad T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ср}}}, \tag{2}$$

где m_i – число отказов в i-м году эксплуатации; Δt_i – 1 год эксплуатации $T_{\text{эксп}} = \Delta t_i = 8760$ ч; λ_i – интенсивность отказов, полученная на каждом году эксплуатации; T_i – наработка на отказ, полученная по каждому году эксплуатации.

$$\lambda_{i\,\text{сн}} = \frac{\sum m_i}{\sum \Delta t_i}, \tag{3}$$

где $\lambda_{i\,\text{сн}}$ – оценка интенсивности отказов, полученная с учетом накопления как по отказам, так и по наработке.

Полученные расчетные оценки показателей надежности по годам эксплуатации сведены в табл. 3. $\lambda_{i\,ср} = 0{,}00375$; $\lambda_{i\,ср} = 266$.

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 по годам эксплуатации

Δt_i	m_i	$m_{i\,сн}$	λ_i	$T_{i,n}$	$\Sigma\Delta t_i$	$\lambda_{i\,сн}$	$T_{i,n}$
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.

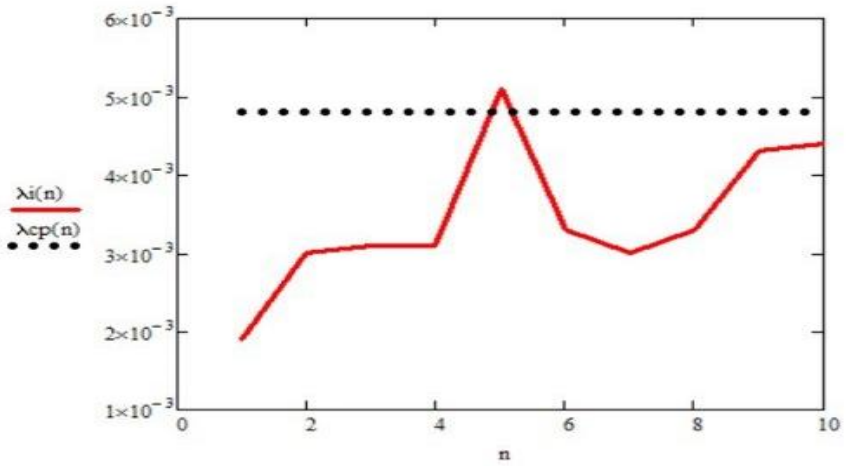

Рис. 1. График интенсивности отказов по количеству трансформаторов

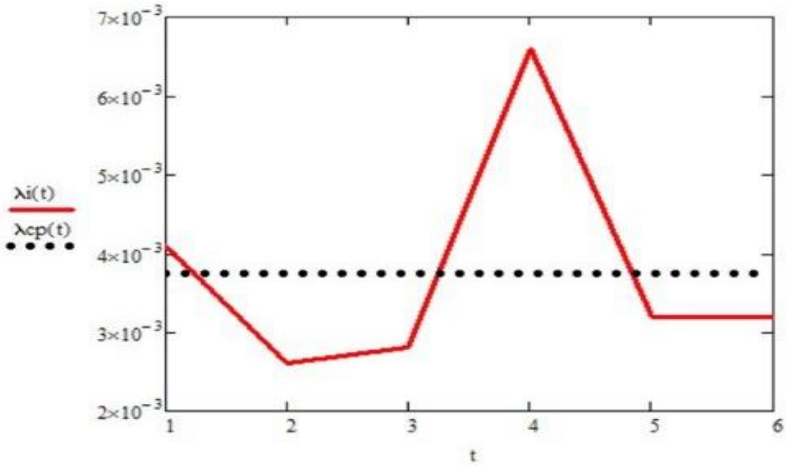

Рис. 2. График интенсивности отказов по годам эксплуатации

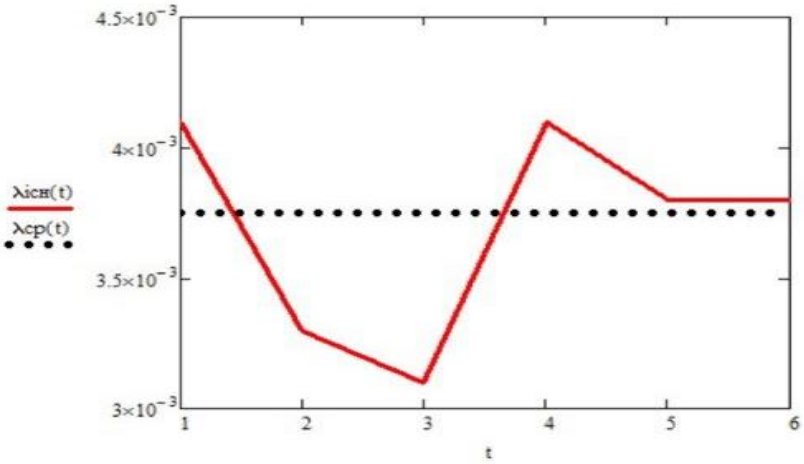

Рис. 3. График интенсивности отказов
по годам эксплуатации с накоплением

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

$$P_i = (n_i) = \exp(-\lambda_i n_i), \tag{4}$$

где n_i – количество трансформаторов.

Аналогично вероятность безотказной работы по времени эксплуатации определяется по формуле

$$P_i = (t_i) = \exp(-\lambda_i t_i), \tag{5}$$

где t_i – время эксплуатации.

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.

Для его применения 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. 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

$$P = (\underline{x_i} \le x \le \overline{x_i}),\ i = 1, 2, \dots k, \tag{6}$$

где $\underline{x_i}$ – нижняя граница i-го интервала; $\overline{x_i}$ – верхняя граница; k – число интервалов. Когда число наблюдений n велико, то число интервалов можно найти по формуле приближенно:

$$k = 4(0{,}75(n-1)^2)^{1/5}. \tag{7}$$

Границы интервала x_1, x_2, … x_k определяют с помощью теоретического распределения с использованием следующих значений оценок параметров:

$$P(x \le x_1) = \frac{1}{k},\ P(x \le x_2) = \frac{2}{k}, \dots, P(x \le x_{k-1}) = \frac{k-1}{k}. \tag{8}$$

Нижняя граница первого интервала и верхняя граница последнего интервала являются наименьшим и наибольшим возможными значениями.

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

$$E_i = \frac{n}{k}, i = 1, 2, ... k. \quad (9)$$

4. Подсчитывают число наблюдений в каждом интервале и обозначают его M_i, где $i = 1, 2, \ldots k$.

5. Вычисляют критерий

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\lambda} (M_i - E_i)^2 . \quad (10)$$

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 разобьем 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 расчет для критерия 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 $\lambda_{i,n\ \text{ср}} = 0{,}00345$, $T_{i,n\ \text{ср}} = 249$; 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 $\gamma = 0{,}999$.

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: учебное 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.

УДК 621.316.1

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Гринченко М.В. – магистрант
Зенина Е.Г. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрены основные мероприятия по повышению надежности электроснабжения в распределительных сетях, а также возможные пути решения проблем, связанных с ними. В настоящее время существует необходимость осуществления надежной передачи и распределения требуемого количества электроэнергии от источников к потребителям, при нормативных уровнях напряжения и в соответствии с заданным графиком нагрузки. Внезапные перерывы в электроснабжении предприятий промышленного производства, вызывают их дезорганизацию и наносят значительный материальный ущерб. В случае отказа отдельных элементов сети может произойти отключение участка сети, что ведет к нарушению электроснабжения потребителей: полному прекращению питания, частичному ограничению нагрузки, отклонению напряжения от допустимых нормами пределов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, электроснабжение, распределительные сети, показатели качества.

Показатели качества энергии, влияющие на надежность

Существенное влияние на надежность оказывает снижение показателей качества электроэнергии:

– понижение напряжения в основных сетях, пропускная способность которых определяется условиями устойчивости, приводит к понижению пределов передаваемой мощности потребителям;

– понижение напряжения в распределительных сетях из-за местных дефицитов реактивной мощности приводит к уменьшению пропускной способности сети в момент ее ограничения предельными токовыми нагрузками [1];

– устанавливаемые ПУЭ требования к надежности электроснабжения в соответствии с различными категориями приемников зависят от степени их ответственности и необходимости резервирования;

– при работе с пониженной частотой из-за общего дефицита мощности в ЭС «резерв по частоте» уменьшается по мере ее приближении к аварийному значению [2].

При оценке надежности электроснабжения элементов электрических систем, относящихся к восстанавливаемым при отказах и повреждениях, целесообразно использовать следующие показатели:

– параметр потока отказов или среднее количество отказов в единицу времени (обычно год), относящееся к одному элементу в год, а для линий электропередачи – параметр потока отказов на 1 км/год;

– среднее время восстановления или среднее время преднамеренных отключений;

– при простейшем потоке отказов – коэффициент готовности и коэффициент технического использования, а для резервных источников электроснабжения – коэффициент оперативной готовности [3].

С учетом вышеперечисленного наиболее универсальным показателем является коэффициент технического использования, так как он описывает относительное время пребывания объекта в работоспособном состоянии.

Для наглядности стоит привести пример с построением кривой интенсивности отказов по данным табл. 1. На испытания поставлено N_0 = 200 элементов, испытания проводились в течение t = 100 ч [4].

Таблица 1

Исходные данные

Интервал времени, Δ_t, ч	**Число отказавших элементов, $n(t)$**	**Интервал времени, Δ_t, ч**	**Число отказавших элементов, $n(t)$**
0–10	10	50–60	2
10–20	8	60–70	2
20–30	6	70–80	4
30–40	4	80–90	5
40–50	2	90–100	8

Расчет

Интенсивность отказов со статистической точки зрения по формуле

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}. \quad (1)$$

В первом интервале (0–10) ч количество отказавших элементов $n(\Delta t_1)$ = 10,

число элементов, работающих исправно к началу промежутка времени, $N_0 = 200$, тогда

$$\lambda(10) = \frac{10}{200 \cdot 10} = 0{,}005. \qquad (2)$$

Во втором интервале (10–20) ч количество отказавших элементов $n(\Delta t_2) = 8$, число элементов, работающих исправно к началу промежутка времени, $N_0 = 190$, тогда

$$\lambda(20) = \frac{8}{190 \cdot 10} = 0{,}0042.$$

Полученные результаты показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета λ(*t*)

Δ_t, ч	Δt, ч	$n(\Delta t)$	$N(t)$	$\lambda(t)$, откл./ч
0–10	10	10	200	0,0050
10–20	10	8	190	0,0042
20–30	10	6	182	0,0033
30–40	10	4	176	0,0023
40–50	10	2	172	0,0012
50–60	10	2	170	0,0012
60–70	10	2	168	0,0012
70–80	10	4	166	0,0024
80–90	10	5	162	0,0031
90–100	10	8	157	0,0051

Зависимость λ(*t*) представлена на рисунке.

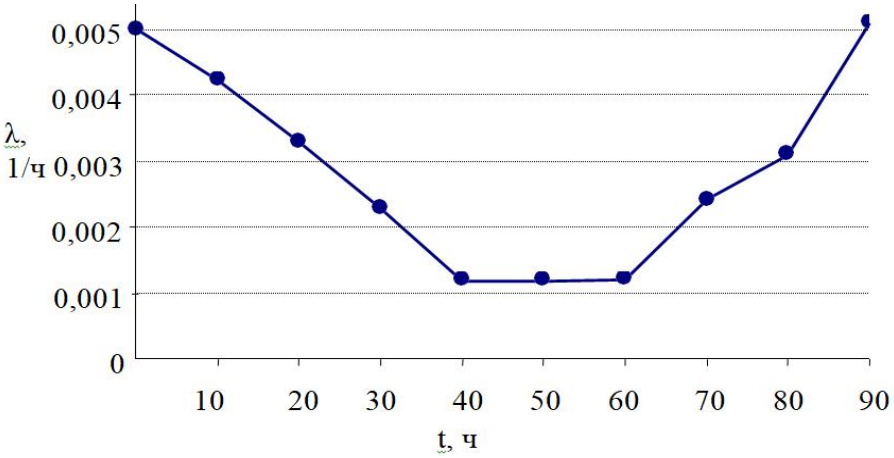

Рисунок. Зависимость λ(*t*)

На основе данной зависимости можно сделать вывод, что на интервале (0–40) ч наблюдается снижение интенсивности отказавших элементов, затем от (40–60) ч количество отказов стабилизируется, а далее от (60–100) ч идет увеличение отказов. Это свидетельствует о том, что необходимо проводить больше планово-предупредительных ремонтов за последний период.

Также для повышения надежности электроснабжения необходимо изучить все возможные виды систем электроснабжения, учесть все возможные влияния на безотказную работу электрооборудования, провести анализ технологических параметров приемников особой категории и их количества, изучить влияние агрессивных сред на системы питания. Следует производить учет времени ввода резерва при резервировании, чтобы избежать нарушений в технологических процессах и предотвращать аварийные ситуации. Немаловажную роль играет правильный выбор электрооборудования, при эксплуатации которого необходимо своевременное проведение ремонтов и обслуживания [5].

В заключение хотелось бы отметить, что все вышеперечисленные показатели надежности являются техническими характеристиками и позволяют сопоставлять между собой надежность нескольких энергетических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем / В.Г. Китушин. – М.: Высш. школа, 1984. – 256 с.

2. Руденко, Ю.Н., Ушаков, И.А. Надежность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – М.: Наука, 1986.

3. Розанов, М.Н. Надежность электроэнергетических систем / М.Н. Розанов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.

4. Фокин Ю.А. Вероятностные методы в расчетах надежности систем электроснабжения / Ю.А. Фокин. – М.: МЭИ, 1977. – 84 с.

5. Папков, Б. В. Пашали, Д.Ю. Надежность и эффективность электроснабжения: учеб. пособие / Б.В. Папков, Д.Ю. Пашали. – Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2005. – 380 с.

УДК 338.22

АНАЛИЗ РЕСУРСОВ КОМПАНИИ ПАО «РУСГИДРО»

Кирносов М.С., Гомазков Д.С., Курбалева А.Э. – студенты
Жилина В.И. – д-р экон. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В работе исследованы финансовые, природные, производственные ресурсы компании ПАО «РусГидро». Значительное внимание уделено рассмотрению человеческих и интеллектуальных ресурсов. Проведен анализ динамики изменения исследуемых ресурсов фирмы. Также построены зависимости, отражающие данную динамику.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ресурсы, финансы, энергосбережение, установленная мощность, кадровый потенциал, выработка электроэнергии.

Введение

Компания «РусГидро» является одной из самых крупных российских генерирующих компаний и лидером в производстве энергии на базе возобновляемых

источников, развивающей генерацию на основе энергии морских приливов, водных потоков, ветра и геотермальной энергии.

Ресурсы являются важной частью внутренней среды организации. Они представляют собой средства, запасы, возможности, обеспечивающие стабильную работу организации для достижения ее целей.

Финансовые ресурсы предприятия – это денежные средства, имеющиеся в его распоряжении и предназначенные для осуществления затрат на расширенное воспроизводство, содержание и развитие непроизводственной сферы, потребление.

Природные ресурсы – естественные, имеющиеся в природе ресурсы в виде земли и земельных угодий, водных богатств, воздушного бассейна, недр и полезных ископаемых, лесов, растительного и животного мира, климатических особенностей регионов.

Производственные ресурсы – ресурсы, непосредственно используемые в производстве – средства производства.

Человеческие ресурсы представляют собой потенциальные возможности человека в плане трудовой, умственной или физической деятельности.

Интеллектуальные ресурсы – это знания, информация, опыт, организационные возможности, информационные каналы, которые можно использовать, чтобы создавать богатство.

Целью данной работы является анализ динамики изменения ресурсов компании ПАО «РусГидро». Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

– проследить и проанализировать динамику изменения финансовых, природных, производственных, человеческих и интеллектуальных ресурсов;

– построить интересующие зависимости, отражающие динамику изменения ресурсов фирмы за 2015–2017 гг.;

– сформулировать выводы на основе полученных данных.

Финансовые ресурсы

Финансовый капитал «РусГидро», как и любой другой крупной компании, состоит из двух частей: собственного и заемного. Собственный капитал на 01.01.2017 г. составлял 650,9 млрд рублей, а заемный капитал 332,51 млрд рублей [1].

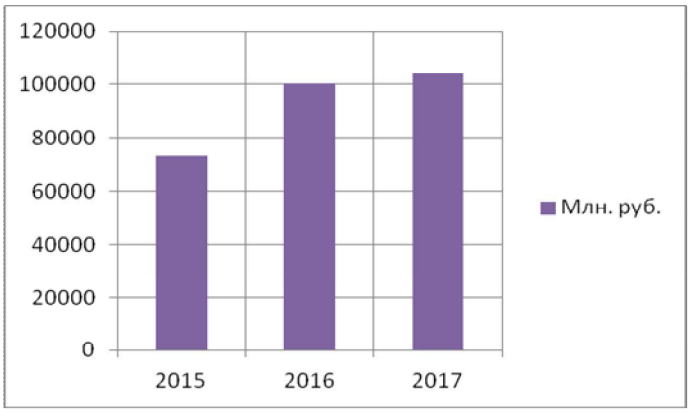

Рис. 1. Изменение показателя EBITDA за 2015–2017 гг.

По сравнению с 2016 годом EBITDA – аналитический показатель, равный объему прибыли до вычета расходов по выплате процентов, налогов, износа и начисленной амортизации, увеличился на 3,7 % и составил 104 млрд руб., что отражено на рис. 1 [2]. Отношение чистого финансового долга к EBITDA уменьшилось на 12,5 % и составляет 1,4. За 2017 год заметно увеличился объем дивидендных выплат (на 32,6 %) и теперь достигает 19,9 млрд руб.

Природные ресурсы

В структуру холдинга ПАО «РусГидро» входят не только гидроэлектростанции, но и тепловые станции на Дальнем Востоке. За год своей работы тепловые станции использовали 16,8 млн тонн угля и 5,125 млрд м^3 природного газа, а водопользование компании составило 743,3 млн м^3. За 2017 год компания заплатила 1,6 млрд. рублей на охрану окружающей среды.

Выработка гидроэнергии и ВИЭ (возобновляемые источники энергии) достигла 109,7 млрд кВт*ч; общий объем выработки электроэнергии составил 140,3 млрд кВт*ч, что представлено на рис. 2 [1].

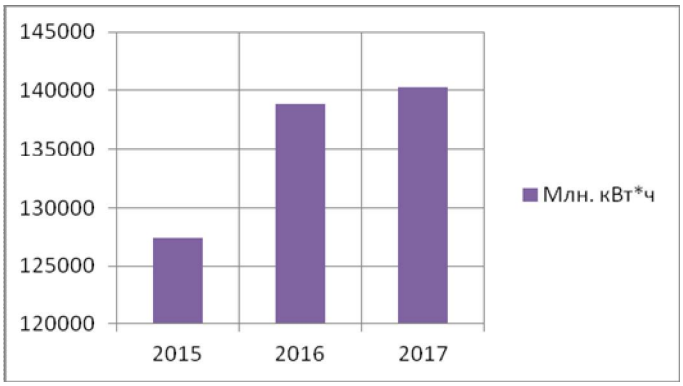

Рис. 2. Изменение выработки электроэнергии за 2015–2017 гг.

Благодаря активному внедрению технологий по энергосбережению в ходе проведения мероприятий по повышению энергоэффективности было сэкономлено 114,6 млн кВт*ч электроэнергии, что на 12,9 % больше 2016 года [2]. Данный аспект отражен на рис. 3. Также выбросы в атмосферу сократились до 271,1 тыс. тонн, что меньше выбросов в 2016 году на 0,15 %.

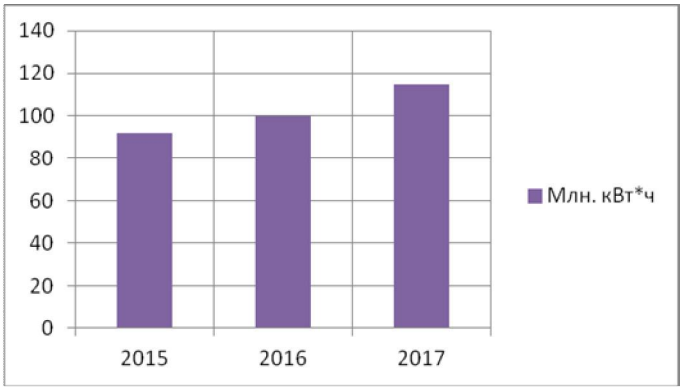

Рис. 3. Изменение показателя энергосбережения за 2015–2017 гг.

Производственные ресурсы

Производственный капитал «РусГидро» составляют более 70 объектов энергетики общей установленной мощностью более 30 ГВт. Среди альтернативных источников энергии в него входят три геотермальные электростанции, три ветряные электростанции общей установленной мощностью 2,175 МВт, 19 СЭС общей мощностью 1,601 МВт [3]. По состоянию на 01.01.2017 г. установленная мощность Группы «РусГидро» составляла 38 868,1 МВт. В течение 2017 года общая установленная мощность увеличилась на 170,37 МВт и на 31.12.2017 г. составила 39 038,5 МВт, что представлено на рис. 4 [1]. Рост установленной мощности на объектах Группы «РусГидро» произошел в том числе за счет: ввода первой очереди Якутской ГРЭС-2 установленной электрической мощностью 193 МВт; перемаркировки оборудования на Жигулевской (+21,0 МВт), Волжской (+10,5 МВт), Саратовской (+6,0 МВт) и Новосибирской ГЭС (+5,0 МВт). Уменьшение мощности в отчетном году обусловлено в том числе выбытием мощностей на станциях Субгруппы РАО ЭС Востока: АО «Чукотэнерго» (–20,9 МВт) и ПАО «Камчатскэнерго» (–25 МВт).

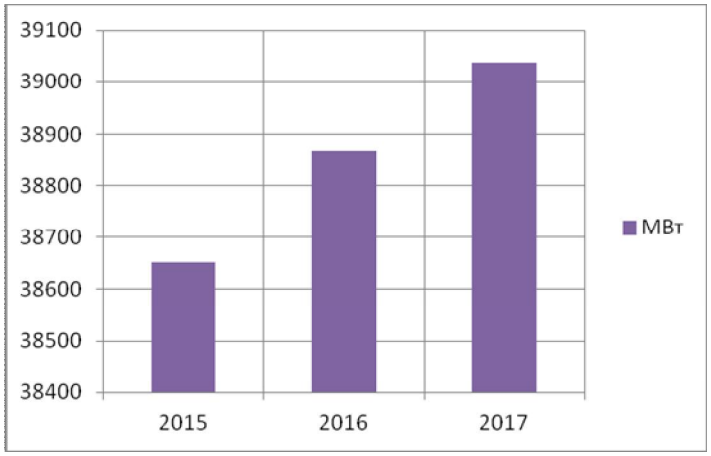

Рис. 4. Изменение установленной мощности за 2015–2017 гг.

Человеческие ресурсы

Важной задачей компании является опережающее развитие кадрового потенциала. Поэтому одним из приоритетных направлений является создание системы основного и дополнительного профессионального образования на базе Московского энергетического института, Корпоративного университета гидроэнергетики и учебно-производственных информационных центров «РусГидро». Она позволит оптимизировать образовательные программы и готовить специалистов, полностью отвечающих требованиям компании и способных решать задачи, стоящие перед современной гидроэнергетикой.

В 2017 году было выделено 305,1 млн руб. на развитие кадрового потенциала, создано 1311 рабочих мест [1].

Интеллектуальные ресурсы

В Группе «РусГидро» действует проектно-изыскательский комплекс, объединяющий проектные институты (ОАО «Институт Гидропроект», ПАО «Ленгидропроект», ПАО «Мособлгидропроект») и научно-исследовательские организации (ПАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и ПАО «НИИЭС»). Деятельность комплекса ПАО «РусГидро» направлена на разработку инновационных технологий в области «зеленой» энергетики и стремится создать образовательную среду на базе внутренней системы наставничества на рабочих местах, Корпоративного университета гидроэнергетики, Саяно-Шушенского филиала Сибирского Федерального Университета, расположенного в непосредственной близости к крупнейшей ГЭС.

На финансирование Программы инновационного развития в 2017 году было потрачено 2,19 млрд руб. и 402,4 млрд руб. на затраты НИОКР [1].

У «РусГидро» имеется 22 вуза-партнера, в рамках чего 1174 студента прошли практику на действующих объектах компании.

Выводы

По итогам данной работы в ходе анализа ресурсов ПАО «РусГидро» можно сделать следующие выводы.

1. У компании увеличивается прибыль и сокращается число заемного капитала. Растут дивидендные выплаты.

2. Значительными темпами внедряются энергосберегающие технологии, которые позволяют экономить природные ресурсы.

3. Производственный капитал развивается за счет модернизации старых станций и введения новых. Большое количество средств направляется на замену оборудования в рамках Программы комплексной модернизации.

4. У ПАО «РусГидро» большое внимание уделяется финансированию научно-исследовательской деятельности. В 2017 году количество средств, направленных на программу инновационного развития, увеличилось на 33 %.

5. Компания активно вкладывает ресурсы в развитие кадрового потенциала, проведение соревнований профессионального мастерства и программы обучения персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовой отчет компании ПАО «РусГидро» за 2017 год, включая информацию об устойчивом развитии. Автоматизация в промышленности. – М: РусГидро, 2017. – С. 18–35.

2. Годовой отчет компании ПАО «РусГидро» за 2016 год. – М: РусГидро, 2016. – С. 8–10.

3. Годовой отчет компании ПАО «РусГидро» за 2015 год. – М: РусГидро, 2015. – С. 6–7.

УДК 621.3.048.1

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ТРУБ «ПРОТЕКТОРФЛЕКС» ДЛЯ ПРОКЛАДКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

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

АННОТАЦИЯ. Одним из важнейших элементов конструкции кабельных линий являются изоляционные материалы, влияющие на стабильность и безопасность работы линии. В настоящее время существует проблема несоответствия по механической и термической стойкости силовых кабелей и изоляционных труб для их прокладки. Для поддержания кабельной линии в работоспособном состоянии и профилактики дефектов необходимо выполнение ряда требований к изоляционным трубам для прокладки силовых кабелей, так как от состояния кабельных линий зависит качество поставляемой потребителям электрической энергии.

В данной работе рассматривается возможность применения для прокладки силовых кабельных линий как традиционных труб, так и труб «Протекторфлекс».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрооборудование, кабельная линия, надежность, работоспособность, передача энергии, сшитый полиэтилен, потребители.

Введение

Вопрос о месте прокладки кабельных линий является одним из самых важнейших вопросов по ряду причин:

– каждая сетевая компания, поставляющая электрическую энергию, стремится найти способ модернизации сети, чтобы обеспечить уменьшение возможных издержек;

– кабельные линии должны обладать высоким сроком службы, являясь надежным передающим звеном;

– наличие потребителей электрической энергии, требующих бесперебойного электроснабжения, вызывает необходимость обеспечения надежности работы системы энергоснабжения.

В данной работе изложены сведения о наиболее широко применяемых изоляционных трубах для прокладки силовых кабельных линий.

Характеристика проблемы

При прокладке кабелей в трубах допускается применять стальные, чугунные, бетонные, керамические и т. п. согласно ПУЭ п. 2.3.102.

В настоящее время во многих случаях для силовых кабельных линий используют трубы, изготовленные из полиэтилена низкого давления (ПНД)

по ГОСТ 18599-2001 «Трубы напорные из полиэтилена». Технические условия предназначены для трубопроводов, транспортирующих воду при рабочей температуре 0–40 °С; применяют трубы из полиэтилена для газопроводов ГОСТ Р 50838-2009, в которых максимальный допустимый предел температуры транспортировки 40 °С. Из этого можно сделать вывод, что применение ГОСТ 18599-2001 и ГОСТ Р 50838-2009 недопустимо по ряду причин.

1. Длительно допустимый нагрев изоляции кабеля 6–110 кВ составляет 90 °С и приводит к тому, что трубы из ПНД не могут обеспечить необходимую механическую прочность в условиях теплового излучения силовых кабелей.

2. При тепловом воздействии трубы могут терять свою прочность, размягчаться и спаиваться с кабелем. Возможно продавливание грунта, что приводит к затруднению и даже невозможности дальнейшей эксплуатации кабельной линии. В случае применения кабелей с СПЭ-изоляцией трубы должны быть изготовлены из материалов, не теряющих свою прочность при высоких рабочих температурах.

Опыт зарубежной практики показывает, что трубы из ПНД не используют для прокладки силовых кабельных линий.

Характеристика труб «Протекторфлекс»

Применение ПНД-труб, рассчитанных на максимальную температуру 40 °С, невозможно для прокладки кабельных линий, так как температура кабельной линии с однофазными кабелями с СПЭ-изоляцией в нормальном режиме может достигать 90 °С. Кроме того, в ряде случаев температура линии может превосходить 90 °С, например при перегрузках.

Значения температуры изоляции зависят от следующих факторов:

– сечения жилы и экрана кабеля;

– от класса номинального напряжения кабеля (от объема изоляции).

Прогрев изоляции и оболочки происходит не позднее нескольких десятков минут с момента короткого замыкания и отключения кабеля от сети релейной защитой, а вот охлаждение кабеля до температуры окружающего грунта (около 15 °С) будет происходить медленнее – до нескольких суток.

Поскольку температура плавления ПНД-трубы составляет 132 °С – а температура размягчения еще меньше, – то следует ожидать деформации трубы и/или ее прилипания к оболочке кабеля при перегрузках, при внешних по отношению к кабелю коротких замыканиях, а также при внутренних повреждениях самой линии.

Деформация ПНД-трубы и/или ее слипание с оболочкой сделают невозможным извлечение кабельной линии из трубы с целью ее ремонта или замены – потребуется или использование единственной резервной трубы (если она была предусмотрена), или длительная организация нового прокола под аварийную фазу, а также закупка однофазного кабеля необходимой длины.

Учитывая опыт использования труб ПНД в России, в 2015 г. в ПАО «Ленэнерго» утверждены технические требования к трубам для прокладки

КЛ 6-110 кВ методом горизонтально-направленного бурения, в которых не рекомендуется использование труб ПНД.

Трубы для кабеля «Протекторфлекс» производятся методом экструзии из полимерной композиции повышенной термостойкости и имеют гладкую наружную и внутреннюю поверхности. Использование этих труб позволяет решать все основные задачи, стоящие перед защитными кабелеводами для прокладки высоковольтных кабельных линий. Такими задачами являются:

– надежная и безаварийная работа кабельных линий;

– экономичность, удобство и безопасность монтажных работ;

– возможность демонтажа, ремонта и перекладки кабельных линий;

– сохранение всех геометрических и прочностных характеристик в случае перегрузки кабельных линий;

– предотвращение повреждения кабельных линий в случае просадки грунта или дорожного покрытия.

Трубы обладают всеми необходимыми характеристиками, которые позволяют максимально использовать преимущества прокладки кабельных линий методом ГНБ, обеспечивая:

– повышенную температурную стойкость;

– повышенную механическую прочность;

– отсутствие слипания кабеля и трубы;

– увеличенную теплопроводность стенок и хорошее охлаждение кабеля;

– повышенную устойчивость к истиранию.

Стоимость трубы «Протекторфлекс» незначительно превышает стоимость трубы ПНД (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение стоимостных показателей труб для прокладки кабельных линий

Тип трубы	Ед.	Стоимость, руб.
ПНД 12,5 атм	м	797,5
Труба «Протекторфлекс» СТ-110/7,6	м	946,75

Преимущества «Протекторфлекс» в сравнении с другими полимерными трубами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение технических характеристик труб

Параметры	«Протекторфлекс»	Полиэтилен	Полипропилен	ПВХ
1	2	3	4	5
Длительная температура эксплуатации, °С	+110	+40	+60	+40
Стойкость к горению	да	нет	нет	нет
Прокладка методом горизонтально-направленного бурения	да	да	нет	нет

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Сварка встык или электромуфтами	да	да	да	нет
Прочность	высокая	низкая	средняя	высокая
Износостойкость	высокая	низкая	средняя	высокая
Гибкость	высокая	высокая	низкая	отсутствует

Трубы «Протекторфлекс» разработаны для обеспечения современных требований, предъявляемых при проектировании и прокладке кабельных линий различных классов напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуфаль, И.В. Полимерные трубы для кабельных линий / И.В. Пуфаль // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 1(46).

2. Письмо исх. № 1312-ОГ/03 от 22.08.2016 «О прокладке кабелей». Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

3. Филиппов, А.С. Ремонт и монтаж кабельных линий. Часть 1. / А.С. Филиппов. – Минск: Техноперспектива, 2005. – 375 с.

4. ГОСТ Р 50838-2009 (ИСО 4437:2007) Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технические условия.

5. ПУЭ-7 п.2.3.102-2.3.111 Прокладка кабельных линий в кабельных блоках, трубах и железобетонных лотках.

УДК 621.311.13

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Дадалян А.А. – студент
Зенина Е.Г. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Безопасность работ при ремонте воздушных линий, потенциально находящихся под наведенным напряжением, является приоритетной в работе обслуживающего персонала. В данной статье рассмотрены способы измерения наведенного напряжения по имеющимся методикам в России и за рубежом, проведен сравнительный анализ и сделан вывод об их использовании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наведенное напряжение, методы измерения наведенного напряжения, воздушная линия под наведенным напряжением, схемы заземления, зарубежный опыт, отечественный опыт.

При ремонте и обслуживании воздушных линий первостепенной задачей является обеспечение безопасности обслуживающего персонала, который

подвержен факторам, опасным для жизни. Одним из таких факторов является наведенное напряжение.

В соответствии с Правилами охраны труда персонал, обслуживающий ВЛ, должен иметь Перечень линий, которые после отключения находятся под наведенным напряжением. Для этих целей разрабатываются и усовершенствуются различные методические указания и разрабатываются стандарты организаций.

Основными методическими указаниями для измерения наведенного напряжения до 2008 года являлись «Методические указания по измерению наведенных напряжений на отключенных ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока (М.: СПО ОРГРЭС, 1993 г.).

Им на смену пришли методические указания проведения измерения наведенного напряжения по стандартам организаций «ПАО МРСК Юга» и «ПАО ФСК ЕЭС». Также свою методику проведения измерений разрабатывает РУП «Белэнергосетьпроект (Белоруссия). Результаты сравнения методик представлены в таблице.

Измерять величину напряжения следует на ВЛ, в местах, где можно ожидать наибольшие значения наведенного напряжения:

– в начале и в конце ВЛ на первых опорах, установленных вне РУ;

– в местах изменения взаимного расположения ВЛ;

– в местах разделения двухцепных ВЛ на одноцепные;

– в местах транспозиций на отключенной или влияющей ВЛ.

Вне зависимости от методики проведения измерений, все измерения проводятся по одной из четырех схем:

– ВЛ заземлена в начале и в конце на подстанционном заземлителе;

– ВЛ на одном конце разземлена, а на другом заземлена на подстанционном заземлителе;

– ВЛ разземлена по концам и заземлена на базовом заземлителе;

– ВЛ заземлена в начале и конце на подстанционном заземлителе и в одном или нескольких местах на специальном заземлителе.

Сравнение методик измерения наведенного напряжения

Признак сравнения	**Методика (стандарт) измерения наведенного напряжения (согласно организации)**		
	ОАО «ФСК ЕЭС»	**ПАО «МРСК ЮГА»**	**РУП «Белэнерго-сетьпроект»**
1	**2**	**3**	**4**
Количество этапов принятия решения	3	2	3 + математическое моделирование
Количество схем заземления для которых проводится расчет	Все используемые	2	4

Окончание таблицы

1	2	3	4
Использование переносного заземления	Для оценки электростатической составляющей	Возможно лишь для рабочего места	Используются различные виды заземлителей
Приведение к максимальному току влияющей линии	Имеется, для всех влияющих ВЛ	Имеется	Имеется, учитывается только ближняя влияющая ВЛ
Комплект измерительной аппаратуры	Прибор измерения тока и напряжения Ц417 и омметр МС-08	КНН-110 (измеритель наведенного напряжения)	Электроизмерительный многофункциональный прибор 43104

Имеющиеся методики определения линий под наведенным напряжением не могут дать одинаковую точность для различных схем заземления, конфигураций сети, так как они имеют ряд допущений. Поэтому для более точного результата необходимо использовать, помимо имеющихся методик, методики и алгоритмы расчета наведенных напряжений для всех потенциально опасных сближений линий энергосистемы. Так как трассы линий по конфигурации являются сложными, а также неоднородными по длине, то в расчетных методах пользуются значительными упрощениями. Для получения более точных результатов необходимо при дальнейшем определении наведенного напряжения использовать комбинированные методы, как расчетные методы, так и математическое моделирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева, Т.Н. Определение наведенных напряжений в сетях 0,38–10 кВ [Электронный ресурс] / Т.Н. Васильева, М.С. Ерузаев, А.А. Харьков // Молодой ученый. – 2017. – № 50. – С. 32–36. URL https://moluch.ru/archive/184/47183/ (дата обращения: 22.05.2018).

2. СТО 56947007-29.240.55.018-2009 Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2008. – 27 с.

3. СТО ИСМ 80380011-ИА/Ф-5500 065-2018. Определение линий (участков линий), находящихся под наведенным напряжением, проведение измерений величины наведенного напряжения, подготовка рабочего места и выполнение работ в условиях наведенного напряжения. Стандарт организации ПАО «МРСК ЮГА», 2018. – 17 с.

4. МВИ. МН 5613 – 2016. Методика выполнения измерений наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи, проходящих вблизи действующих воздушных линий напряжением 110 кВ и выше, 2016. – 15 с.

УДК 62-533.7

РАБОТА УСТРОЙСТВ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТИ 110 КВ ИЛИ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Асосков Р.И. – магистрант
Кущ Л.Р. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В статье приведены сведения об использовании частотно-регулируемого электропривода в ООО «Тепловая генерация г. Волжского». Указываются недостатки способа регулирования. Приведены мероприятия по сохранению в работе оборудования, работающего от частотного привода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асинхронный двигатель, частотное регулирование, перегрузочная способность, падение напряжения.

Главным недостатком асинхронных двигателей является сложность регулирования скорости традиционными способами: изменением напряжения питания и введением в цепь обмоток дополнительных сопротивлений. Более совершенным является частотный привод электродвигателя. До недавнего времени преобразователи стоили дорого, но появление IGBT-транзисторов и микропроцессорных управляющих систем позволило зарубежным производителям, а в последние десять лет и российским создать доступные по стоимости устройства.

В частотно-регулируемом приводе на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором применяются два способа управления – скалярное и векторное. В первом случае одновременно изменяются амплитуда и частота питающего напряжения. Это необходимо для поддержания рабочих характеристик двигателя, чаще всего – постоянное отношение его максимального момента к моменту сопротивления на валу. В результате остаются неизменными КПД и коэффициент мощности во всем диапазоне вращения. Векторное регулирование заключается в одновременном изменении амплитуды и фазы тока на статоре.

Частотное регулирование обладает целым спектром преимуществ по сравнению с другими способами. Автоматизация работы двигателя и производственных процессов. Плавный пуск, устраняющий типичные ошибки, возникающие при разгоне двигателя. Повышение надежности привода частотного и оборудования за счет снижения перегрузок. Повышение экономичности работы и производительности привода в целом. Создание постоянной частоты вращения электродвигателя независимо от характера нагрузки, что важно при переходных процессах. Использование обратной связи дает возможность поддерживать постоянную скорость двигателя при различных возмущающих

воздействиях, в частности при переменных нагрузках. Преобразователи легко встраиваются в действующие технические системы без существенной переделки и остановки технологических процессов. Диапазон мощностей велик, но с их увеличением существенно возрастают цены. Возможность отказаться от вариаторов, редукторов, дросселей и прочей регулирующей аппаратуры или расширить диапазон их применения. За счет этого обеспечивается значительная экономия электроэнергии. Устранение вредного действия переходных процессов на технологическое оборудование, типа гидравлических ударов или повышенного давления жидкости в трубопроводах при снижении ее потребления в ночное время.

Эксплуатационную надежность частотно-регулируемого привода обеспечивает система защит преобразователя, включающая в себя максимально-токовую защиту, защиту от перегрева двигателя и преобразователя, защиту от перегрузки, чрезмерных отклонений напряжения питания, обрыва фазы, междуфазного короткого замыкания и замыкания фазы на землю. Имеющаяся в большинстве преобразователей система автоматического диагностирования значительно упрощает техническое обслуживание и сокращает простои оборудования при неисправностях [1].

Частотно-регулируемые приводы при всех достоинствах имеют существенный недостаток, сказывающийся на надежности работы оборудования и технологического процесса производства в целом. При проектировании частотно-регулируемого привода и установки его на конкретное оборудование предприятие-изготовитель закладывает в настройках определенные величины срабатывания защит, действующих на отключение преобразователя. Эти величины – обычно стандартные для данного типа привода и рассчитываются с запасом, для того чтобы сохранить работоспособность оборудования и не допустить его поломки в период гарантийного срока эксплуатации.

На тепловых электрических станциях, входящих в ООО «Тепловая генерация г. Волжского», частотно-регулируемые приводы установлены на различных насосах перекачки воды и дутьевых вентиляторах энергетических котлов, запитанных от распределительных устройств собственных нужд электростанций 6 кВ и 0,4 кВ. При возникновении однофазных коротких замыканий в сети 110 кВ происходит падение напряжения в сети собственных нужд электростанции. Частотно-регулируемый привод старается поддержать заданные значения частоты, давления или расхода, увеличивая ток. При достижении током величины уставки максимально-токовой защиты происходит немедленное запирание транзисторных ключей инверторов силовых ячеек и формируется команда на отключение питающего выключателя в распределительном устройстве. При включении электродвигателей большой мощности, имеющих тяжелый пуск, запитанных с той же секции распределительного устройства, что и привод, падение напряжения может привести к срабатыванию защиты минимального напряжения и отключению привода.

Проведенный анализ общего числа отключений частотно-регулируемых приводов за период 2010–2018 гг. показал, что 74 % от всех отключений происходят после коротких замыканий в сети 110 кВ и пуска мощных электродвигателей, когда уровень напряжения уменьшается на более чем 80 % от номинального и загрузка частотного преобразователя более 85 %. Работа преобразователя при кратковременном понижении напряжения от 100 % до 80 % и загрузке менее 85 % не приводит к отключению привода при стандартных настройках защит.

Способов сохранить в работе оборудование, работающее от частотного привода, и увеличить надежность технологического процесса производства в целом несколько.

1. Установка частотного привода большей мощности, чем требуется для увеличения перегрузочной способности преобразователя. Она может быть выполнена при проведении расчета экономической эффективности (стоимость привода – возможные убытки).

2. Использование шунтирующего выключателя. При срабатывании защит, требующих отключения частотного привода, система управления подает сигнал на включение шунтирующего выключателя, запитанного от другой секции собственных нужд. Шунтирующий выключатель подключит двигатель напрямую к сети, после чего частотный привод отключится.

3. Разработка алгоритма регулирования, при котором при значительном уменьшении питающего напряжения не происходит увеличения выходной мощности. Так как время коротких замыканий в сети 110 кВ обычно не превышает одной секунды, то отключение частотного привода будет происходить только при затянувшихся коротких замыканиях.

4. Функция шунтирования силовых ячеек. Используется цепь шунтирования внутренних силовых ячеек преобразователя частоты, при этом устройство продолжает работать со снижением выходной мощности.

5. Увеличение выдержки времени по защите минимального напряжения. Используется при частых пусках электродвигателей большой мощности.

Учет предложенных способов при проектировании частотно-регулируемого привода для конкретного производственного оборудования позволит получить хорошие статические и динамические характеристики преобразователя и обеспечит бесперебойную работу электродвигателя повысив тем самым надежность технологического процесса всего производства.

УДК 621.224

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ РАЗГОНА

Капля Е.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Сформирована и решена система дифференциальных уравнений динамики гидравлической турбины. Предложенная математическая модель переходных процессов апробирована на экспериментальных данных разгона одного из гидроагрегатов Волжской ГЭС. Параметры математической модели переходных процессов гидравлической турбины определены по экспериментальным данным разгона турбины методом наименьших квадратов. Результаты моделирования процесса разгона гидравлической турбины хорошо согласуются с экспериментальными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель переходных процессов, гидравлическая турбина, кривая разгона, вращающий момент, нелинейная регрессионная модель, идентификация параметров модели.

Введение

В процессе эксплуатации оборудования персонал гидроэлектростанций сталкивается с проблемой определения характеристик гидроагрегатов (ГА) с помощью существующих средств контроля их состояния и режимов работы. Известные математические модели переходных процессов ГА [1-7] основаны на линейной зависимости механического момента сопротивления от угловой скорости вращения гидравлической турбины (ГТ). Основные характеристики ГТ различных типов нелинейны, и, следовательно, целесообразно использовать нелинейные модели.

Математическая модель

Переходные процессы в гидроагрегате с поворотно-лопастным рабочим колесом (РК) и комбинатором (устройством автоматического согласования угла установки лопастей РК с положением лопаток направляющего аппарата (НА) турбины будем описывать системой уравнений:

$$\begin{cases} J \cdot \dfrac{d}{dt}\omega(t) = M_{в}(\omega(t),\alpha(t),\theta(t)) - M_{с}(\omega(t)) - M_{э}(t) & (1) \\ T_1 \cdot \dfrac{d}{dt}\alpha'(t) + \alpha'(t) = \alpha'_0 + p_1 \cdot u_1(t) + \tilde{\alpha}(t), & (2) \\ T_2 \cdot \dfrac{d}{dt}\theta'(t) + \theta'(t) = \theta'_0 + p_2 \cdot u_2(t), & (3) \\ \omega(t) = 2 \cdot \pi \cdot [\, f'(t) + \Delta f(t)\,], & (4) \\ \alpha(t) = \alpha'(t) + \Delta\alpha(t), & (5) \\ \theta(t) = \theta'(t) + \Delta\theta(t), & (6) \\ u_1(t) = F_1[\alpha_{зад}(t) - \alpha'(t)], & (7) \\ u_2(t) = F_2[\theta_{зад}(t) - \theta'(t)], & (8) \end{cases}$$

где J – осевой момент инерции вращающихся деталей гидроагрегата, кг·м^2, J равен сумме моментов инерции РК, ротора генератора и вала; $\omega(t)$ – угловая скорость вращения РК и ротора генератора, рад/с; t – время, с; $M_{в}(\omega(t),\alpha(t),\theta(t))$ – вращающий момент РК, Н·м; $M_{с}(\omega(t))$ – момент механических сил сопротивления вращению, вызванных механическими потерями в подшипниках, Н·м; $M_{э}(t)$ – электромагнитный момент сопротивления генератора, Н·м; $\alpha(t)$ – угол открытия лопаток НА, градусы; $\theta(t)$ – угол установки лопастей рабочего колеса, градусы; $f(t)$ – частота вращения ротора генератора и рабочего колеса, об/с; $f'(t)$ – измеренная частота вращения ротора генератора и РК, об/с; $\alpha'(t)$ – измеренное значение угла открытия лопаток НА, градусы; α'_0 – начальный угол открытия лопаток НА, градусы; $\theta'(t)$ – измеренное значение угла установки лопастей РК, градусы; θ'_0 – начальный угол установки лопастей РК; $\tilde{\alpha}(t)$ – возмущающее воздействие окружающей среды на лопатки НА; $\alpha_{зад}(t) = \alpha_{ст}(\theta(t), H(t))$ – заданный угол открытия лопаток НА; $\alpha_{ст}(\theta, H)$ – статическая характеристика комбинатора ГА; $H(t)$ – рабочий напор гидротурбины, м; T_1, T_2 – постоянные времени механизмов поворота лопаток НА и лопастей РК соответственно; $u_1(t)$ – выходной сигнал регулятора расхода воды через НА; $u_2(t)$ – выходной сигнал регулятора частоты вращения РК; p_1, p_2 – коэффициенты пропорциональности между управляющими сигналами и вызываемыми угловыми перемещениями; $p_1 \cdot u_1(t)$ – управляющее воздействие на лопатки направляющего аппарата; $p_2 \cdot u_2(\mathrm{t})$ – управляющее воздействие в приводе лопастей РК; $F_1[\alpha_{зад}(t) - \alpha'(t)]$ – сигнал на выходе регулятора расхода воды через НА; $F_2[\theta_{зад}(t) - \theta'(t)]$ – сигнал на выходе регулятора частоты вращения РК; $\Delta f(t)$, $\Delta\alpha(t)$, $\Delta\theta(t)$ – абсолют-

ные погрешности измерений частоты вращения ротора генератора, угла открытия лопаток НА, угла установки лопастей РК соответственно.

Математическая модель основана на трех дифференциальных уравнениях: (1) – уравнение динамики вращательного движения РК, вала и ротора генератора; (2) – уравнение динамики лопаток НА; (3) – уравнение динамики лопастей РК при повороте вокруг собственных осей.

Систему уравнений (1)–(8) нужно дополнить тремя уравнениями, которые определяют функциональные зависимости $M_в(\omega(t), \alpha(t), \theta(t))$, $M_с(\omega(t))$ и $M_э(t)$.

Вращающий момент ГТ

Турбулентность потоков воды не позволяет вычислить точные мгновенные значения вращающего момента и точные мгновенные значения динамической осевой нагрузки на подшипники ГА. Вращающий момент гидротурбины будем аппроксимировать полиномом второго порядка относительно $\alpha(t)$ и $\theta(t)$:

$$\begin{gathered} M_в(t, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5) = H(t)\cdot\alpha(t)\cdot \\ \cdot\left[k_1 + k_2\cdot\theta(t) + k_3\cdot\alpha(t)\cdot\theta(t) + k_4\cdot\theta^2(t) + k_5\cdot\alpha(t)\cdot\theta^2(t)\right], \end{gathered} \tag{9}$$

где k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – параметры математической модели, которые нужно определить.

Электромагнитный момент

Электромагнтный момент сопротивления генератора обычно вычисляют на основе измеренной электрической мощности и угловой скорости вращения ротора:

$$M_э(t) = \frac{P_э(t)}{\omega(t)}, \tag{10}$$

где $P_э(t)$ – электрическая мощность на клеммах генератора. Электрическая мощность может измеряться или вычисляться на основе измеренных токов, напряжений и фазовых углов.

Механический момент сил сопротивления

Механический момент сил сопротивления зависит от угловой скорости вращения. Эту зависимость можно аппроксимировать алгебраическими полиномами. В математической модели 2-го порядка (в квадратичном приближении):

$$M_С(t, \chi_0, \chi_1, \chi_2) = \left[\begin{array}{llll} \chi_2\cdot\omega^2(t) + \chi_1\cdot\omega(t) + \chi_0, & \text{если} & \omega(t) > 0; & \\ -\chi_2\cdot\omega^2(t) + \chi_1\cdot\omega(t) - \chi_0, & \text{если} & \omega(t) < 0; & \\ M_В(t), & \text{если} & \omega(t) = 0 & \text{и} \quad |M_В(t)| \le \chi_0; \\ \chi_0, & \text{если} & \omega(t) = 0 & \text{и} \quad M_В(t) > \chi_0; \\ -\chi_0, & \text{если} & \omega(t) = 0 & \text{и} \quad M_В(t) < -\chi_0, \end{array}\right. \tag{11}$$

где χ_0 – момент трогания РК; χ_1 и χ_2 – коэффициенты сопротивления ГА.

Результаты моделирования переходных процессов

Дифференциальное уравнение (1) после дискретизации времени приводит к рекуррентной формуле:

$$\omega_{j+1} = \omega_j + \frac{\Delta t}{J} \cdot \left[M_B\left(t_j, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5\right) - M_C\left(t_j, \chi_0, \chi_1, \chi_2\right) - \frac{P_Э\left(t_j\right)}{\omega_j} \right], \qquad (12)$$

где T_j – момент времени с номером j; Δt – шаг дискретизации времени.

Формула (12) позволяет определить угловую скорость РК для заданных начальных условий в последующие моменты времени.

Каждой точке на экспериментальной кривой разгона соответствует точка $f_{j(p)}$ на расчетной кривой разгона, полученной в результате моделирования.

Для каждой комбинации значений параметров модели $\{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \chi_0, \chi_1, \chi_2\}$ с помощью формулы (12) можно определить динамику РК и значение целевой функции:

$$D\left(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \chi_0, \chi_1, \chi_2\right) = \sum_{p=0}^{q} \left[2 \cdot \pi \cdot f'\left(t_{j(p)}\right) - \omega_j \right]^2, \qquad (13)$$

где p – номер измерения частоты вращения РК; $p = 0, 1, 2, \ldots, q$.

Величина $D\left(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \chi_0, \chi_1, \chi_2\right)$ является мерой несоответствия экспериментальной и расчетной кривых разгона. На основе метода наименьших квадратов найдена комбинация значений параметров, при которой расчетная кривая разгона наиболее близка к экспериментальной. Минимизация функции $D\left(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \chi_0, \chi_1, \chi_2\right)$ приводит к искомой комбинации значений параметров:

$k_1 \approx 2{,}20 \cdot 10^6$; $k_2 \approx 2{,}767 \cdot 10^3$; $k_3 \approx -8{,}25 \cdot 10^5$; $k_4 \approx 5{,}539 \cdot 10^3$; $k_5 \approx -6{,}60 \cdot 10^5$;

$\chi_0 \approx 5{,}49 \cdot 10^3$; $\chi_1 \approx 2{,}695 \cdot 10^6$; $\chi_2 \approx 0{,}14 \cdot 10^3$.

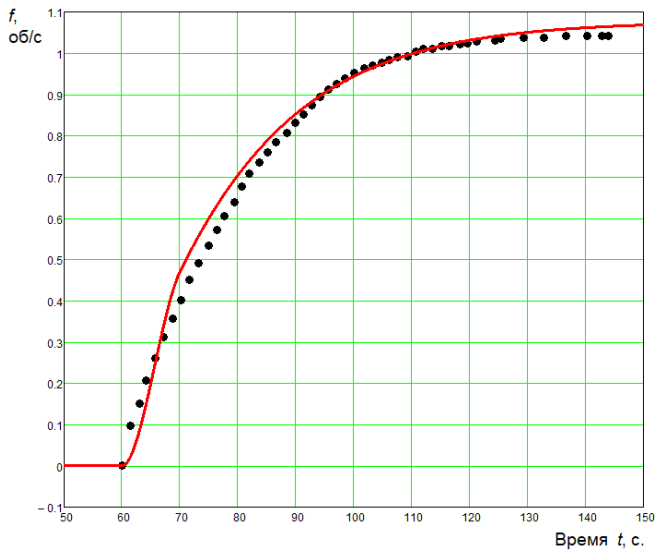

Рисунок. Кривая разгона РК

Результаты численного моделирования и экспериментальные данные, полученные инженерами Волжской ГЭС для одного из гидроагрегатов Волжской ГЭС, представлены на рисунке.

Экспериментальные значения частоты на рисунке отмечены точками. Кривая разгона РК, построенная в результате моделирования, показана сплошной кривой. Расчетная частота вращения незначительно отличается от экспериментальной, что свидетельствует о корректности модели.

Заключение

Сформирована нелинейная математическая модель переходных процессов гидротурбины. Предложенная математическая модель имеет два основных отличия от известных [1-8] моделей:

– вращающий момент гидротурбины представлен полиномом второго порядка относительно $\alpha(t)$, и $\theta(t)$;

– в модели учтен момент трогания рабочего колеса и нелинейные компоненты момента сопротивления вращению ГА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang, C., Yang, M., Li, J. Detailed modelling and parameters optimisation analysis on governing system of hydro-turbine generator unit / C. Zhang, M. Yang, J. Li. // IET Generation, Transmission & Distribution, 2018. – Vol. 12. – Iss. 5. – P. 1045–1051.

2. Kishor, N., Singh, S.P., Raghuvanshi, A.S. Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control / N. Kishor, S.P. Singh, A.S. Raghuvanshi // Energy conversion and management, 47. – 2006. – P. 3119–3137.

3. Herron, J., Wozniak, L. A state-space pressure and speed sensing governor for hydrogenerators / J. Herron, L. Wozniak // IEEE Transactions on Energy Conversion, September 1991. – Vol. 6. – № 3. – P. 414–418.

4. Xu, B., Chen, D., Tolo, S., Patelli, E., Jiang, Y. Model validation and stochastic stability of a hydro-turbine governing system under hydraulic excitations / B. Xu, D. Chen, S. Tolo, E. Patelli, Y. Jiang // Electrical power and energy systems, 95. – 2018. – P. 156–165.

5. Zhang, H., Chen, D., Xu, B., Wang, F. Nonlinear modeling and dynamic analysis of hydro-turbine governing system in the process of load rejection transient / H. Zhang, D. Chen, B. Xu, F. Wang // Energy conversion and management, 90. – 2015. – P. 128–137.

6. Guo, W., Yang, J., Chen, J., Wang, M. Nonlinear modeling and dynamic control of hydro-turbine governing system with upstream surge tank and sloping ceiling tailrace tunnel / W. Guo, J. Yang, J. Chen, M. Wang // Nonlinear Dynamics, 84. – 2016. – P. 1383–1397.

7. Nasir, B.A. Suitable selection of components for the micro-hydro-electric power plant / B.A. Nasir // Advances in energy and power, 2014. – № 2. – P. 7–12.

8. Капля, Е.В., Кузеванов, В.С., Шевчук, В.П. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах / Е.В. Капля, В.С. Кузеванов, В.П. Шевчук. – М.: Физматлит, 2009. – 512 с.

УДК 621.22

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЛЖСКОЙ ГЭС ПАО «РУСГИДРО»

Хаванский Н.Г. – магистрант
Жилина В.И. – д-р экон. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В данной работе рассмотрены методы оценки качества основных элементов центробежного насоса, находящегося в эксплуатации на Волжской ГЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: центробежные насосы, вибрация насосного агрегата, узлы охлаждения подшипников, экспертиза насосов.

Откачку воды из водоприемных емкостей производят стационарно установленными насосами: центробежными и артезианскими. Изначально выделим основные элементы, подверженные высоким нагрузкам в виде трения, вибрации и центробежной силы на примере центробежного насоса типа 28В-12б Волжской ГЭС. Данный тип насосов имеет два вала (вал двигателя и вал насоса) соединенные между собой болтовым соединением по фланцам валов.

Одним из способов оценки качества является мониторинг вибрации вала насосного агрегата. Данный мониторинг проводится путем замера боя вала двигателя, фланцев валов и вала насоса. Замеры производятся путем установки микронометрических индикаторов часового типа на трех соответственных местах агрегата, места размечаются на восемь равных частей (точек замера). Затем, путем проворота агрегата при помощи закрепленного в верхней точке агрегата рычага, вручную делаются провороты всего агрегата и снимаются показания с каждой из восьми точек по валу двигателя, фланцам валов и вала насоса, что дает понимание боя вала в целом и характеризует состояние подшипников в момент замеров. Мониторинг вибрации вала насосного агрегата проводился ежегодно, в течение 6 лет до и после ремонта, табл. 1–12.

Таблица 1

Замеры боя вала агрегата до ремонта 2013 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	6	13	17	9	10	10	10	0
$И_3$	0	12	20	22	8	10	12	17	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	0	0
$И_2$	0	6	12	17	10	10	10	10	0
$И_3$	0	13	19	22	9	10	12	17	0

Из табл. 1 видно, что бой вала превышает допустимый на точке индикатора $И_2$ на 0,07 мм, а на индикаторе $И_3$ – на 0,19 мм. Бой берется по максимальным показателям противоположных точек. К примеру, по индикатору $И_2$ берем противоположные точки 4 и 8, складываем и получаем бой 0,27 мм, когда допустимым боем является 0,2 мм, а на индикаторе $И_3$ на этих же точках – 0,39 мм, вместо допустимых 0,2 мм, что свидетельствует об увеличенных зазорах в направляющих подшипниках. При этом показатель боя вала в верхней точке $И_3$ находится в допуске.

В процессе капитальных ремонтов увеличение боя вала сводилось к допустимому значению за счет регулировки направляющих подшипников.

Таблица 2

Замеры боя вала агрегата после ремонта 2013 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	12	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	15	17	6	8	10	14	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	11	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	14	16	6	8	10	14	0

После регулировки видно, что прежние показатели стали допустимыми и не превышают 0,2 мм.

В процессе эксплуатации каждый год перед началом ремонтов делались аналогичные замеры. Для мониторинга состояния подшипников был взят период с 2013 по 2018 г. (табл. 1–12).

Таблица 3

Замеры боя вала агрегата до ремонта 2014 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–2	1	2	3	2	2	2	0
$И_2$	0	7	15	19	10	12	11	11	0
$И_3$	0	15	22	24	10	11	14	19	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–2	0	1	2	2	1	0	0
$И_2$	0	7	14	18	11	11	11	11	0
$И_3$	0	15	22	23	10	11	13	18	0

Таблица 4

Замеры боя вала агрегата после ремонта 2014 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	12	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	13	17	6	8	10	14	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	1	1	1	1	0
$И_2$	0	3	9	10	8	9	9	9	0
$И_3$	0	9	12	13	5	7	9	12	0

Таблица 5

Замеры боя вала агрегата до ремонта 2015 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–2	1	3	3	2	3	2	0
$И_2$	0	9	17	20	12	13	12	12	0
$И_3$	0	17	23	25	11	12	15	22	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–2	1	3	3	2	3	2	0
$И_2$	0	9	17	20	12	13	12	12	0
$И_3$	0	16	23	24	11	12	15	22	0

Таблица 6

Замеры боя вала агрегата после ремонта 2015 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	12	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	15	17	6	8	10	14	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	11	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	14	16	6	8	10	14	0

Таблица 7

Замеры боя вала агрегата до ремонта 2016 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–3	2	4	4	3	4	3	0
$И_2$	0	10	18	22	15	15	14	15	0
$И_3$	0	19	25	27	14	15	17	24	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–3	2	4	4	3	4	3	0
$И_2$	0	10	18	22	15	15	14	15	0
$И_3$	0	20	25	27	15	15	17	24	0

Таблица 8

Замеры боя вала агрегата после ремонта 2016 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	12	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	15	17	6	8	10	14	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	11	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	14	16	6	8	10	14	0

Таблица 9

Замеры боя вала агрегата до ремонта 2017 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–4	3	5	5	4	4	4	0
$И_2$	0	12	20	23	17	17	15	17	0
$И_3$	0	21	26	28	16	16	17	25	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–4	3	5	5	4	4	4	0
$И_2$	0	12	20	22	17	17	15	17	0
$И_3$	0	21	25	27	16	16	17	25	0

Таблица 10

Замеры боя вала агрегата после ремонта 2017 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	12	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	15	17	6	8	10	14	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	11	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	14	16	6	8	10	14	0

Таблица 11

Замеры боя вала агрегата до ремонта 2018 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–5	4	6	6	4	6	5	0
$И_2$	0	12	20	24	17	17	15	17	0
$И_3$	0	20	27	28	15	16	18	26	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–4	3	5	5	5	6	5	0
$И_2$	0	12	20	23	16	17	16	17	0
$И_3$	0	20	27	27	15	17	17	26	0

Таблица 12

Замеры боя вала агрегата после ремонта 2018 г. (в сотых долях мм)

Точки замеров	**Первый проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	2	2	2	2	2	0
$И_2$	0	4	10	12	8	9	9	9	0
$И_3$	0	11	15	17	6	8	10	14	0
Точки замеров	**Второй проворот**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1
$И_1$	0	–1	0	1	2	1	1	1	0
$И_2$	0	4	10	11	8	9	9	9	0
$И_3$	0	10	14	16	6	8	10	14	0

По полученным данным построим график боя вала в зависимости от срока эксплуатации, представленный на рисунке.

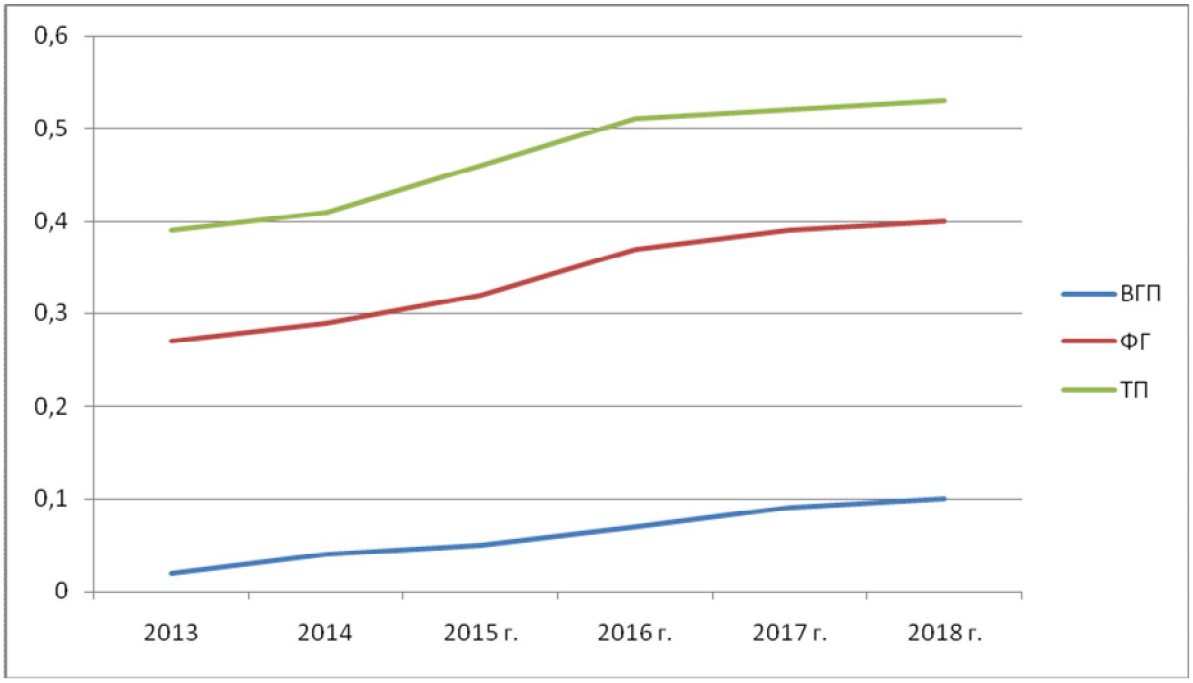

Рисунок. График боя вала центробежного насоса типа 28В-12Б
в зависимости от срока эксплуатации за 2013–2018 гг.

На рисунке виден характерный рост вибрации на основных подшипниках агрегата: верхнем генераторном подшипнике, фланце вала генератора и турбинном подшипнике.

Следующий немаловажный элемент насосного оборудования – узлы охлаждения подшипников. В центробежных насосах типа 28В–12Б таковыми являются маслоохладители. Способом контроля данных элементов является проверка на герметичность трубок маслоохладителей путем осмотра и опрессовки маслоохладителей давлением в 1,5 раза выше рабочего. Опрессовка выполняется путем заполнения маслоохладителей водой и подачей воздуха с одной стороны маслоохладителя, в свою очередь вторая сторона должна быть заглушена. В случае если имеется повреждение трубок маслоохладителя, на внешней стенке трубки появляется вода.

Особое место в оценке качества насосного оборудования, находящегося в эксплуатации, занимает такой способ, как экспертиза. Работы по экспертизе насосов выполняются по индивидуально разработанным программам, согласованным с заказчиком, и включают: анализ технической, ремонтной и эксплуатационной документации; функциональную диагностику; визуальный и измерительный контроль узлов и деталей [3]; контроль деталей на дефекты сплошности методами неразрушающего контроля (дефектоскопия) [1]; при необходимости – определение механических характеристик металла деталей; контроль основных рабочих параметров, характеризующих работоспособность

оборудования и вибрационное обследование; оценку технического состояния, определение возможности и ресурса безопасной эксплуатации.

Техническое диагностирование в основном выполняется во время капитального ремонта [2]. При техническом диагностировании наблюдались следующие дефекты: износ уплотнений (сальник или торцовое уплотнение), подшипников, защитной втулки, износ уплотняющих колец рабочего колеса. В процессе технического диагностирования на протяжении 13 лет выявлялись такие дефекты, как ослабления посадки на валу или трещины на рабочих колесах центробежных насосов. Также за этот период на центробежных насосах обнаруживались трещины на корпусах, износ посадочных мест корпусов под подшипники качения, а на плунжерных насосах изнашивались червячные пары. Во время обследования центробежных насосов трещин непосредственно на валу не наблюдалось.

Необходимо отметить, что часть насосов эксплуатируется более 20 лет, и в настоящее время некоторые из них сняты с производства изготовителями, поэтому особое внимание при ремонте необходимо обратить на используемые запасные части. Для поддержания насосов в технически исправном состоянии необходимо строго соблюдать график правил производства работ и проводить периодический контроль уровня вибрации.

Оценка возможных дефектов насоса осуществляется на основе анализа данных неразрушающего контроля путем определения фактического технического состояния насоса по результатам обследования такими методами неразрушающего контроля, как визуально-измерительный, магнитопорошковый, ультразвуковой и контроль проникающими веществами.

Техническое диагностирование – в целом экспертиза динамического оборудования, в том числе насосного, – позволяет повысить надежность и безопасность при эксплуатации указанного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18442 – 80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования». Сборник стандартов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005.

2. Инструкция ИЭ – ПТС – 209 – 2015 «По эксплуатации оборудования насосной откачки и потерны ГЭС».

3. Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606-03). Серия 03. Выпуск 39. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.

УДК 621.311.26

ГИБРИДНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Ткачев С.В. – магистрант
Курьянов В.Н. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Статья содержит информацию об исследовании ветросолнечной гибридной электростанции.

Введение

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) на сегодняшний день являются наиболее эффективными в строительстве и в других секторах экономики и технологии. Однако из-за низких осведомленности и компетентности потребителей мы не можем говорить об эффективном использовании ВИЭ в полной мере.

Нередки случаи, когда потребитель, устанавливая у себя фотоэлектрические панели, продолжает использовать обычные лампочки накаливания либо, отапливая свой дом с помощью солнечной энергии, не уделяет должного внимания утеплению конструкций дома, из-за чего происходит утечка тепла. Такие ситуации и подводят нас к тому, что зачастую ВИЭ используют нерационально.

Таким образом, использование ВИЭ станет полностью целесообразным и эффективным, если до конечного потребителя дойдет тот факт, что необходимо не только экономить энергию, но и создавать условия для принятия мер по ее сбережению. Лишь в этом случае использование ВИЭ можно будет назвать полностью энергоэффективным и экономным.

1. Эффективность использования ветросолнечных гибридных электростанций

1.1. *Целесообразность и проблемы использования ветросолнечных гибридных электростанций*

В настоящее время в мире, и особенно в России, идет постоянный рост тарифов на электроэнергию. Это связано с тем, что энергетические ресурсы нашей планеты исчерпываются. В ходе исследований ученые выяснили, что ресурсов планеты хватит лишь на несколько десятилетий, в связи с чем вопрос повсеместного перехода на возобновляемые источники энергии является крайне насущным и критичным. Одни из наиболее доступных альтернативных источников энергии – это энергия ветра и солнца. Однако следует учитывать тот факт, что наиболее целесообразным и эффективным, как в промышленности, так и в частном секторе, как в городе, так и в сельской местности, является

комплексное использование этих энергоресурсов. Именно так и появилась идея совмещения ветрогенераторов и солнечных панелей в виде мобильных ветро-солнечных электростанций.

Данный тип мобильных электростанций является гибридным. Допускается его работа как с использованием возобновляемых источников энергии, так и жидкого топлива.

Например, в различных регионах России целесообразно использование гибридных электростанций (ЭС), так как количество солнечных и ветряных дней в году разнится от региона к региону. Также в России есть огромное количество труднодоступных местностей, в которых использование гибридных электростанций может стать реальным спасением и выходом из ситуации с дефицитом электроэнергии.

1.2. *Алгоритм работы «гибридных» электростанций*

Выработанная энергия от ветрогенераторов и солнечных батарей аккумулируется в аккумуляторных батареях (АБ). Далее выпрямленный ток с АБ с помощью инверторов преобразуется в переменный ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Данная электроустановка предназначена для потребления электроэнергии в бытовых сетях, промышленности и труднодоступных регионах, а также может служить аварийно-резервным источником электроэнергии (рис. 1).

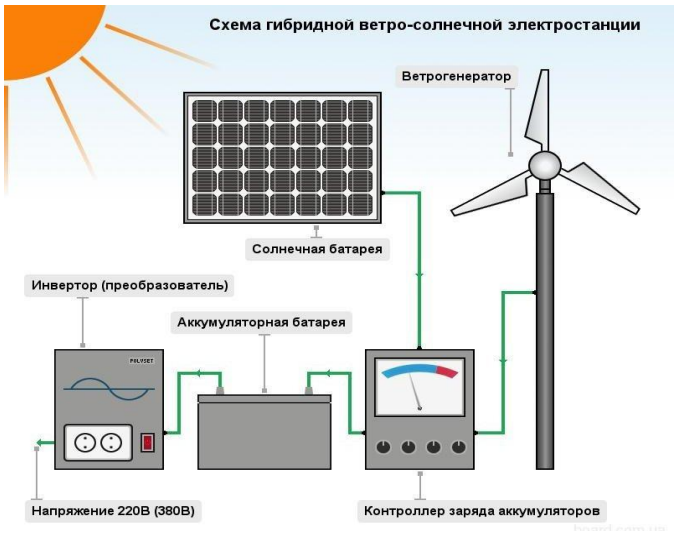

Рис. 1. Схема наглядной гибридной электростанции

1.3. *Достоинства и недостатки использования гибридной электроустановки*

Несомненным плюсом использования ветросолнечных электростанций является их мобильность. При необходимости энергоустановка может быть монтирована при любых погодных условиях и практически в любой местности. Также следует отметить, что гибридные ЭС обеспечивают бесперебойное электроснабжение даже в минимально необходимом количестве и при этом могут гарантировать отсутствие скачков напряжения в сети.

Одним из главных и неоспоримых плюсов гибридных ЭС является возможность их установки с учетом требований и запросов потребителей. Здесь же кроется и существенный минус гибридных электростанций – неспособность обеспечить потребителей, которым необходимы большие мощности. Однако если учесть тот факт, что гибридные ВИЭ требуют минимальных затрат на установку и обслуживание, а срок эксплуатации такой электроустановки составляет в среднем 10–15 лет при отсутствии вреда для окружающей среды, то однозначная польза ВИЭ более чем очевидна.

2. Научно-исследовательский полигон. Результаты исследования

2.1. *Построение графика нагрузки мощности исследуемого объекта*

В ходе исследовательской работы по данным потребителя мощности полигона МЭИ в г. Волжском был построен график потребляемых мощностей в разные периоды времени (рис. 2).

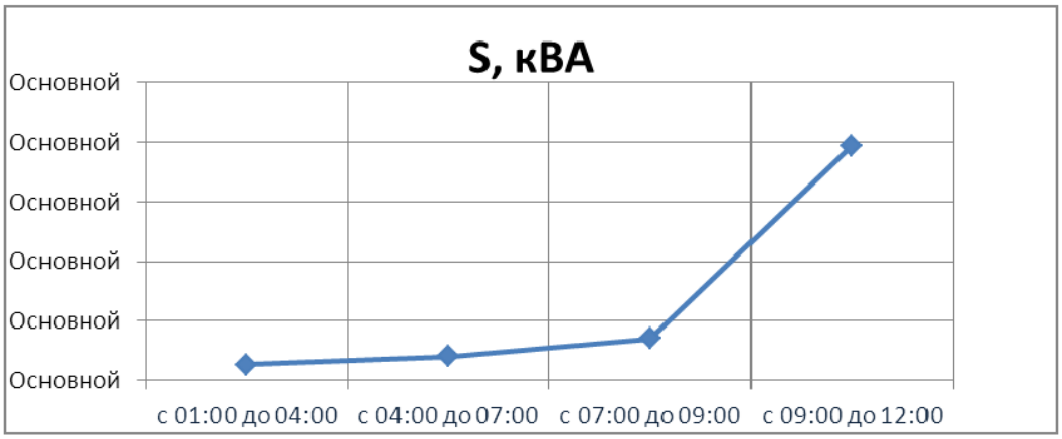

Рис. 2. График потребляемой полной мощности

Из графика видно, на каком этапе происходит падение мощности. Как правило, на отрезках падения мощности задействуют аккумуляторные батареи. Использование аккумуляторных батарей экономически невыгодно. Таким образом, необходимо задействовать дополнительные солнечные панели и ветрогенераторы.

2.2. *Погодные условия в регионе расположения электроустановки*

Как видно из графика (рис. 3), в регионе расположения электроустановки климатические условия с примерно равным количеством солнечных и пасмурных дней. Максимальное количество солнечных дней в году – в период с апреля по октябрь. При этом скорость ветра на протяжение всего года является среднедостаточной для бесперебойной работы ветрогенераторов. В зимний период, примерно с ноября по март, количество солнечных дней составляет в

среднем 5–7 дней. На нижеприведенных графиках (рис. 3–5) мы рассмотрим эти периоды более детально.

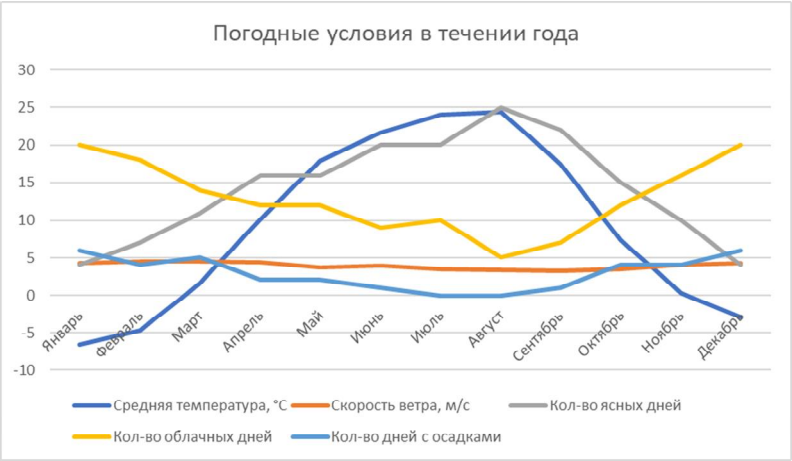

Рис. 3. График погодных условий в течение года
в регионе расположения электроустановки

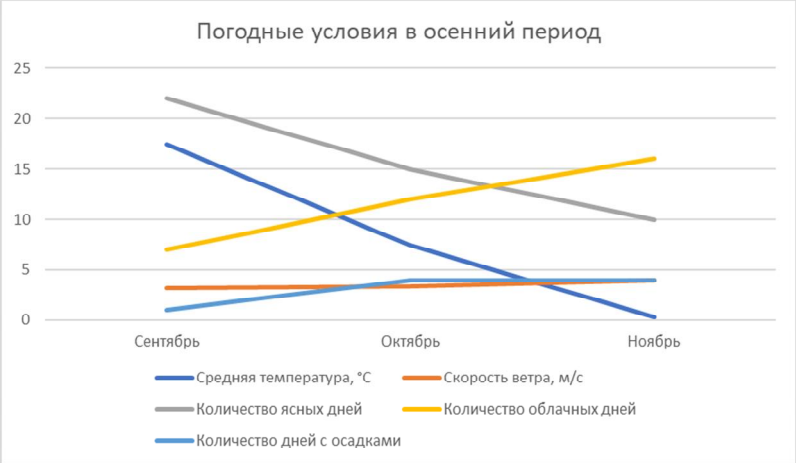

Рис. 5. График погодных условий в осенний период
в регионе расположения электроустановки

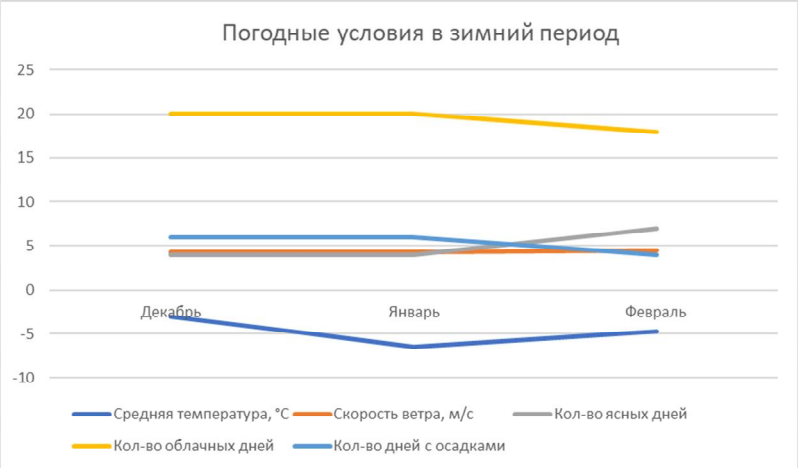

Рис. 6. График погодных условий в зимний период
в регионе расположения электроустановки

Как видно из рисунков, в среднем скорость ветра не падает ниже 4–5 м/с, что является достаточным для работы ветрогенераторов.

Исходя из этого можно избежать применения аккумуляторных батарей для электроустановки полигона МЭИ, сократив при этом расходы на монтаж электроустановки, а также ее дальнейшую эксплуатацию.

2.3. *Описание выбранной солнечной панели*

В ходе исследований было изучено и проанализировано оборудование фотоэлектрических элементов (ФЭМ). Исходя из этого была выбрана солнечная батарея 200 Вт ФСМ-200М монокристалл. В табл. 1 приведены ее характеристики.

Таблица 1

Характеристики солнечной батареи 200Вт ФСМ-200М монокристалл

Параметры	Значения
Номинальное напряжение	24 В
Мощность	200 Вт ±3 %
Напряжение холостого хода	45,5 В
Напряжение при работе на нагрузку	37,2 В
Ток при работе на нагрузку	5,38 А
Температура эксплуатации и хранения	–40 ... +85 °С
Коннекторы	MC4
Класс защиты	IP 65
Солнечные элементы	Grade A, монокристалл
Количество диодов	3 шт.
Габариты	1580 х 808 х 35 мм
Вес	15,5 кг

Как видно из табл. 1, данный тип солнечных батарей может работать при выдаваемой мощности 200 Вт, что позволяет сократить количество устанавливаемых солнечных элементов. Номинальное напряжение в 24 В присутствует у любого ФЭМ, поэтому внимание на данной характеристике можно не акцентировать. Также следует отметить широкий диапазон температуры эксплуатации и хранения данного ФЭМ. Средняя температура в регионе расположения электроустановки в самый холодный месяц составляет –7 °С, а в самый жаркий – +27 °С. Диапазон температуры эксплуатации данного ФЭМ позволит использовать его даже при рекордных для данного региона температурных скачках. Класс защиты данного ФЭМ достаточно высокий, что позволит с легкостью избежать попадания внутрь его оболочки инородных тел или воды. По габаритам данный ФЭМ значительно меньше конкурентов, а срок его эксплуатации при надлежащей установке и обслуживании составит около 25 лет. Солнечные элементы, используемые в данном ФЭМ, – монокремниевые, а значит, КПД у них на уровне 20 %, что является достаточно хорошим показателем.

2.4. *Описание выбранного ветрогенератора*

В ходе исследований было установлено, что при выборе ветроэнергетических установок следует руководствоваться их техническими характеристиками и габаритами (табл. 2). Исходя из этого была выбрана модель MAGLEV 600.

Таблица 2

Характеристики ветрогенератора MAGLEV 600

Параметры	Значения
Модель	MAGLEV 600
Номинальная мощность	600 W
Размеры ротора (высота х диаметр, м)	1,32 х 1,50 м
Вес	40 кг
Материал лопастей	алюминиевый сплав
Количество лопастей	3
Скорость ветра для страгивания	1 м/с
Минимальная скорость ветра для генерации	2 м/с
Минимальная скорость ветра для зарядки	2,5 м/с
Оптимальная скорость ветра для номинальной мощности	12 м/с
Скорость автоматического отключения	15 м/с
Максимальная скорость ветра	65 м/с
Тип генератора	3-фазный генератор
Выходное напряжение	24 V
Выходная сила тока	< 20 Amp
Контроллер автоматического отключения	автоматический тормоз короткого замыкания
Диапазон рабочих температур	от –30 до +50 ºС
Молниезащитная система нержавеющего стального шара	диаметр шара 20 см, нержавеющий стальной стержень 35 мм

Номинальная мощность в 600 Вт позволит сократить количество требуемых ветрогенераторов, что опять же позитивно скажется на экономической стороне. Алюминиевый сплав, из которого изготовлены лопасти, а также высота данного ветрогенератора и его вес позволяют установить несколько ветрогенераторов на одной мачте. Минимальная скорость ветра для генерации энергии у данного ветрогенератора составляет 2 м/с. В регионе расположения электроустановки средняя скорость ветра в течение года составляет 4–5 м/с, что является достаточным для работы данного ветрогенератора.

Однако в нужном нам регионе нередко усиление ветра до 7–10 м/с с порывами 15–17 м/с. Данный тип ветрогенератора может работать при оптимальной скорости ветра в 12 м/с. При 15 м/с происходит автоматическое отключение ветрогенератора, что не является проблемой, так как сильные порывы ветра характерны для летних месяцев, в которых присутствует большое количество солнечных дней. Диапазон рабочих температур данного ветрогенератора также достаточно широк для его беспроблемного использования в нужном нам регионе.

3. Расчет количества ветрогенераторов MAGLEV 600 и солнечных панелей модели ФСМ 200 на научно-исследовательском полигоне

Данные полигона: длина 64,3 м, ширина 29 м, общая площадь 1864,7 м^2.

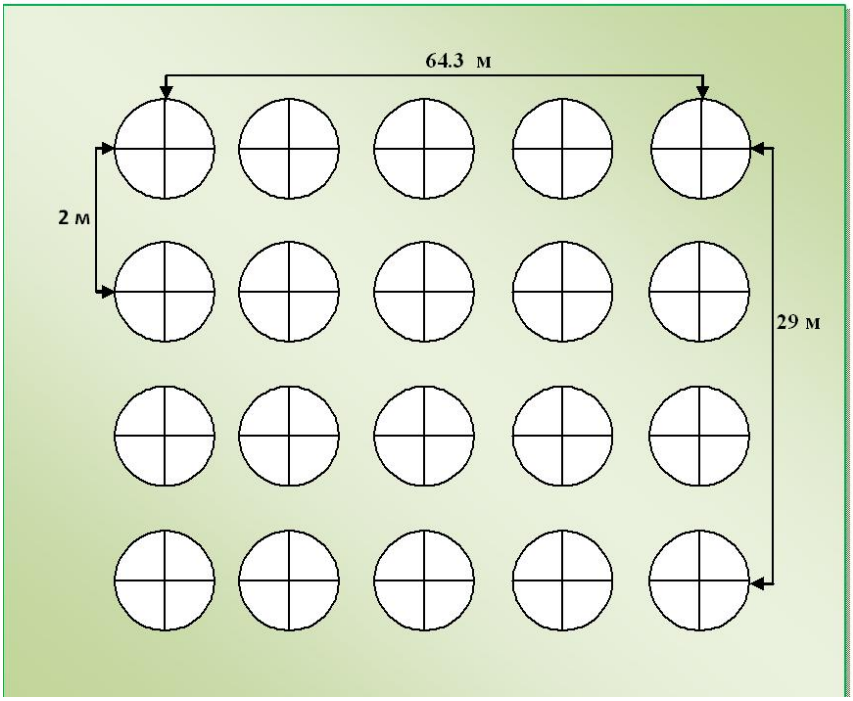

Рис. 6. Расчет количества ветрогенераторов модели MAGLEV 600
для научного полигона потребляемой мощности 100 кВт

Количество ветрогенераторов модели MAGLEV 600 (с вырабатываемой мощностью 600 Вт для полигона с потребляемой мощностью 100 кВт): 100 000 Вт / 600 Вт = 166 шт.

Количество ветрогенераторов в одном ряду (при длине полигона 64,3 м и ширине ротора 1,5 + 1 = 2,5 м, с учетом расстояния между другими ветрогенераторами и установкой опорной мачты ветрогенератора): 64,3 / 2,5 = 25 шт.

Расстояние между ветрогенераторами с учетом зазора между рядами 2 м: 1,5 + 2 = 3,5 м.

Рассчитаем количество рядов (при ширине полигона 29 м и ширине ветрогенератора с учетом зазора 2 м между рядами): 29 / 3,5 = 8 рядов.

Рассчитаем общее количество ветрогенераторов на полигоне. Если в одном ряду 25 шт., а общее количество рядов 8, получаем: 8 · 25 = 200 шт.

Выходная мощность: 200 шт. · 600 Вт = 120 000 Вт (120) кВт.

При объединении четырех ветрогенераторов MAGLEV 600 на одной мачте выходная мощность составит 2400 Вт. Для потребляемой мощности полигона 100 кВт их потребуется: 100 000 Вт / 2400 Вт = 41 шт.

Количество ветрогенераторов в одном ряду (при длине полигона 64,3 м и ширине ротора 1,5 + 1,5 = 3 м, с учетом расстояния между другими ветрогенераторами,

расположенными в одном ряду, и установкой опорной мачты с поддерживаемыми ее растяжками «ванты»): 64,3 / 3 = 21 шт.

Расстояние между ветрогенераторами (с учетом зазора между рядами 2 м и с учетом установки растяжки «ванты» для опорной мачты 1 м): 1,5 + 1 + 2 = 4,5 м. Рассчитываем количество рядов при ширине полигона 29 м. Получаем 29 м / 4,5 = = 6 рядов.

Рассчитаем общее количество ветрогенераторов на полигоне. Если в одном ряду их 21 шт. и общее количество рядов 6, получим 6 · 21 = 126 шт.

Выходная мощность 126 · 2400 = 302 400 Вт (302 кВт).

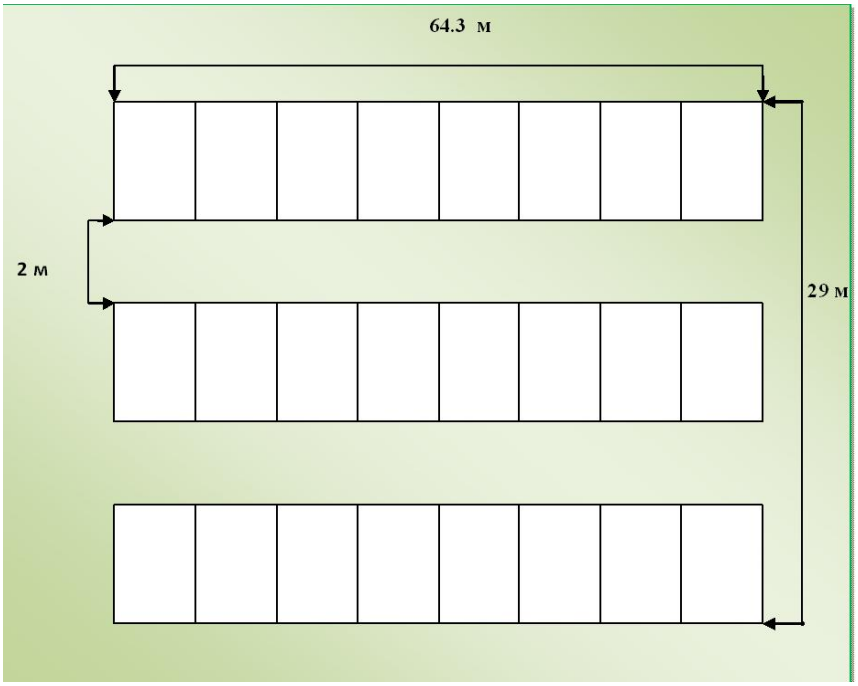

Рис. 7. Расчет количества солнечных панелей ФСМ 200
для научного полигона потребляемой мощности 100 кВт

Количество солнечных панелей модели ФСМ 200 с вырабатываемой мощностью 200 Вт для полигона с потребляемой мощностью 100 кВт составит 100 кВт / 200 Вт = 500 шт.

Количество панелей в одном ряду (при длине полигона 64,3 м и ширине солнечной панели 80,8 см): 64,3 м / 0,808 м = 79 шт.

Панель при установке под углом 45 градусов и длине 1,58 м (с учетом зазора 2 м) занимает 1,125 + 2 = 3,125 м.

Рассчитаем количество рядов (при ширине полигона 29 м и длине панели с учетом зазора 2 м между рядами): 29 м / 3,125 м = 9 рядов.

Рассчитаем общее количество панелей. Если в одном ряду 79 панелей и общее количество рядов 9, то получим 9 · 79 = 711 шт.

Выходная мощность 711 · 200 Вт = 142 200 Вт (142 кВт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велькин, В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах / В.И. Велькин. – Екатеринбург: Издательство УрФУ, 2015.
2. Безруких, П. Возобновляемая энергетика: сегодня – реальность, завтра – необходимость / П. Безруких. – М., 2007.
3. Земсков, В.И. Возобновляемые источники энергии в АПК / В.И. Земсков. – М., 2014.
4. Шкрадюк, И.Э. Тенденции развития возобновляемых источников энергии в России и мире / И.Э. Шкрадюк. – М., 2010.
5. Елистратов, В.В. Использование возобновляемой энергии / В.В. Елистратов. – СПб., 2010.
6. Каргиев, В.М. Потенциал возобновляемых источников энергии в России. Существующие технологии / В.М. Каргиев. URL: https://www.twirpx.com/file/2450085/

УДК 621.31

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА ЛИНИИ 10 КВ

Наумов А.В. – магистрант
Курьянов В.Н. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В статье содержится информация об основных мероприятиях по уменьшению технических потерь электроэнергии при внедрении интеллектуальных систем в энергосистему города.

К основным мероприятиям по уменьшению технических потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях можно отнести следующие:

− использование в роли основного класса напряжения 10 кВ;

− наращивание количества распределительных сетей 35 кВ;

− уменьшение протяженности и ввод новых воздушных линий 0,4 кВ только трехфазных по всей длине;

− использование для линий низкого класса напряжения самонесущих изолированных и защищенных проводов (СИП);

− недопущение использования сечения провода ниже нормативного;

− внедрение в состав энергорайона новых экономичных силовых трансформаторов;

− сокращение длины распределительных линий 0,4 кВ с помощью маломощных трансформаторов, устанавливаемых на столбах;

− повышение качества электрической энергии с помощью применения современных автоматических устройств РПН (регулирования напряжения), устройств локального регулирования напряжения, вольтодобавочных трансформаторов;

– использование системы автоматизации и телемеханики распределительных сетей для поддержания нормального режима работы энергорайона, недопущения аварийных нарушений и уменьшения длительности технического обслуживания, нахождения места повреждения.

Такой подход позволит обеспечить оперативность и безопасность мониторинга, управления и контроля состояния оборудования распределительных сетей. Кроме этого, системы автоматизации выполняют функции измерения, построения графиков, ведения архивов и ведомостей, что позволит на основе получаемых данных выполнять различного вида расчеты.

Благодаря использованию систем автоматизации и телемеханики измеряемые данные становятся более достоверными. Это связано с тем, что системы автоматизации имеют точные измерительные устройства (контроллеры присоединения, МИП) и обладают функциями алгоритмической обработки получаемых данных измерений (например, усреднение или сравнение измерений различных устройств с одного измерительного трансформатора).

Изменение топологии системы

Изменение топологии системы приводит к изменению гармонического состава напряжения. Данный факт был детально проанализирован, и сделан вывод, что при определенной топологии сети низких классов напряжения амплитуда 5-й и 7-й гармоники могли скачкообразно увеличиться и превысить допустимые значения.

Исследования сети низкого класса напряжения показали, что частотная характеристика системы имеет резонансную форму, при этом резонансная частота составляла в районе 5-й и 7-й гармоник. В то же время данный показатель зависит не только от топологии сети, но и от характера нагрузки.

Выходом из такой ситуации является принятие следующих решений:

– изменение конфигурации сети путем подключения резервных линий, используемых только в аварийных ситуациях;

– ввод и использование резервных межсистемных линий электропередач.

Ввиду сильной разветвленности и большой длины линий электропередач изменение конфигурации сети в условиях энергетического комплекса России является сложным и неэффективным. В принципе изменение топологии сети не является универсальным способом борьбы с потерями электроэнергии.

Пассивные фильтры

Еще одним способом улучшения параметров качества электроэнергии является применение пассивных фильтров. Они состоят из пассивных реактивных элементов (катушка и конденсатор). При совместном использовании данных элементов ввиду частотной зависимости их реактивного сопротивления можно выполнять подавление гармонических составляющих тока или напряжения.

Различные комбинации пассивных реактивных элементов при установке на линии могут формировать следующие фильтры:

– поперечные компенсаторы;
– продольные заградительные контуры;
– поперечные резонансные цепи;
– П-образные фильтрующие звенья.

Основной функцией компенсаторов является компенсация реактивной мощности. Наряду с основной функцией, компенсаторы выполняют подавление высших гармоник в составе сигнала. Это становится возможным потому, что в составе компенсаторов присутствуют конденсаторы. Конденсаторы вместе с индуктивными сопротивлениями сети и нагрузки формируют колебательный контур, который подавляет одну из гармоник сигнала.

Компенсаторы могут быть как регулируемые, так и нерегулируемые. Компенсаторы с возможностью регулирования подстраивают выработку реактивной мощности таким образом, чтобы величина регулирования соответствовала текущим параметрам индуктивного сопротивления сети. Такие компенсаторы устанавливают на электровозах, так как электропривод электровоза является нелинейной нагрузкой, что приводит к появлению гармоник в составе синусоидального сигнала.

Если параллельно с конденсатором включить реактор с воздушным сердечником, то получится последовательный заграждающий фильтр. Такая реактивная цепь настраивается на подавление седьмой гармоники.

Заграждающий фильтр лучше всего применять на вводах трансформатора. В этом случае уменьшается влияние топологии сети на свойства фильтра.

Также эффективность такого решения заключается в том, что при использовании заграждающего фильтра требуется меньшее количество конденсаторных установок, не требуется применения автоматических выключателей, однако необходимы относительно сложные схемы защит.

Сходными по своим свойствам являются П-образные пассивные фильтры низких частот. Частота среза таких фильтрующих звеньев составляет 50 Гц. С увеличением частоты собственное затухание такого звена возрастает.

Активные фильтры и устройства с автоматической стабилизацией формы напряжения и тока

Лучшими характеристиками для подавления гармоник обладают активные фильтры. Применение активных фильтров является одним из самых действенных методов борьбы с гармоническими искажениями. Активные фильтры выполняются на базе мощных силовых полупроводниковых преобразователей. Уменьшение содержания гармоник с помощью активного фильтра осуществляется за счет введения в высоковольтную цепь через повышающий трансформатор сигнала гармонического тока или напряжения. В российских сетях такие фильтры применения не нашли.

Магнитный синтезатор является устройством, предназначенным для стабилизации токов и напряжений. Магнитный синтезатор – один из эффективных методов борьбы с гармониками.

Данное устройство выполняет защиту потребителей электроэнергии от искажений входного напряжения, в том числе от провалов, импульсов, выбросов, высокочастотных помех и высших гармоник.

Для стабилизации токов собирается стабилизатор тока, в состав которого входит датчик тока, высокодобротный фильтр, фазовращатель, схема сравнения, усилитель мощности и балластного потребителя.

Датчик тока – устройство, предназначенное для измерения тока. По своей конструкции датчик тока является электронным аналогом измерительного трансформатора тока. Измерительные кабели подключаются к первичной обмотке датчика тока, а датчик тока в свою очередь преобразовывает значение тока в напряжение, данное напряжение является исходными данными для цифровой обработки выполненных измерений. Главным преимуществом датчика тока является поддержка на своем выходе стабильной величины напряжения, пропорциональной его мгновенному значению тока.

Вольтодобавочные устройства

Для распределительных сетей низкого класса напряжения вольтодобавочные устройства целесообразно применять, как активный фильтр во вторичной цепи силового трансформатора.

При таком применении вольтодобавочного устройства необходимо создать следующую структуру из силового оборудования:

− силовой трансформатор имеет первичную и вторичную обмотки;

− в первичную обмотку устанавливается датчик тока;

− во вторичную обмотку устанавливается вольтодобавочный преобразователь и оптимизатор.

При такой структуре датчик тока измеряет первичный сигнал, поступающий на трансформатор, и передает значения на оптимизатор. Оптимизатор выполняет гармонический анализ и выдает управляющее воздействие на вольтодобавочное устройство. Вольтодобавочное устройство в зависимости от управляющего воздействия подавляет нужный спектр гармоник сигнала.

Совместно с устройствами повышения качества электроэнергии при решении задач снижения потерь необходимо применять интеллектуальные электронные устройства, в частности микропроцессорные устройства анализа и контроля качества электроэнергии.

К таким устройствам можно отнести современные счетчики (например, фирмы «Меркурий») и анализаторы качества электроэнергии (например, фирмы «SATEC»).

Измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения можно проводить при помощи анализатора качества электроэнергии PM175 SATEC. Область применения прибора – измерение прямых показатели качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Вычисление значений коэффициентов гармоник осуществляется в соответствии с ГОСТ 13109-97:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100,$$

$$K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_1} \cdot 100,$$

где $U_{(n)}$ – действующее значение n-й гармонической составляющей напряжения; $I_{(n)}$ – действующее значение n-й гармонической составляющей тока; U_1 – действующее значение напряжения основной частоты; I_1 – действующее значение тока основной частоты.

Прибор был настроен на запись значений гармонических составляющих (с 1 до 16) токов и напряжений по каждой фазе с интервалом времени 3 сек. Осуществлялись измерения и запись коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения с интервалом времени 1 мин. В соответствии с методикой ГОСТ 13109-97 вычисление значений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока производилось по формулам:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} U_{(n)}^{\ 2}}}{U_1} \cdot 100,$$

$$K_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} I_{(n)}^{\ 2}}}{U_1}.$$

Данный прибор обладает различными интерфейсами (Ethernet, RS485) и протоколами (МЭК 60870-5-103, МЭК 60870-5-104, DNP). С помощью данных протоколов осуществляется передача данных в центры сбора данных для их агрегации и выполнения комплексного анализа количественных показателей качества электроэнергии.

Учет и контроль вырабатываемой и потребляемой энергии осуществляется с помощью счетчиков электроэнергии. Одним из таких счетчиков является Меркурий 234ARTM. Данный счетчик позволяет выполнять учет электроэнергии в одно- или двунаправленном режиме и соответствует классу точности 0,2S. Различные модификации устройства позволяют выполнить передачу данных в центры сбора данных с помощью интерфейса RS-485, PLC, GSM\GPRS, Ethernet, радиомодуля, CAN.

Применение счетчиков с двунаправленным режимом учета электроэнергии позволяет фиксировать не только величину потребляемой, но и величину вырабатываемой электроэнергии. Данный факт в сочетании с современными возможностями средств передачи данных позволит утверждать, что использование

двунаправленных приборов учета в составе централизованных автоматизированных систем позволит избежать фактов несанкционированного потребления электроэнергии и выполнить комплексный анализ существующих потерь электроэнергии для различных уровней энергетических систем.

Выводы

Современный уровень развития энергетики и экономическая ситуация в стране предполагают постановку вопроса об оптимизации потерь энергии и повышения энергоэффективности за счет увеличения энергосбережения, внедрения интеллектуальных систем учета, использования передовых установок, сочетающих в себе несколько функций выработки энергии, выполнения различных мерориятий, направленных на модернизацию элементной базы энергетических систем. Основной задачей энергосистемы в целом является обеспечение работы инженерных систем различных потребителей (жилых зданий, производственных комплексов и др.).

Для нормального функционирования зданий (как жилых, так и производственных) и объектов их необходимо оснащать системами теплоснабжения, электроснабжения и хладоснабжения (кондиционирования воздуха). Зачастую эти системы являются обособленными и никак не связаны друг с другом. Такая схема энергоснабжения приводит к длительному простою части оборудования, эксплуатации установок в неэкономичных режимах и перерасходу энергии в совместных режимах. В результате вместо существенного уменьшения затрат летом потребителям приходится оплачивать расходы и на горячее водоснабжение, которое обеспечивается работой котельных в неэффективных режимах, и на кондиционирование.

Применение интеллектуальных устройств учета электроэнергии и принятие мер по предупреждению несанкционированного потребления электроэнергии позволят уменьшить долю коммерческих потерь. Одновременно с применением интеллектуальных устройств учета необходимо использовать современные средства анализа качества электроэнергии.

Объединение интеллектуальных устройств учета и анализа качества электроэнергии в составе общей автоматизированной системы, которая управляет работой устройств повышения качества электроэнергии, позволит создать адаптивную систему, регулирующую показатели качества электроэнергии в зависимости от возникающих режимов работы энергосистемы. Наличие в автоматизированной системе алгоритмов расчета потерь электроэнергии на основе получаемых данных от устройств учета и анализа качества электроэнергии позволит выработать модель развития для каждого энергорайона и энергосистемы в целом.

СЕКЦИЯ № 2

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 62-622

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРЕ ВОДОРОДА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНОГО СМЕШИВАНИЯ

Пивченко А.В. – аспирант
Рогалев Н.Д. – д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена математическому исследованию процессов, происходящих в химическом генераторе водорода, который функционирует на основе гидролиза алюминия. Исследуется модель идеального смешивания непрерывного действия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водородный генератор; гидролиз алюминия; реактор идеального смешивания; время пребывания частиц в реакционной зоне; проскок частиц; закон нормального распределения; несимметричное распределение, распределение Релея, функция концентрации, уравнение материального баланса, конценрация щелочи.

В филиале МЭИ в г. Волжском ведутся работы по разработке генератора водорода на основе гидролиза алюминия [1].

Реактор идеального смешивания непрерывного действия характеризуется тем, что реактивы находятся в состоянии динамического равновесия, при этом концентрации реагентов и продуктов реакции в каждой точке реактора одинаковы (за исключением водорода). Температура также одинакова. Процесс рассматривается изотермический.

Время пребывания твердых частиц в реакторе неодинаково. Они могут мгновенно войти – выйти или задержаться в реакторе бесконечно долго.

Для большинства частиц время их пребывания в реакторе близко к среднему времени пребывания, которое равно

$$T_{\text{ср}} = \frac{V}{Q},$$

где V – объем реагентов, загружаемых в реактор; Q – объемная подача реагентов в реактор.

Постулируем, что время пребывания твердых частиц в реакторе подчиняется закону, близкому к закону нормального распределения. Частота

ухода инертной частицы из реактора будет характеризоваться функцией плотности вероятности:

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{ср})^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднее квадратичное отклонение от среднего времени пребывания твердой частицы в реакторе (параметр распределения).

Нормальное распределение является математической абстракцией и охватывает временной интервал от –∞ до +∞. Нижний предел времени пребывания частицы ограничен начальным (нулевым) моментом времени.

Если σ достаточно мало, то мы можем пользоваться предложенным распределением. Для реактора идеального смешивания σ = *V*/*Q* (равна среднему времени пребывания), то есть достаточно велика. Предварительный анализ показал, что использование закона нормального распределения в том виде, который приведен выше, будет давать относительно невысокую точность (погрешность может составлять 20…25 %). Иллюстрация причины такой погрешности представлена на рисунке.

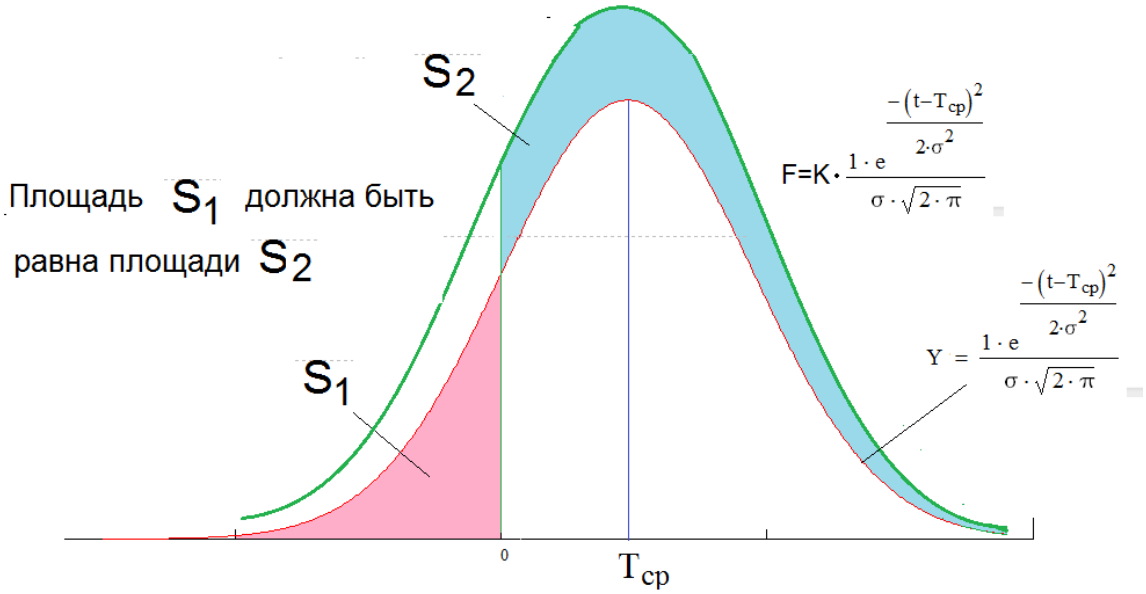

Рисунок. Функция плотности вероятности пребывания твердых частиц в реакционной зоне генератора

Если σ достаточно мало, то

$$\int_{0}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{ср})^2}{2\sigma^2}} dt \approx \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{ср})}{2\sigma^2}} dt = 1.$$

Если σ велико, как в нашем случае, то

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}} dt \neq 1,$$

поэтому в функцию плотности вероятности введем дополнительный множитель:

$$K = \frac{1}{\int_0^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}} dt}.$$

Таким образом, частота ухода твердой частицы из реактора будет характеризоваться видоизмененной функцией F, определенной на интервале значений времени t от 0 до +∞. Функция эта имеет вид:

$$F = K \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}$$

Можно легко убедиться, что для этой функции

$$\int_0^{+\infty} K \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})}{2\sigma^2}} dt = 1.$$

Следует отметить, что вместо предложенной здесь видоизмененной функции нормального распределения F возможно воспользоваться одним из несимметричных распределений, например распределением Релея, которое позволяет получить близкие результаты. Впрочем, характер распределения еще требует дополнительных исследований.

Вероятность того, что частица пробудет в реакторе время большее, чем $T_{\text{ср}}$, равна

$$P_{\text{б}} = \int_{T_{\text{ср}}}^{+\infty} K \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})}{2\sigma^2}} dt = 0{,}594.$$

Вероятность того, что частица пробудет в реакторе время меньшее, чем $T_{\text{ср}}$, будет равна

$$P_{\text{м}} = \int_0^{T_{\text{ср}}} K \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})}{2\sigma^2}} dt = 0{,}406,$$

$$P_{\text{б}} + P_{\text{м}} = 1.$$

Скорость растворения описывается функцией концентрации и температуры Z (τ, c) [2].

Отложим на временной оси координату, соответствующую времени полного растворения частицы. Вероятность того, что частица растворится полностью, то есть что она находится в реакторе время, достаточное для полного растворения, определится выражением:

$$P_{\text{раств}} = \int_{T_{\text{раств}}}^{\infty} K \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})}{2\sigma^2}} dt.$$

Вероятность того, что частица покинет реактор, не полностью прореагировав с раствором щелочи:

$$P_{\text{нераств}} = \int_{T_0}^{T_{\text{раств}}} K \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-(t-T_{\text{ср}})}{2\sigma^2}} dt.$$

Количество «инертных» частиц алюминия, одновременно находящихся в реакторе, т. е. количество частиц, которые одновременно находились бы в реакторе, если бы они оставались инертными по отношению к раствору щелочи и не растворялись:

$$N_{\text{ин}} = n_{\text{вх}} T_{\text{ср}},$$

где $n_{\text{вх}}$ – количество частиц алюминия, подаваемых в реактор в единицу времени (шт./сек).

В действительности в любой произвольный момент времени часть частиц полностью прореагировала со щелочью и перестала существовать. Для учета материального баланса частиц будем считать, что они, как геометрические точки, попрежнему находятся в реакторе. Обозначим количество этих частиц $N_{\text{раств}}$:

$$N_{\text{раств}} = N_{\text{ин}} P_{\text{раств}}.$$

Количество нерастворившихся до конца частиц, единовременно находящихся в реакторе, обозначим $N_{\text{нераств}}$.

$$N_{\text{нераств}} = N_{\text{ин}} P_{\text{нераств}}.$$

Количество частиц, проскакивающих в единицу времени через реактор недорастворившимися:

$$n_{\text{вых}} = \frac{N_{\text{нераств}}}{T_{\text{ср}}}.$$

Запишем теперь уравнение материального баланса для алюминия:

$$Q_{\text{Al}} = W_{\text{Al.проскок}} + W_{\text{Al.реакц}},$$

где Q_{Al} – секундный расход алюминия на входе в реактор; $W_{Al.проскок}$ – секундный проскок алюминия сквозь реактор; $W_{Al.реакц}$ – секундный расход алюминия в реакторе.

$$W_{A1.проскок} = n_{вых} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho_ч,$$

$$W_{A1.реакц} = N_{ин} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \rho_ч \cdot Z(\tau, c),$$

где d – средний диаметр частиц, находящихся в реакторе; $\rho_ч$ – плотность алюминиевой частицы.

Подставив эти выражения в уравнение материального баланса для алюминия, получим

$$n_{вых} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho_ч + N_{ин} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \rho_ч \cdot Z(\tau, c) - Q_{A1} = 0.$$

Решив это кубическое уравнение, можно найти средний диаметр частиц, определив затем значения $W_{Al.проскок}$, $W_{Al.реакц}$.

Зная стехиометрическое соотношение щелочи в реакции, можно найти расход щелочи в химической реакции, проскок непрореагировавшей щелочи за пределы реактора, концентрацию щелочи на выходе из реактора.

Для реактора идеального смешивания концентрация щелочи в любой точке, в том числе на выходе из реактора одинакова. Эта концентрация влияет на линейную скорость растворения алюминия, задает время полного растворения частицы, определяет вероятность того, подвергнется ли частица растворению в полной мере или покинет реактор недорастворенной. Значение этой концентрации в начале расчета неизвестно, выразить ее в явном виде крайне затруднительно. Поэтому расчет выполняется методом последовательных приближений. Задавшись концентрацией щелочи в реакторе, определяют концентрацию щелочи на выходе из реактора. Расчет выполняется несколько раз, пока значения концентраций внутри реактора и на выходе не сравняются. Одновременно будут выполнены условия материальных балансов для щелочи и алюминия.

Математическая модель, описанная выше, реализована в приложении «MathCAD».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пивченко, А.В. К вопросу создания эффективного экологичного водородного генератора / А.В. Пивченко, С.Б. Шевцова, Г.Ф. Терентьев // Ресурсоэнергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: Межрег. конф., г. Волжский, 26 дек. 2017 г. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ» МЭИ» в г. Волжском, 2018. – Секция 1. – С. 179–182.

2. Пивченко А.В. Моделирование теплофизических процессов, протекающих в водородном генераторе / А.В. Пивченко, С.Б. Шевцова, Г.Ф. Терентьев // Наукоемкие инновационные технологии и экологическая безопасность в энергетике: Междунар. научно-практ. конф. г. Волжский, 2018. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ» МЭИ» в г. Волжском, 2018.

УДК 62-97

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ВОДОРОДНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

Паначевный В.М. – магистрант
Терентьев Г.Ф. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена обзору эксперимента, проведенного на лабораторном стенде, а также сравнению полученного теплового поля тепловизиром с рассчитанным программным способом температурным полем с параметрами аналогичными эксперименту.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: парогенератор водорода, температурное поле, эксперимент, лабораторный стенд.

Для принятия решения об эффективности водородных парогенераторов были проведены исследования [1], в результате чего была разработана установка для моделирования процессов горения кислородно-водородного топлива в вихревой камере сгорания парогенератора. Для моделирования процессов были приняты допущения, а именно кислородно-водородную смесь заменили горячим воздухом, тангенциальные вводы были заменены вводами воды под углом 45 градусов с давлением водопроводной воды, а именно 2 кгс/см^2.

На рис. 1 представлена лабораторная установка модели парогенератора.

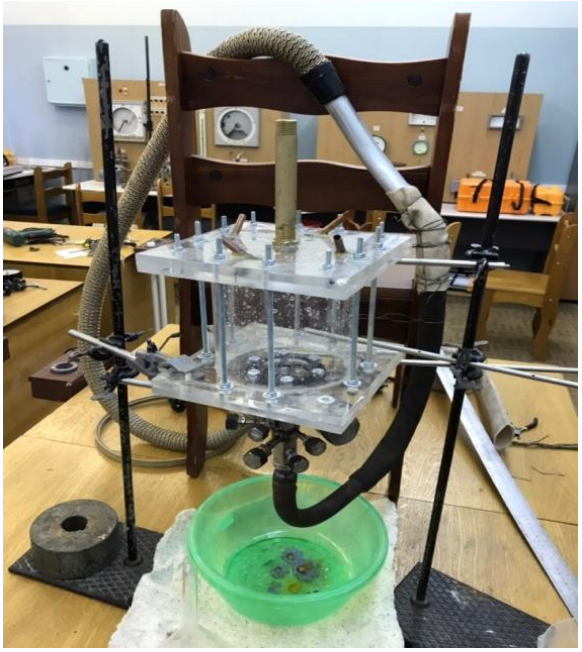

Рис. 1. Лабораторная установка для проведения опытов, моделирующая процесс горения водорода в парогенераторе

Для подвода воздуха в смесительную головку был использован пылесос (рис. 2) со всасом воздуха от теплого источника (строительного фена) температурой порядка 200 °С.

Рис. 2. Пылесос, осуществляющий подвод горячего воздуха в смесительную головку

На рис. 3 представлена смесительная головка модели парогенератора.

Рис. 3. Смесительная головка

В нашем случае были поставлены заглушки на вводах кислородной смеси, так как нам необходимо было смоделировать основной поток по водороду, то есть остальными вводами пренебрегаем из-за малого эффекта влияния на весь процесс горения от них.

В результате исследования получена картина температурного поля реального процесса в камере сгорания. Данная модель может накладываться на промышленную установку с учетом разностей, пропорций и однозначно определять процесс горения в водородном парогенераторе.

На рис. 4 представлено тепловое поле в камере модели парогенератора, полученное с помощью тепловизора.

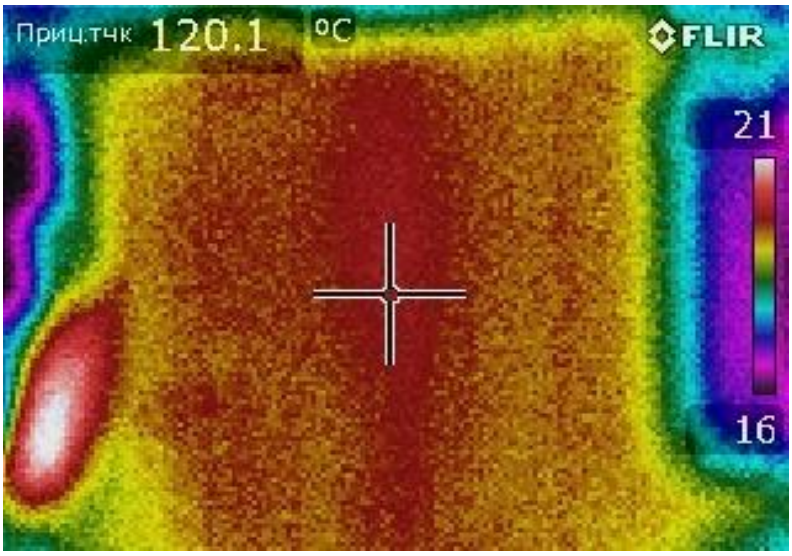

Рис. 4. Тепловое поле камеры сгорания в ходе опыта

На рис. 5 представлено распределение температуры парогаза по результатам численного эксперимента.

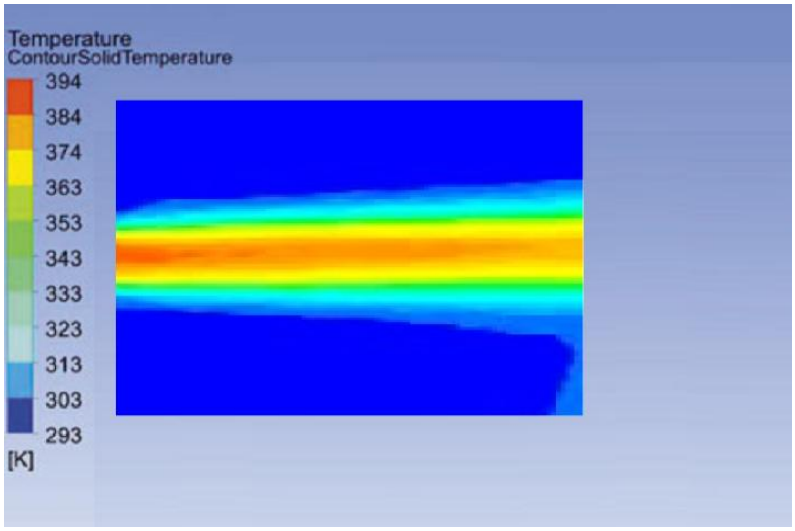

Рис. 5. Распределение температуры парогаза (горячего воздуха) по длине вихревой камеры сгорания

Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил адекватность математической модели RSM SSG [2–4] результатам опыта по исследованию температурного поля в камере парогенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мини-парогенератор: пат. Рос. Федерация RU 2300049 C1 / А.Н. Грязнов, С.П. Малышенко. – № 2005139563/06; заявл. 2005.12.19; опубл. 27.05.2007.

2. Gibson, M.M., Launder, B.E. Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer. – 1978. – P. 491–511.

3. Launder, B.E. Second-Moment Closure: Present... and Future? / B.E. Launder // Inter. J. Heat Fluid Flow. – 1989. – № 10(4). – P. 282–300.

4. Launder, B.E., Reece G.J., Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence / B.E. Launder, G.J. Reece, W. Rodi.

УДК 62-97

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ВОДОРОДНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Паначевный В.М. – магистрант
Терентьев Г.Ф. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена обзору парогенераторов, работающих на кислородно-водородных топливах, их рассмотрению с позиции численного моделирования в программе ANSYS FLUENT с целью получения четкой зависимости распределения температуры парогаза по камере сгорания, с предположением ведения эксперимента в лабораторных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: парогенератор водорода, температурное поле.

Исследования повышения эффективности работы водородных парогенераторов возможны с применением вихревых камер сгорания (рис. 1), в которых подача воды осуществляется тангенциально вводом в верхнюю часть камеры, для создания вихревой пленки в процессе вывода установки на номинальные параметры, а изначально для создания закрученного потока и образования насосного эффекта в камере.

Для того чтобы создать парогенераторы с таким принципом работы камеры сгорания, необходимо вывести 3D-сопряженную математическую модель, описывающую процессы гидродинамики и тепломассообмена между водным закрученнным по стенкам потоком и факелом водородно-кислородной смеси (парогаза).

Базовыми уравнениями для характеристики парогаза с водяной частью в камере сгорания парогенератора будут уравнения Рейнольдса, энергии, турбулентности и межфазного состояния.

С учетом вышесказанного был предложен способ решения поставленной задачи с турбулентным течением с применением численных методов при использовании модели на основе метода стенок [1–2].

Рис. 1. Лабораторная установка камеры сгорания

Наиболее популярными сеточными моделями являются [3–6]:

– МКР – метод конечных разностей;

– МКЭ – метод конечных элементов;

– МКО – метод конечного объема.

В последнем методе по сравнению с другими представленными, возможность законов сохранения осуществляется для каждого в отдельности рассматриваемого объема. Это основной метод дискретизации в решении задач вычислительной гидродинамики.

Чтобы вычислить гидродинамику и тепломассообмен на основе базиса лабораторного стенда водородного парогенератора, был использован расчетный комплекс ANSYS FLUENT, в котором рассматривалась задача с применением МКО.

В начале исследования была построена геометрия рассчитываемого объекта, сделано разбиение областей, выявлены сетка и граничные условия модели.

При создании непосредственно сеточной модели была выбрана нерегулярная тетрагональная сетка с изменениями слоя у стенки ввода воды и соответственно областей ее тангенциального подвода (рис. 2, 3). Применяли в этом случае автоматизированный генератор сеток Ansys Meshing.

Если использовать как можно меньшие фрагменты ячеек, то можно получить более объективную картину исследования, но это не будет рациональным решением, так как в этом случае будет осуществляться перегрузка компьютера.

Был выполнен расчет на основе тетрагональной сетки по алгоритму Path Conforming:

– max объем – 1,2e008 м^3;

– min объем – 4,2e-015 м^3;

– общий или полный объем – 3,3e-004 м^3;

– тип сетки – тетраэдальная.

Полное количество ячеек – 950 000, поверхностей – 2 000 000, узлов расчетной сетки – 280 000.

Вначале была построена геометрия и передана в решатель (solver).

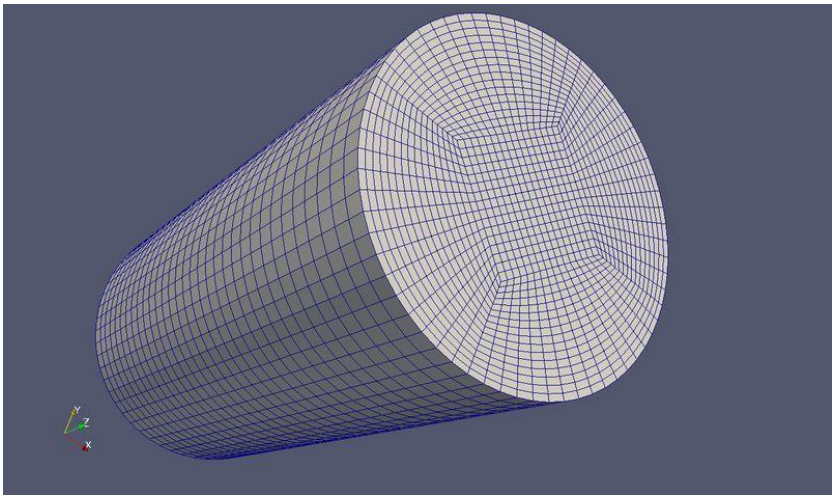

Рис. 2. Сеточная модель камеры сгорания

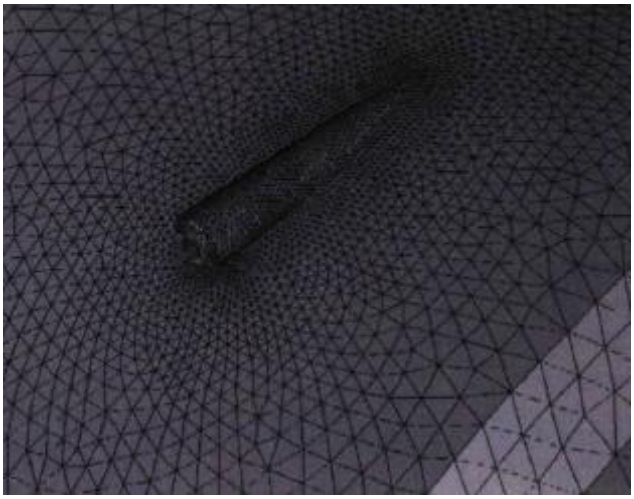

Рис. 3. Сеточная модель тангенциального ввода воды
в камеру сгорания водородного парогенератора

Была выбрана модель турбулентности – RSM SSG, так как область применения данной модели удовлетворяет условиям задачи:

– модель Эйлера с неявной схемой расчета;

– уравнение энергий;

– RSM SSG модель турбулентности.

Граничные условия:

– тангенциальный ввод воды (давление воды 2 кгс/см^2);

– расход парогаза в парогенераторе (горячего воздуха);

– выход (давление на выходе 0 МПа, на входе 2 МПа).

Число Куранта не более 1 с явными релаксационными факторами.

На последнем этапе выполнили анализ полученных результатов, и возникло сомнение: целесообразно ли дальше проводить исследования?

После 100 000 итераций решение сошлось, так как значения массовых расходов между входными и выходными границами составляет не более 10^{-6} кг/с.

В результате исследования была получена картина температурного поля внутри парогенератора на водородно-кислородном топливе при взаимодействии двух фаз на основе допущения замены факела водородно-кислородной форсунки на воздух, представленная на рис. 4.

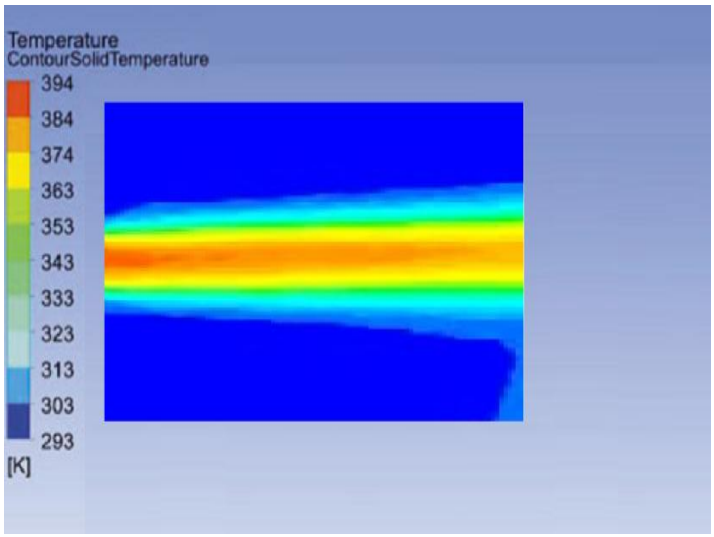

Рис. 4. Распределение температуры парогаза (горячего воздуха) по длине вихревой камеры сгорания

Выводы

На основе применяемых методов и средств было получено экспериментальное поле распределения температуры внутри исследуемой установки парогенератора на кислородно-водородном топливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригожин, А.А. Моделирование высокотемпературного потока в парогенераторе для интенсификации добычи нефти/ А.А. Пригожин, В.А. Ильичев, И.Г. Дроздов // Сборник трудов победителей конкурса на лучшую научную работу студентов и аспирантов ВГТУ. – Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2010. – С. 41–42.

2. Пригожин, А.А. Моделирование работы системы охлаждения соплового устройства парогенератора / А.А. Пригожин, И.Н. Лазоренко, Д.П. Шматов, В.А. Ильичев, И.Г. Дроздов // Ракетно-космическая техника и технология 2011: труды Российской научно-технической конференции, посвященной 70-летию со дня основания КБХА. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2011. – С. 26–29.

3. Андерсон, Д. Вычислительная гидродинамика и теплообмен: пер. с англ. / Д. Андерсон, Д. Таннесхилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384 с.: ил.

4. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 612 с.

5. Флетчер, К. Вычислительные методы в механике и жидкости / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 415 с.

6. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

УДК 621.311

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ С СЕПАРАЦИЕЙ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВКИ С ВЛАЖНО-ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ

Мирошников В.В. – магистрант
Иваницкий М.С. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Проведено исследование способов повышения эксплуатационных показателей турбоустановки путем конструктивного изменения тепловой схемы с сепарацией пара. По результатам исследования получены значения КПД, рассчитанные двумя методами, найдена тепловая схема, обеспечивающая наибольший КПД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: турбоустановка, схема, сепаратор, КПД.

В 2017 году 16 % всего объема производства электроэнергии в России было произведено на атомных электростанциях (АЭС). При этом проблема повышения технико-экономических показателей для отечественных АЭС является актуальной.

Целью работы является исследование различных вариантов тепловых схем с сепарацией пара для повышения эксплуатационных показателей паротурбинной установки.

Объектом исследования служит тепловая схема паротурбинной установки для АЭС с реактором ВВЭР. Рассматриваются следующие варианты исполнения тепловой схемы:

– исходная схема с циклом Ренкина;
– с однократной сепарацией;
– с двукратной сепарацией;
– с однократной сепарацией и промежуточным перегревом;
– с однократной сепарацией и двухступенчатым промежуточным перегревом [1, 2].

Турбоустановка работает в моноблоке с водо-водяным реактором типа ВВЭР базового блока АЭС и на насыщенном паре с параметрами пара перед турбиной P = 6,8 МПа, T = 283,8 °С [2].

В результате исследования тепловых схем с предложенными изменениями была определена эффективность от применения вышеуказанных вариантов.

Данные расчеты выполнялись методом материальных балансов, а также методом расчетов коэффициентов использования мощности (КИМ). По алгоритму были составлены программы для расчета уравнений материальных балансов и найдены относительные расходы для пяти рассматриваемых схем, представленных на рис. 1–5. Найденные значения представлены в табл. 1, 2.

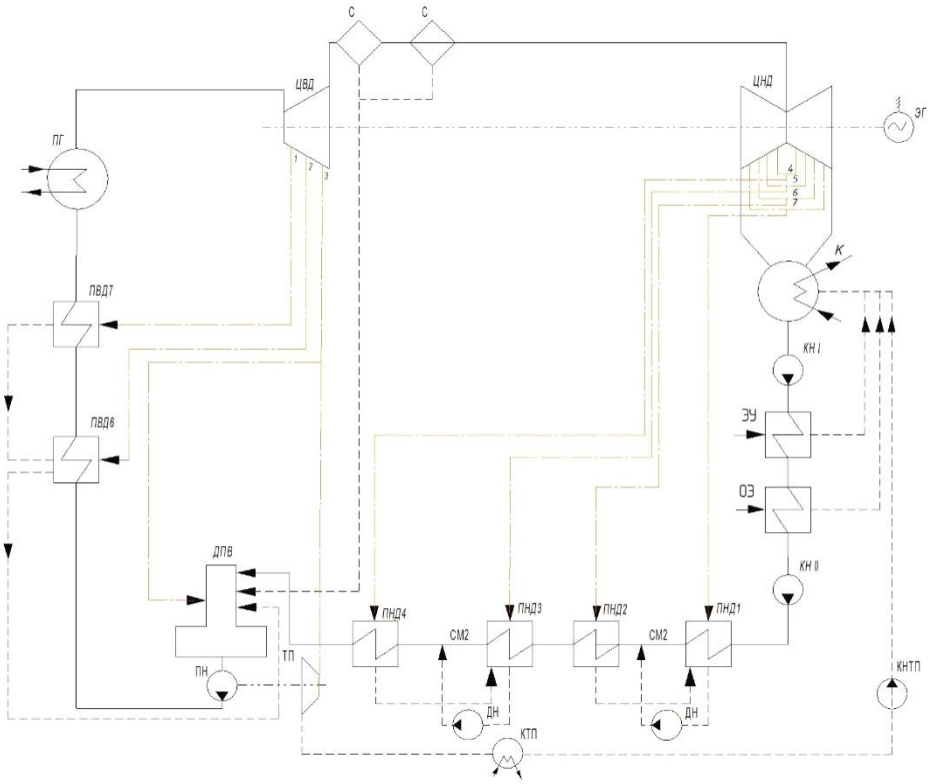

Рис. 1. Тепловая схема с циклом Ренкина

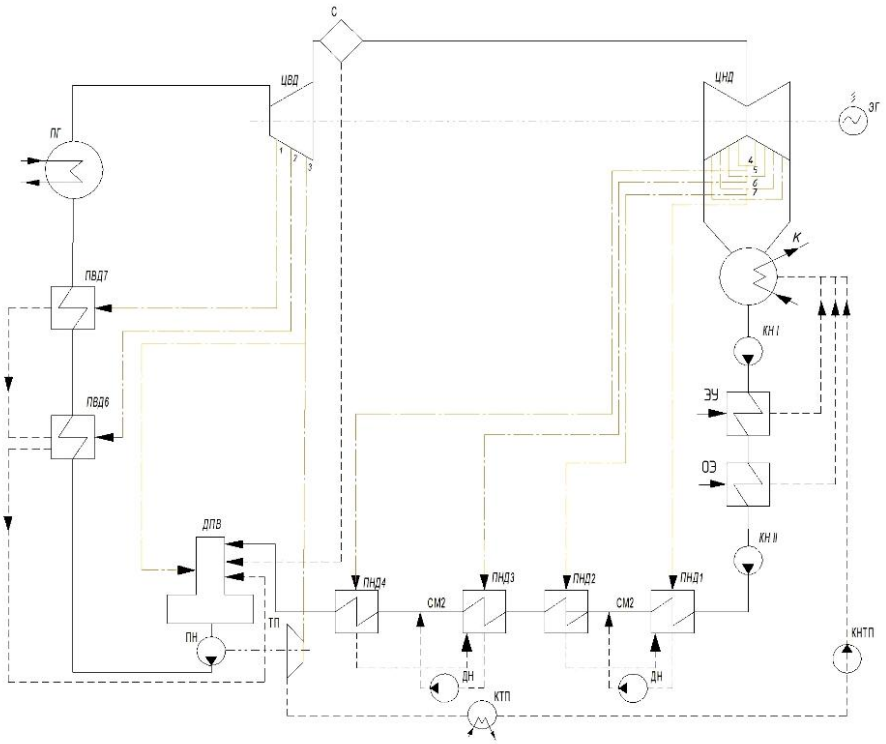

Рис. 2. Схема с однократной сепарацией

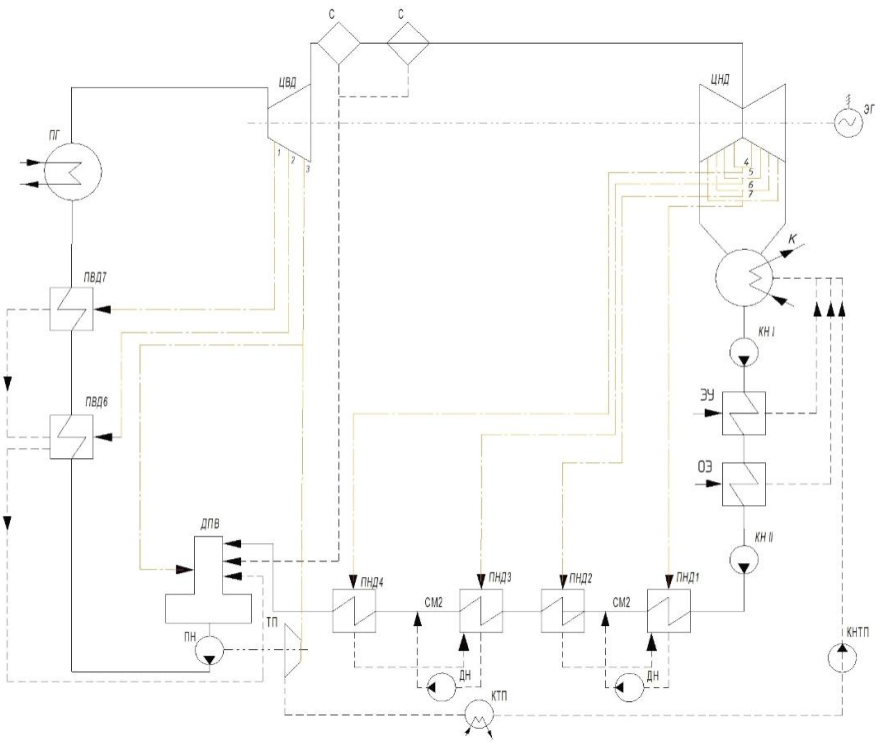

Рис. 3. Схема с двукратной сепарацией

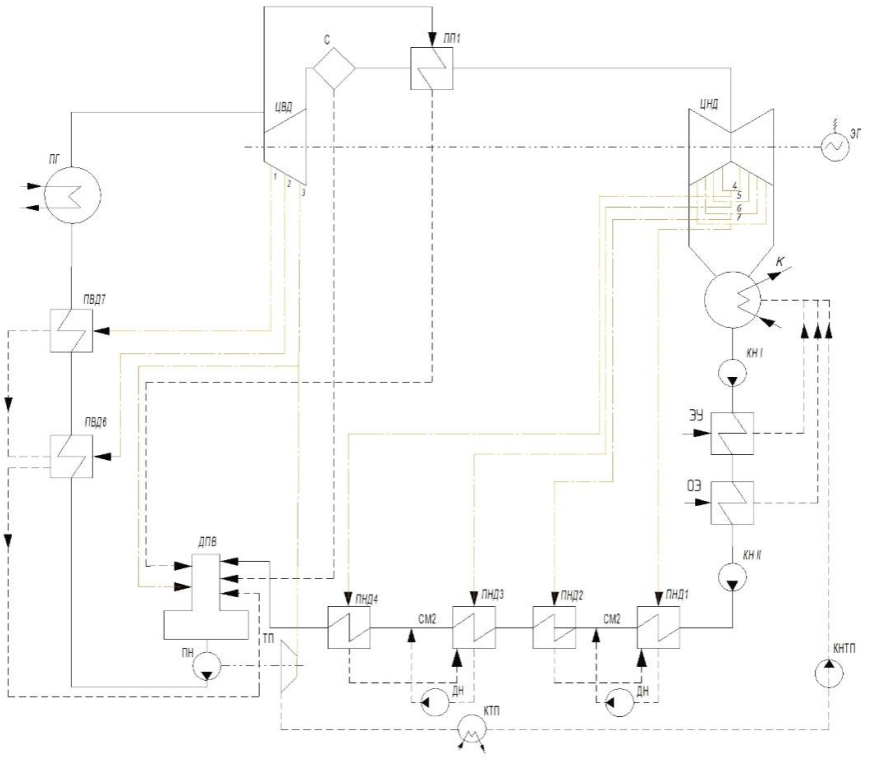

Рис. 4. Схема с однократной сепарацией и промежуточным перегревом

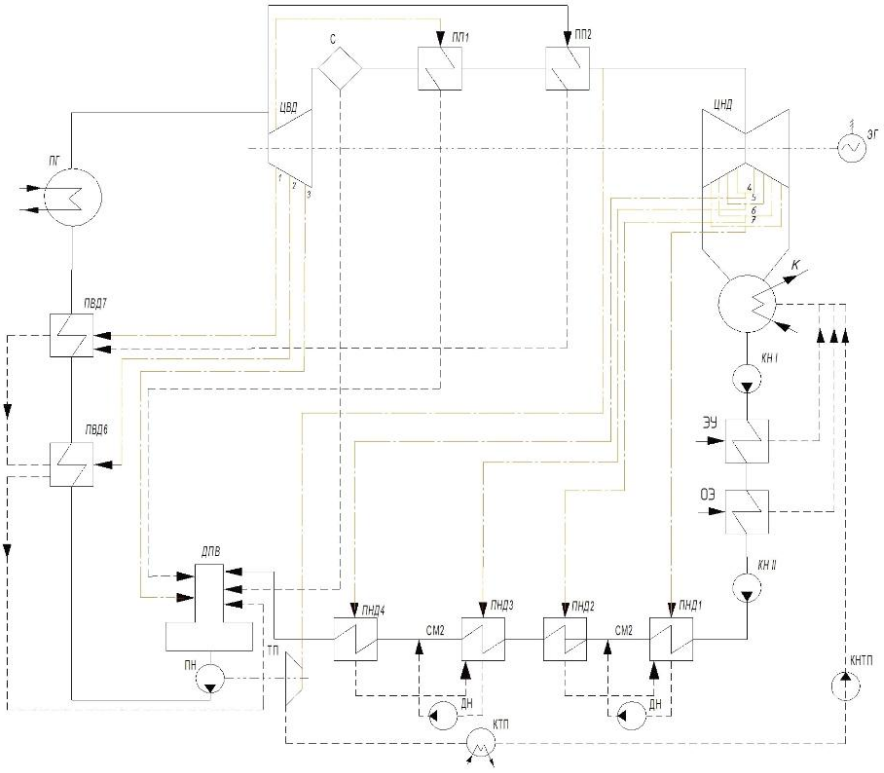

Рис. 5. Схема с однократной сепарацией и двухступенчатым промежуточным перегревом

Таблица 1

Значения относительных расходов пара

Тип схемы ПТУ	a_1	a_2	a_3	a_{C1}	a_{C2}	$a_{1пп2}$	$a_{пп2}$
Простая (цикл Ренкина)	0,076	0,081	0,092	–	–	–	–
Однократная сепарация	0,075	0,125	0,164	0,119	–	–	–
Двукратная сепарация	0,125	0,123	0,106	0,107	0,065	–	–
Сепарация и промперегрев (свежим паром)	0,098	0,204	0,039	0,106	–	0,085	–
Сепарация и двухступенчатый промперегрев	0,084	0,182	0,115	0,097	–	0,044	0,034

Расчет схем проведен по ходу основного конденсата. В табл. 1 представлены обозначения относительных расходов пара:

– a_1, a_2, a_3 – первого, второго и третьего отборов;

– a_{C1}, a_{C2} – дренажа первого и второго сепараторов;

– $a_{пп2}$, $a_{пп2}$ – дренажа первой и второй ступеней промежуточных пароперегревателей.

В табл. 2 представлены абсолютные внутренние КПД приведенных схем, рассчитанных по двум методам.

Таблица 2

Расчетные значения КПД при усложнении тепловых схем

Тип схемы ПТУ	$\eta_i^{,бал}$	$\eta_i^{,ким}$
Простая (цикл Ренкина)	0,326	0,326
Однократная сепарация	0,360	0,356
Двукратная сепарация	0,362	0,358
Сепарация и промперегрев (свежим паром)	0,349	0,359
Сепарация и двухступенчатый промперегрев	0,344	0,352

Анализ полученных результатов показывает, что с усложнением тепловой схемы при постоянном количестве регенеративных подогревателей погрешность вычисления КПД увеличивается. При расчете методом тепловых балансов наибольший КПД имеет схема с двукратной сепарацией. При определении показателей методом КИМ наибольший КПД имеет схема с сепарацией и промперегревом пара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.: ил.

2. Щегляев, А.В. Паровые турбины: учебник для вузов, в 2 кн., кн. 1. – изд. 6-е, перераб. и доп. проф. Б. М. Трояновским / А.В. Щегляев. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.: ил.

УДК 628.517.2

ПРОБЛЕМА ШУМОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМ

Ремизов А.И., Колебошина Е.Н. – магистранты
Кульков В.Г. – д-р физ.-мат. наук
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Обсуждается вредное влияние вибраций на энергетическое оборудование и персонал. С целью снижения уровня вибрации предлагается использование материалов с демпфирующими свойствами. Рассмотрены механизмы демпфирования колебаний в материалах протяженными дефектами на границах зерен.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибрация, демпфирующая способность, внутреннее трение, границы зерен.

Тепловые электрические станции имеют в своих цехах оборудование, являющееся интенсивным генератором шумового загрязнения, а это котлы,

турбины, генераторы, электродвигатели, насосные станции, вентиляционные системы, системы охлаждения воздуха, коллекторы дренажей, трубопроводы пара, горячей воды и теплоносителя, газопроводы, сооружения газоочистки и шлакоудаления и т. п.

Для человеческого организма шум является раздражителем и оказывает влияние на все системы и внутренние органы. Как правило, значительное ухудшение слуха от шумового воздействия на организм развивается медленно и возникает после многочисленных периодов небольшого по продолжительности нестойкого снижения слуха от шума, возникших непосредственно после начала и исчезающих вскоре после его прекращения [1]. В последнее время наметился серьезный рост заболеваний, вызванных шумовым воздействием на организм. Выяснилось, что сверхнормативное шумовое загрязнение окружающей среды влияет на продолжительность жизни и сокращает ее ориентировочно на десять лет [2].

Исследования показали, что шумовое загрязнение также негативно влияет на растения и деревья, зависящие от животных и насекомых, которые разносят их семена и опыляют цветы. Животному миру, сталкиваясь с возрастающим шумовым загрязнением из-за транспорта, наличия крупных промышленных предприятий и других видов шума, приходится адаптироваться к этой среде и тем самым менять свои поведенческие предпочтения, места обитания и пищевой рацион.

Следует подчеркнуть, шумы и вибрации также негативны и опасны для конструкций зданий, сооружений и оборудования. Распространяясь по строительным конструкциям, вибрации могут вызвать необратимые деформации, а также быстрый износ вращающихся частей технологического оборудования вследствие дисбаланса. Сверхнормативные уровни вибрации и шума отрицательно влияют на КИП и другую аппаратуру, используемую в цехах электростанций, приводя к снижению ее точности и уменьшению межремонтных интервалов. Все это может привести к возникновению аварийной ситуации на объектах энергетики.

На сегодняшний день шумовое загрязнение является одним из актуальных и злободневных проблем загрязнения природной среды. Данный вид загрязнения является серьезной угрозой для человечества, всего живого мира и экологии, и поэтому необходимо серьезно задуматься над решением этого вопроса.

Демпфирование нежелательных колебательных процессов, присущих работе энергетических машин можно осуществлять двумя принципиально различными способами. Первый из них является конструктивным и заключается в использовании в конструкции специально предусмотренных устройств демпфирования на стадии проектирования оборудования. К таким устройствам относятся различного рода демпферы в виде узлов с вязким сопротивлением деформированию, упругие элементы, сопрягающие узлы с разными источниками вибрации и оказывающие сопротивление для их взаимной передачи. Недостаток этого метода заключается в том, что его невозможно использовать на действующем оборудовании, поскольку он требует внесения изменений в его конструкцию. Второй метод, более приемлемый на стадии использования

оборудования, заключается в применении при изготовлении или замене элементов конструкции материалов с высокими демпфирующими свойствами.

Демпфирующие свойства металлов и сплавов определяются их микроструктурой. Среди специальных материалов [3] следует отметить сплавы с термоупругим мартенситом, с магнитной составляющей в структуре, со значительной гетерогенностью фаз в структуре. Приготовление таких материалов сопряжено, как правило, с достаточно сложными технологическими процессами. Условия работы их зачастую имеют ограничения по температуре, химическому составу агрессивной среды, продолжительностью.

Все процессы диссипации энергии внешнего воздействия на материал, приводящие в конечном итоге к преобразованию их во внутреннюю энергию, обозначаются как внутреннее трение. Хорошего эффекта рассеяния колебаний можно добиться изменением дефектной структуры однородных по фазе материалов. К неоднородностям структуры можно отнести дефекты строения границ зерен, например ступеньки [4], выводящие плоскость в параллельное расположение, наличие в них микронесплошностей на самой границе [5, 6] и в месте расположения тройных стыков, изломов и фасеток [7]. Соответствующие механизмы протекания физических процессов описаны в цитируемых источниках. Внутреннее трение в последнем случае с одномерной дефектной структурой имеет выражение

$$Q^{-1} = A\left[\left(\frac{1}{Z}\sum_m \frac{1}{m^4+Z^2}\right)\left(\left(\sum_m \frac{1}{m^4+Z^2}\right)^2 + \left(\sum_m \frac{Z}{m^2\left(m^4+Z^2\right)}\right)^2\right)^{-1}\right], \qquad (1)$$

здесь $m = 1, 3, 5\ldots$, $Z = \dfrac{\omega L^2}{\pi^2 D_b}$; D_b – коэффициент зернограничной диффузии вакансий; ω – частота колебаний. Множитель A выражается через параметры системы. В случае двумерной дефектной структуры выражение несколько более сложное.

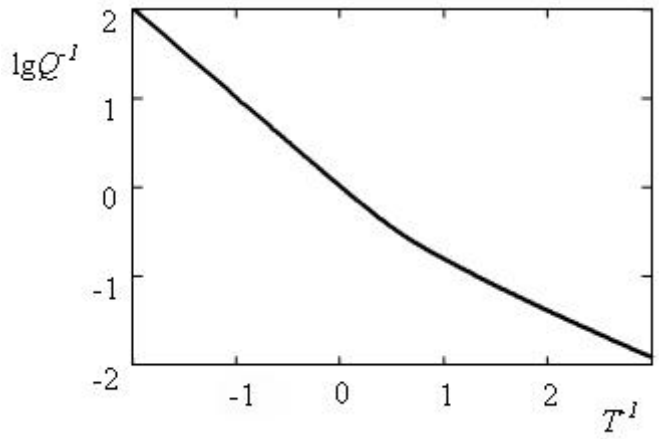

Рисунок. Температурная зависимость внутреннего трения

Во всех вышеприведенных случаях величина внутреннего трения имеет два характерных участка на зависимости логарифма внутреннего трения от обратной температуры, как это представлено на рисунке в относительных единицах. Каждый из них имеет линейный характер с разной величиной угла наклона к оси абсцисс. Это свидетельствует о разной эффективной величине энергии активации процесса [8].

Эффективным каналом диссипации энергии является зернограничное проскальзывание. Внутреннее трение в этом случае обеспечивается преобразованием энергии колебаний во внутреннюю энергию путем ограниченного смещения сопрягающихся по общей границе зерен. При этом взаимное смещение зерен останавливается упругими стопорами на краях плоских участков границ. Спектр внутреннего трения имеет пиковый характер с максимумом, определяемым частотой воздействия и температурой. Выражение для пика имеет вид

$$Q^{-1} = B\frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}, \qquad (2)$$

где τ – время релаксации, экспоненциально зависящее от температуры, B – постоянный множитель, определяемый физическими параметрами границы. Центр положения пика соответствует соотношению $\omega\tau = 1$. В отличие от формулы (1) выражение (2) описывает так называемый дебаевский пик. Он в чистом виде реализуется при одинаковых размерах сегментов границ, типе атомной структуры, ориентации границы, степени ее чистоты и т. д. В реальности все эти характеристики имеют определенный разброс и описываются некоторыми функциями распределения. Поэтому ширина пиков гораздо больше дебаевского. Значительный вклад в уширение пиков вносит нелинейность зависимости скорости проскальзывания от величины приложенных к границе сдвиговых напряжений [9]. Большая ширина пиков свидетельствует о меньшей селективности диссипации по отношению к частоте.

Таким образом, целенаправленно создавая необходимую дефектную структуру в металлах и сплавах, можно управлять процессами внутреннего трения, а значит, и демпфирующими свойствами материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демченко, В.Г. Функциональное состояние организма и качество жизни работающих на предприятиях теплоэнергетического комплекса / В.Г. Демченко, А.Н. Аргат, А.Г. Братухин // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. – Иркутск, 2006. – № 3. – С. 4–8.

2. Илькаева, Е.Н. Медико-социальная значимость шума в трудоспособном возрасте / Е.Н. Илькаева // Материалы VII Всероссийского конгресса «Профессия и здоровье» – М.: ООО «Графекон», 2008. – С. 16–17.

3. Головин, И.С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов / И.С. Головин. – М.: Изд. дом МИСиС, 2012. – 247 с.

4. Кульков, В.Г. Межзеренное скольжение по границе с уступами / В.Г. Кульков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 8. – С. 84–87.

5. 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.

6. Кульков, В.Г. Низкочастотное внутреннее трение на границах зерен, содержащих протяженные поры / В.Г. Кульков, Ю.В. Васильева, В.В. Дешевых // Письма в журнал технической физики. – 2012. – Т. 38, № 23. – С. 40–45.

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. Калинин, Ю.Е., Даринский, Б.М. Высокотемпературный фон внутреннего трения в твердых телах / Ю.Е. Калинин, Б.М. Даринский // МиТОМ. – 2012. – № 5. – С. 15–18.

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

УДК 62-62

НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ И ПАРОГЕНЕРАЦИИ В ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Терентьев Г.Ф.[1] – канд. техн. наук, доцент
Султанов М.М.[1] – канд. техн. наук, доцент
Курьянова Е.В.[1] – ст. преподаватель
Буров В.Д.[2] – канд. техн. наук, профессор
[1]Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском
[2]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

АННОТАЦИЯ. В статье выполнен анализ наиболее перспективного оборудования водородно-кислородного топливоснабжения и парогенерации в водородной энергетике. Показаны преимущества разработанных авторами принципов получения водородного топлива и методов построения систем водородно-кислородного топливоснабжения и парогенерации водородных энергоустановок различного уровня мощности и различных типов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: генератор водорода, водородно-кислородный парогенератор, азотно-водородное топливо, генератор технического кислорода.

Одним из перспективных направлений является создание энергосистем на основе использования природных возобновляемых энергоресурсов водородной энергетики, а именно разработка и исследование мобильно-блочного оборудования водородо-кислородного топливоснабжения энергосистем малой мощности и внедрение их для автономного энергообеспечения.

Целью исследований являются теоретические и экспериментальные исследования по оборудованию водородно-кислородного топливоснабжения энергосистем малой мощности в водородной энергетике и разработка экологически

чистого проекта автономной системы электро- и теплоснабжения малой мощности на основе перспективных разработок по водородной энергетике, в том числе и на топливных элементах.

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 и т. д. [1].

Значительный объем экспериментальных исследований по водородно-кислородным парогенераторам выполнен в ОИВТ РАН совместно с ОАО «КБ Химавтоматики» и ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Водородные технологии для энергетики, такие как водородное аккумулирование энергии возобновляемых источников, водородные накопители для автономной и распределенной генерации, заправки для постоянно растущего количественно и качественно водородного транспорта – активно внедряются в экономику развитых стран [2, 3].

На рис. 1 представлены системы заправки экологически чистого транспорта водородом с разным уровнем разработки, основным недостатком которых является значительные энергетические затраты при эксплуатации.

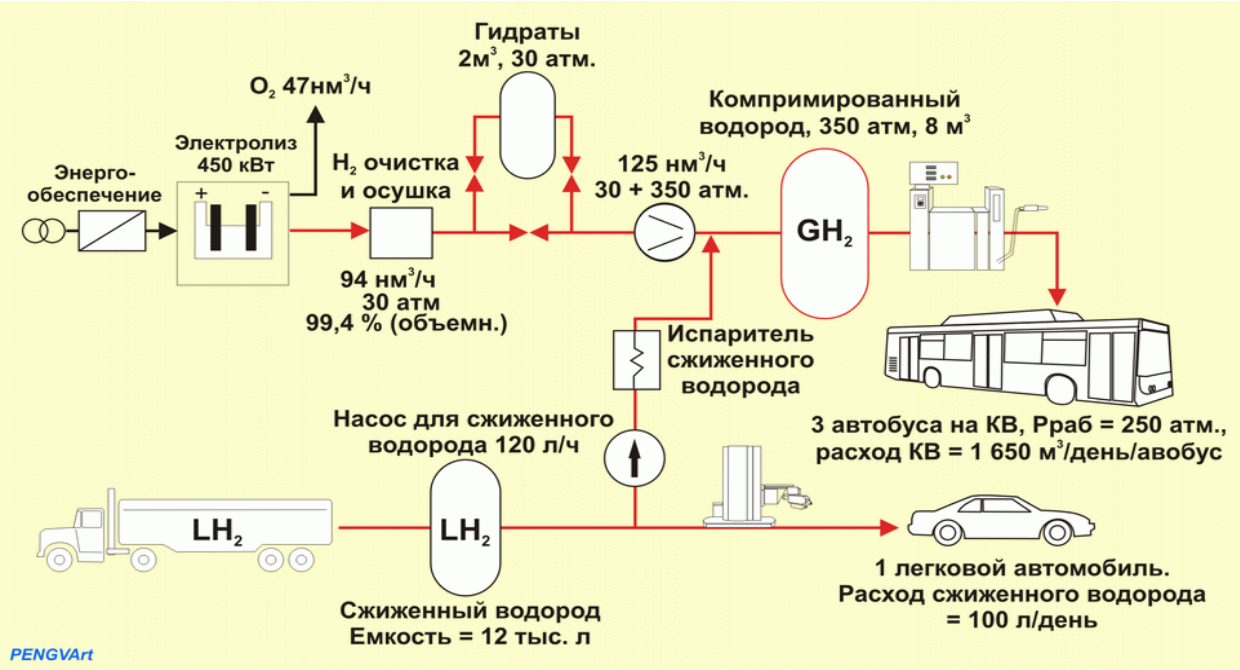

Рис. 1. Принципиальная схема заправки водородом транспортных средств

Снижение энергетических затрат, повышение безопасности заправки транспортных средств и использование водорода возможно в системах, в основе которых лежит способ получения водорода за счет гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде [4–7].

Рассмотрим направления развития систем заправки транспорта водородом и азотно-водородным топливом. На рис. 2 представлена технологическая схема мобильного комплекса производства водорода с насосной подачей реагентов, системой охлаждения и осушки для заправки системы охлаждения турбогенератора [8]. Также разработаны схема заправки водородом транспортных средств, представленная на рис. 3, и модельная установка генератора водорода для заправки транспортных средств, представленная на рис. 4.

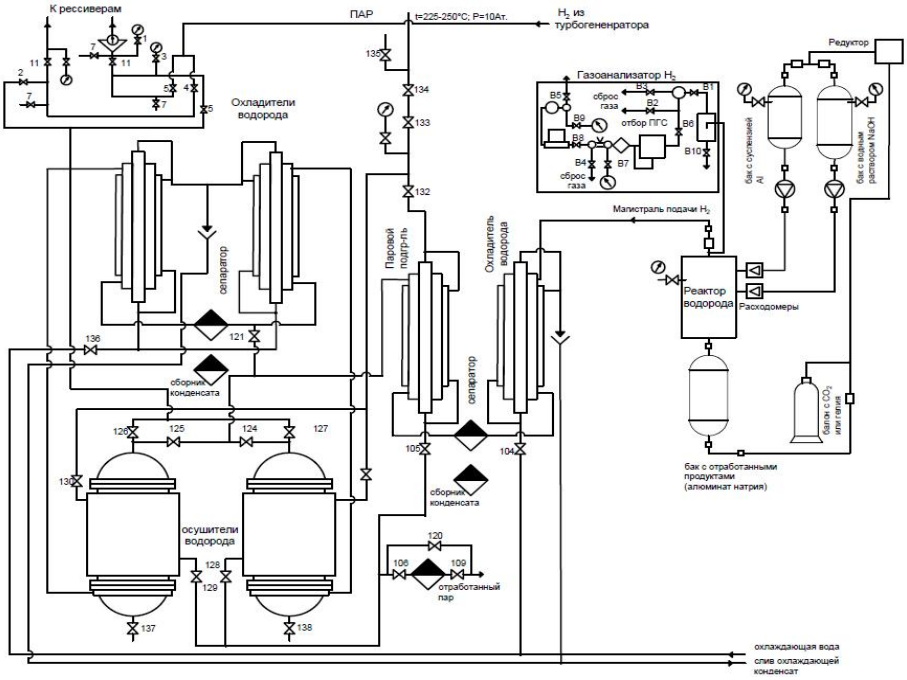

Рис. 2. Технологическая схема мобильного комплекса производства водорода с насосной подачей реагентов, системой охлаждения и осушки для заправки системы охлаждения турбогенератора

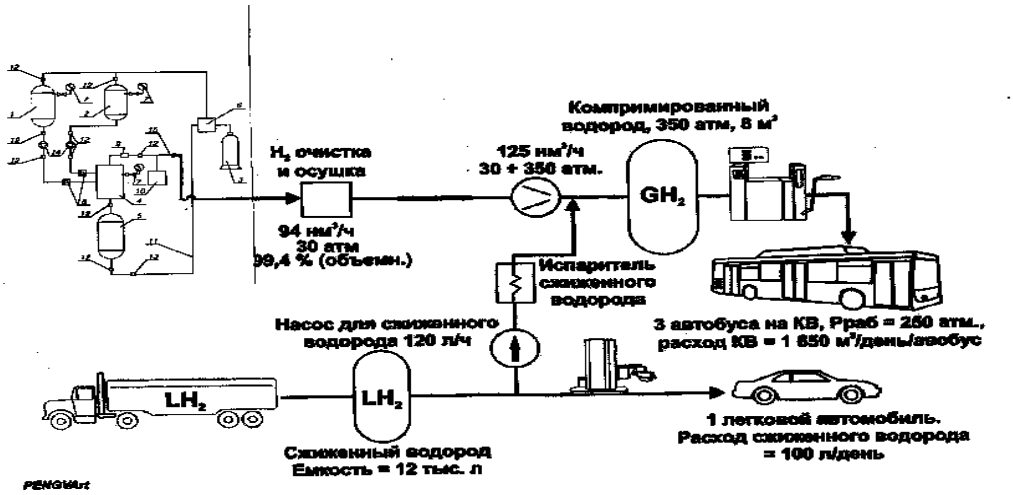

Рис. 3. Принципиальная схема заправки водородом транспортных средств на основе способа получения водорода за счет гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде [4, 5]

Рис. 4. Модельная установка генератора водорода
для заправки транспортных средств водородом

Разработан способ получения и заправки азотно-водородным топливом транспортных средств, модельная установка которого представлена на рис. 5.

Рис. 5. Модель генератора азотно-водородного топлива (вид сбоку):
1 – шасси; 2 – вихревой смеситель порошка алюминия с азотом; 3 – бак водного раствора едкого натра; 4 – реакционная камера генератора азотно-водородного топлива; 5 – баллон с азотом для транспортировки порошка алюминия и вытеснения водного раствора едкого натра; 6 – бак для водных продуктов гидролиза

Преимуществом этого направления является малая энергоемкость, безотходная технология, т. е. возврат высококонцентрированного сырья (алюминатов и диоксида алюминия) в алюминиевую промышленность.

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.

На рис. 6 представлен эскиз огневого блока модельного образца водородно-кислородного мини-пароперегревателя с эжектором подачи низкотемпературного пара [9].

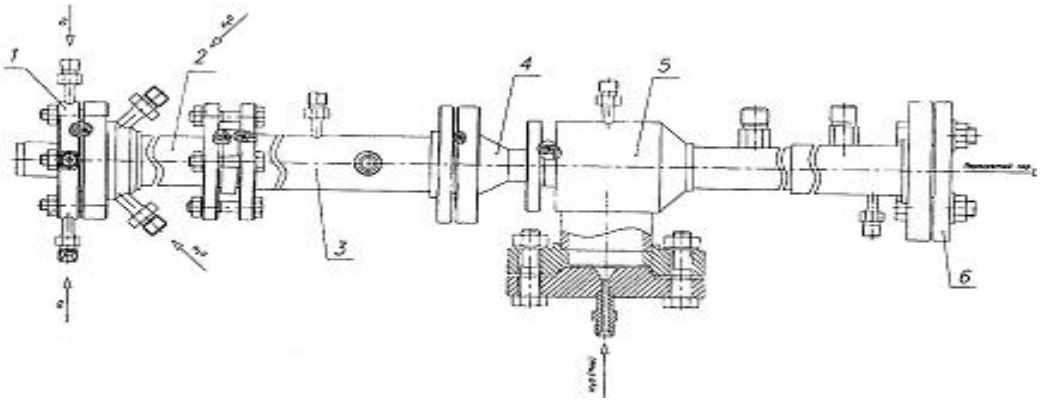

Рис. 6. Эскиз огневого блока модельного образца водородно-кислородного мини-пароперегревателя с эжектором подачи низкотемпературного пара

На рис. 7 представлена принципиальная схема противоточного водородно-кислородного парогенератора [10].

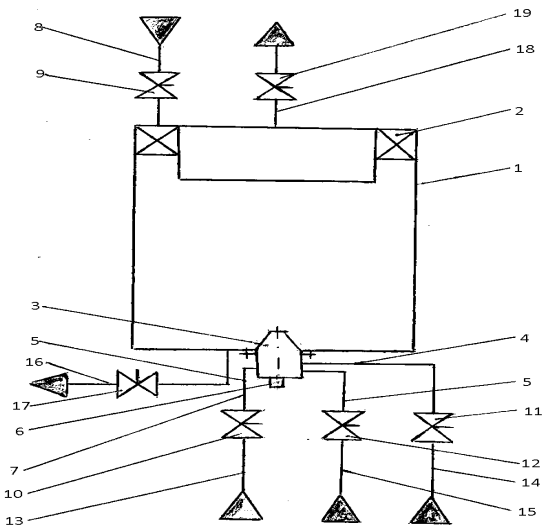

Рис. 7. Принципиальная схема противоточного водородно-кислородного парогенератора

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 является исследование и разработка глубокореулируемых генераторов водорода. Рассматриваемые генераторы являются главным ключевым элементом водородно-кислородных парогенераторов и парогазогенераторов. Решение комплекса задач по глубокорегулируемым генераторам водорода в целом в настоящее время отсутствует.

Одним из возможных направлений является применение в теплоэнергетике принципов широтно-импульсного регулирования (ШИМ-регулирования) [11].

Из анализа патентно-информационных исследований следует, что для автономных мини-энергосистем перспективным направлением является технология короткоцикловой адсорбции (КЦА) и короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) [12].

На рис. 8 представлена принципиальная схема устройства ротора КЦА генератора технического кислорода.

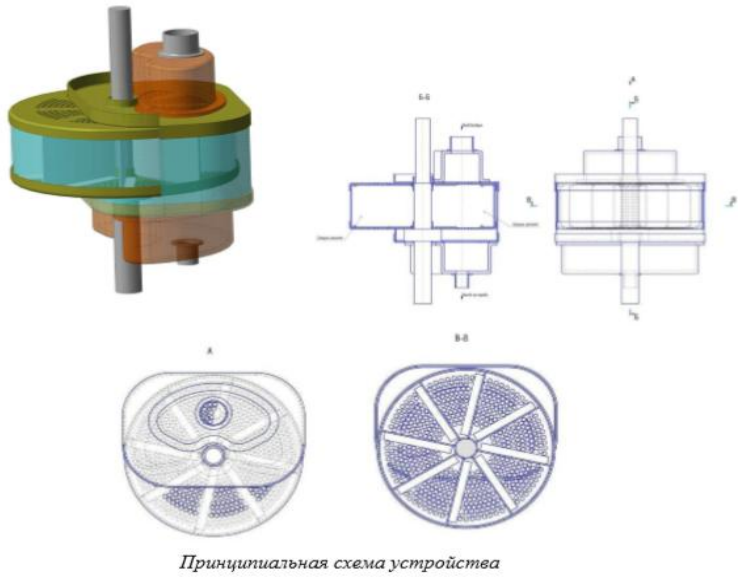

Рис. 8. Принципиальная схема устройства ротора КЦА генератора технического кислорода

На рис. 9 представлена схема получения кислорода на установке автономного производства.

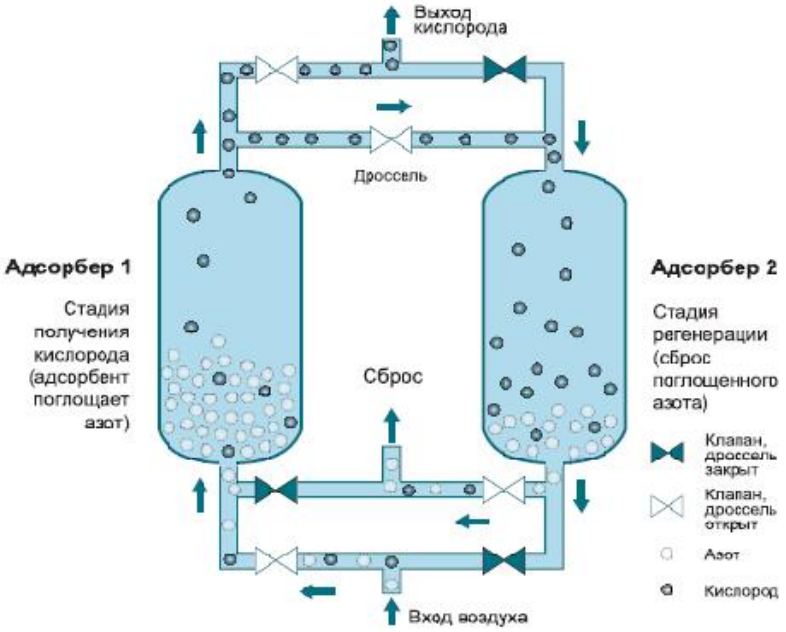

Рис. 9. Схема получения кислорода методом КБА

Начало применения метода короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) связано с именем американского изобретателя Скарстрома. В 1962 году он разработал метод КБА применительно к процессу осушки воздуха.

Позже оказалось, что принцип КБА может быть использован и для других процессов, в частности для получения кислорода из воздуха. Первые установки, основанные на принципе КБА, появились в 80-е годы XX века. Установка по производству кислорода представлена на рис. 10.

Рис. 10. Установка по производству кислорода по методу КБА

Основные преимущества получения кислорода методом КБА:

– процесс полностью автоматизирован, в связи с чем не требуется постоянного присутствия персонала;

– в зависимости от производительности генератора требуется от 5 до 20 минут для выхода на режим. Также генератор может быть выключен и вновь включен в любое время;

– обслуживание данной установки заключается в периодической замене картриджей в фильтрах очистки воздуха;

– стоимость кислорода достаточно низкая, поэтому основные затраты энергии будут связаны со сжатием воздуха в компрессоре и его сушке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышенко, С.П. Водородные технологии для энергетики (ОИВТ РАН). URL: http://www.energy-exhibition.com/

2. Терентьев, Г.Ф. Методы получения и использования водорода: учебно-методическое пособие / Г.Ф. Терентьев, И.В. Мокеев, М.М. Султанов. – Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2014. – 67 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: пат. 2545290, Рос. Федерация / М.М. Султанов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов, П. В. Шамигулов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 15.11.2013.

5. Генератор водорода: пат. 2553885, Рос. Федерация / М.М. Султанов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов, П.В. Шамигулов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 15.11.2013.

6. Энергоустановка с электрохимическим генератором на основе водородно-кислородных топливных элементов: пат. 2594895, Рос. Федерация / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 21.07.2015.

7. Электрохимический генератор на основе водородно-кислородных топливных элементов: пат. 2597412, Рос. Федерация / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 21.07.2015.

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) / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, Г.Ф. Терентьев. Заявка № С1-11742, 1-й этап проекта 21719, г. Волжский, 2017 г.

9. Ильичев, В.А. Гидродинамика, тепло- и массообмен в вихревых камерах сгорания водородных мини-парогенераторов: дисс. … канд. техн. наук / В.А. Ильичев. – Воронеж, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013.

10. Парогенератор: пат. 2597412, Рос. Федерация / М.М. Султанов, В.Н. Терентьев, М.С. Иваницкий, Ю.В. Гусева, Е.В. Курьянова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 13.07.2018.

11. Способ глубокого регулирования при получении водорода путем гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде и устройство для его осуществления: пат. 2597412, Рос. Федерация / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, В.Н. Терентьев, А.В. Пивченко, Е.В. Курьянова, Ю.А. Стружинская; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 15.02.2018.

12. http://metal-archive.ru/osnovy-metallurgii/1804-proizvodstvo-tehnicheskogo-kisloroda.html.

УДК 536.7

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕВОГО ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Курьянова Е.В.[1] – аспирант
Терентьев Г.Ф.[2] – канд. техн. наук, доцент
[1]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
[2]Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены принципиальные схемы вихревых водородно-кислородных парогенераторов. Показаны подходы к решениям уравнений для парогенератора интенсивного смешения, а также представлены схематические решения уравнения теплового баланса водородно-кислородного парогенератора с помощью зависимостей X(T). В результате исследования получена картина температурного поля процесса парогенерации в противоточном вихревом парогенераторе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: генератор водорода, водородно-кислородный мини-парогенератор, генератор кислорода, вихревой водородный парогенератор.

В настоящее время развитие автономного и локального энергопотребления базируется на водородной энергетике. В европейских энергетических программах фигурирует понятие «домашняя электростанция». Мини-электростанции мощностью не более 5 кВт, которые используют водородно-кислородные парогенераторы, экологичны и позволяют производить столько электроэнергии и тепла, сколько необходимо потребителю, а также расходовать

ее без потерь, неизбежных в большой энергетике с ее тысячекилометровыми линиями электропередачи и теплотрассами [1].

Одной из главных задач при создании мини-электростанции является разработка надежных и эффективных водородно-кислородных мини-парогенераторов, генераторов водорода и кислорода.

Из анализа проектно-конструкторских разработок водородно-кислородных парогенераторов [2–5] следует, что наиболее надежной и эффективной схемой водородно-кислородного парогенератора является вихревая схема парогенерации.

Рассмотрим принципиальные схемы вихревых водородно-кислородных парогенераторов, представленных на рис. 1 и 2.

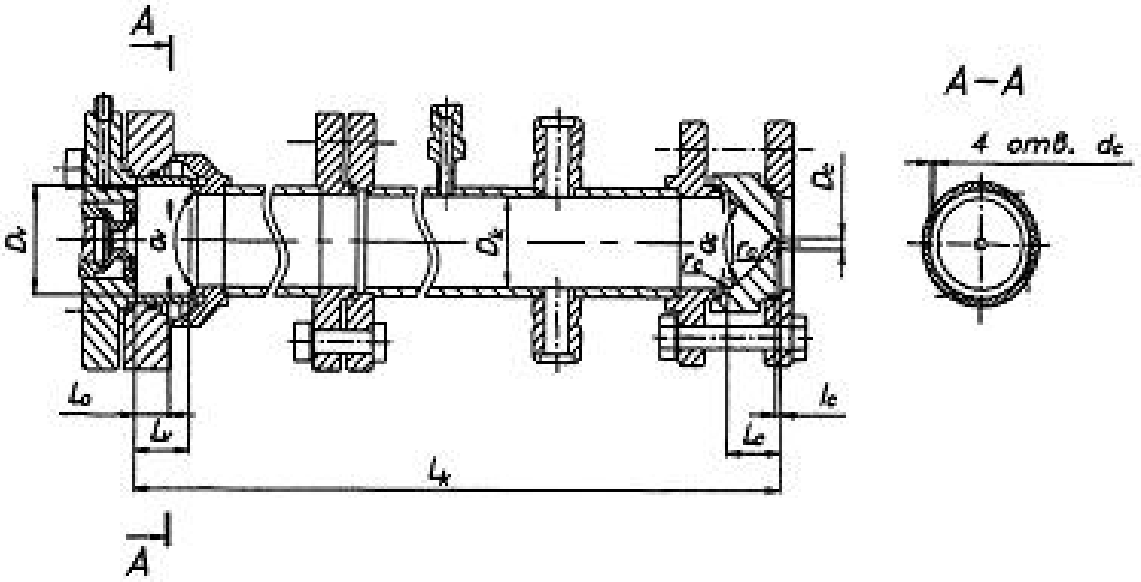

Рис. 1. Разрез прямоточного вихревого водородного парогенератора [4]

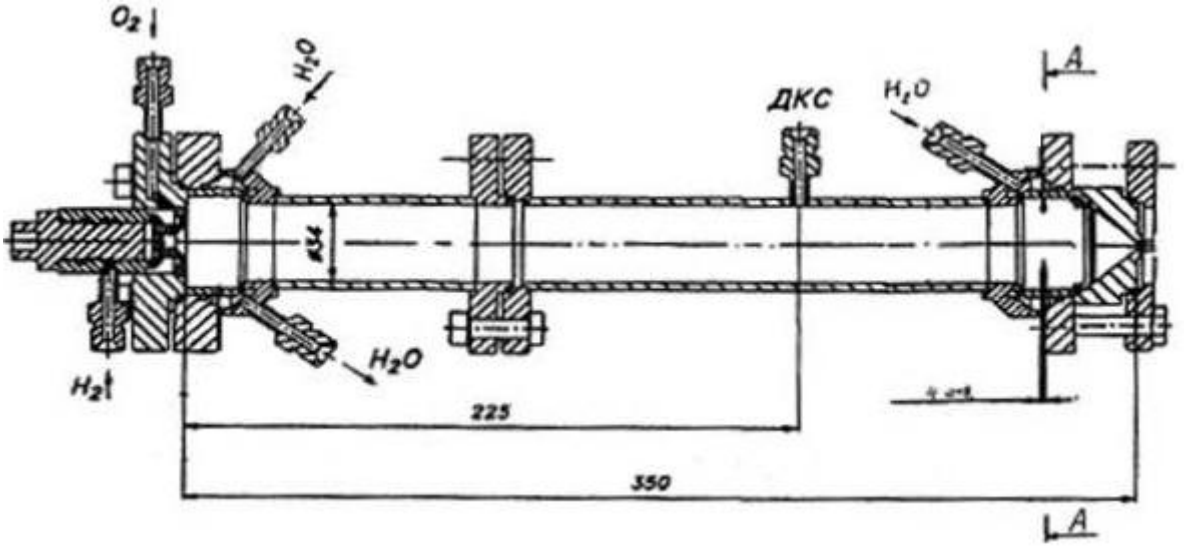

Рис. 2. Разрез противоточного вихревого водородно-кислородного парогенератора [5]

В вихревых парогенераторах водород с кислородом сжигают в камерах сгорания. При этом в прямоточной вихревой схеме факел окружает пристеночная закрученная пленка воды, а в противоточной вихревой схеме факел окружает вихревой паровой пузырь.

В прямоточной вихревой схеме парогенерации процесс испарения воды происходит на капельно-пленочной поверхности пристеночного вихревого потока воды. Особенностью противоточной вихревой схемы парогенерации является испарение воды на пузырьково-пленочной поверхности, т. е. внутри пузырьков парогаза вихревого потока смеси воды и парогаза.

По противоточной вихревой схеме парогенерации на модельной установке, представленной на рис. 3, проведены исследования гидродинамики и тепломассообмена в противоточной вихревой камере воды и горячего воздуха.

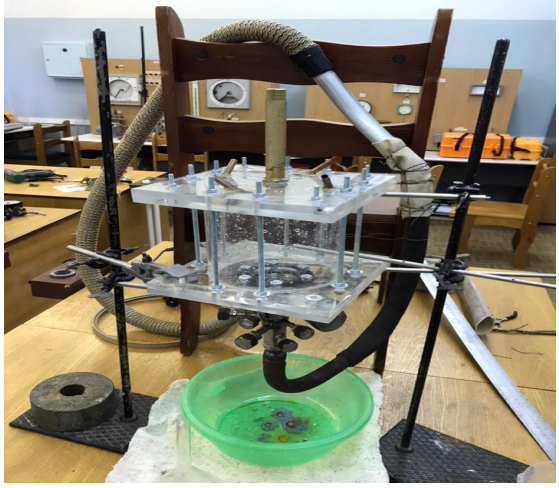

Рис. 3. Лабораторная установка для проведения опытов, моделирующая процесс парогенерации в противоточном вихревом парогенераторе

В результате исследования получена картина температурного поля процесса парогенерации в противоточном вихревом парогенераторе. Данная модель может накладываться на промышленную установку с учетом разностей пропорций и однозначно определять процесс парогенерации в водородно-кислородном парогенераторе.

На рис. 4 представлено тепловое поле в камере модели парогенератора, полученное с помощью тепловизора.

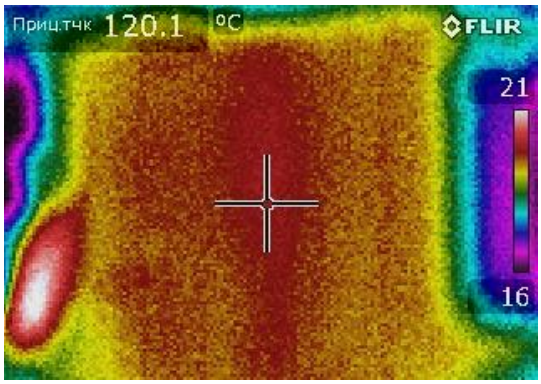

Рис. 4. Тепловое поле в камере модели парогенератора в ходе опыта

На рис. 5 представлено распределение температуры парогаза по результатам численного эксперимента.

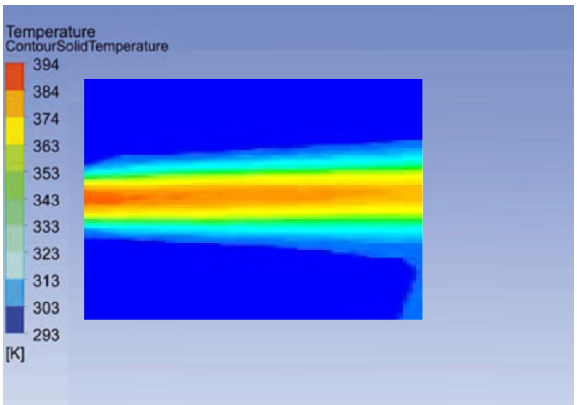

Рис. 5. Распределение температуры парогаза (горячего воздуха) по длине камеры вихревой модели парогенератора

Следует отметить, что вторую схему парогенерации, в первом приближении, можно рассматривать на основе концепции реактора интенсивного смешения, характеристики которого могут быть проанализированы на основе метода работ [6, 7]. При этом принимаем следующие допущения: процесс парогенерации в вихревых схемах подобен тепловому режиму горения в вихревых камерах сгорания.

В вихревой схеме водородно-кислородной парогенерации реагентами являются парогаз и вода. Запишем суммарный баланс тепла в стационарных условиях:

$$Q_{in}^{*} = Q_{out}^{*}, \tag{1}$$

где Q_{in}^{*} – скорость парообразования в объеме парогенератора, Q_{out}^{*} – скорость отвода тепла от парогенератора. Стационарные решения уравнения (1), выраженные через исходные и искомые величины, соответствуют стационарным условиям работы парогенератора по аналогии с работой [6].

Рассмотрим подход к решениям уравнения (1) для парогенератора интенсивного смешения.

В адиабатическом парогенераторе идеального смешения (предельный случай парогенератора нулевой размерности) перемешивание реагентов происходит мгновенно, как только они поступают в парогенератор, и является полным. Превращение реагентов к выходу из парогенератора в продукты парогенерации определяется располагаемым временем испарения с капельно-пленочной поверхности вихревого потока смеси или на пленочной поверхности внутри пузырьков вихревого потока смеси и скоростью самого процесса испарения.

Принимаем, что парогенератор работает при постоянном давлении. Скорость испарения r на единицу массы реагентов может быть представлена законом Аррениуса:

$$r = C_0 \cdot k_0 \exp(-E / R \cdot T), \tag{2}$$

где k_0 – константа процесса первого порядка, равная 1 / τ_k; τ_k – характерное время испарения; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, при которой протекает испарение; C – массовая концентрация реагента (парогаза). В этом случае C = масса парогаза / масса реагентов в парогенераторе. Обозначим через q – тепло, которое выделяется при расходовании единицы массы смеси реагентов, тогда можем записать левую часть уравнения (1) в следующем виде:

$$Q_{in}^{*} = q \cdot r = C \cdot k_0 \cdot q \cdot \exp(-E / R \cdot T). \quad (3)$$

В то же время скорость испарения r для реактора нулевой размерности можно также выразить через разность между концентрацией парогаза C в потоке смеси и концентрацией парогаза C_0 в потоке парогенерации на выходе из парогенератора и через время, располагаемое для испарения τ, которое будем называть временем пребывания, т. е.

$$r = (C_0 - C) / \tau_s \quad (4)$$

и, следовательно,

$$Q_{in}^{*} = (C_0 - C) \cdot q / \tau_s. \quad (5)$$

Аналогично время пребывания τ_s может быть выражено через объем парогенератора V и средний объемный расход продуктов парогенерации через него $Q_{\text{ср}}$:

$$\tau_s = V / Q_{\text{ср}}. \quad (6)$$

Рассматривая правую часть уравнения (1), следует отметить, что если парогенератор работает в адиабатических условиях, то все тепло отводится от него вместе с выходящим потоком продуктов парогенерации (при температуре T). В этом случае скорость отвода тепла Q_{out}^{*} определяется следующим соотношением:

$$Q_{out}^{*} = (c_p / \tau_s) \cdot (T - T_0), \quad (7)$$

где c_p – удельная теплоемкость продуктов из парогенератора при постоянном давлении. Комбинируя соотношения (1), (3), (5) и (7), можно записать уравнение для суммарного теплового баланса в следующем виде:

$$(C_0 - C) \cdot (q / \tau_s) = (c_p / \tau_s) \cdot (T - T_0) = (1/\tau_k) \cdot C \cdot q \cdot \exp(-E / R \cdot T). \quad (8)$$

Перегруппируем ряд параметров и введем для этого следующие параметры:

а) относительную концентрацию парогаза:

$$C^{-} = C / C_0; \quad (9)$$

б) степень превращения парогаза в продукты парогенерации:

$$X = 1 - C/C_0, \tag{10}$$

где в случае $X = 1$, $C = 0$ – парогенерация завершается полностью, а при $X = 0$, $C = C_0$ – реагенты (парогаз и вода) не вступают в смешение;

в) отношение времени пребывания к кинетическому времени, т. е. к характерному времени процесса испарения в смеси:

$$\tau_{sk} = \tau_s/\tau_k; \tag{11}$$

г) теплопоглащение при испарение воды в смеси:

$$\upsilon = q \cdot C_0 / C_p. \tag{12}$$

Величина υ указывает на степень эндотермичности процесса испарения воды в смеси или об отклонении состава смеси от оптимальной степени крутки вихревого потока, влияющей на степень смешения парогаза и воды.

Таким образом, из первой части соотношения (8) получаем:

$$X = 1 - C/C_0 = (c_p / q \cdot C_0) \cdot (T - T_0),$$

из которого следует:

$$X_{out} = (1 - T_0)/\upsilon. \tag{13}$$

Приравнивая первое и третье слагаемые соотношение (8), получаем:

$$X = (\tau_s/\tau_k) \cdot (C/C_0)\exp(-E/R \cdot T) = \tau_{sk} \cdot (1 - X)\exp(-E/R \cdot T),$$
$$X \cdot X_{in} = \left[1 + (1/\tau_{sk})\exp(-E/R \cdot T)\right]^{-1}. \tag{14}$$

Приведенные выше соотношения (13) и (14) представляют собой соответственно правую и левую части общего уравнения теплового баланса, и соответственным же образом проставлены индексы в величине степени превращения X, содержащейся в обеих частях. Следовательно, решениями уравнения (1) следует считать теперь равенства $X_{in} = X_{out}$ для заданных исходных величин τ_s, τ_k, E, R, c_p, C_0, q и T_0.

Различные решения уравнений (13) и (14) по аналогии с работой [6] представлены на рис. 3 при уменьшении времени пребывания τ_s от рис. 3*а* к рис. 3*д*. Воздействие этого уменьшения проявляется в смещении вправо кривой тепловыделения парогазом X_{in} (T) (уравнение (14). Так как c_p, C_0, T_0 и q поддерживались постоянными, линейный характер зависимости для отвода тепла в адиабатических условиях (уравнение (13) остается неизменным. Решение уравнения теплового баланса вихревого водородно-кислородного парогенератора представляет собой пересечение кривых X_{in} и X_{out}; при этом могут реализоваться по аналогии с работами [6, 7] следующие варианты:

а) точки пересечения в правых верхних углах рис. 3 (*A*, *C*, *F* и *H*) – соответствуют условиям парогенерации, т. е. высокой степени смешения парогаза и воды на выходе из парогенератора и высокой степени превращения воды в пар;

б) промежуточные пересечения, такие как в точке *E* на рис. 3*в*, соответствуют неустойчивым решениям; в этих пересечениях небольшие флуктуации исходных величин (например, малые колебания расхода смеси, вызывающие мгновенные изменения величины τ_s) смещают систему либо в точку, отвечающую решению с испарением, либо в точку, отвечающую решению с медленным подогревом без испарения в зависимости от того, в каком направлении было начальное смещение под действием возмущения;

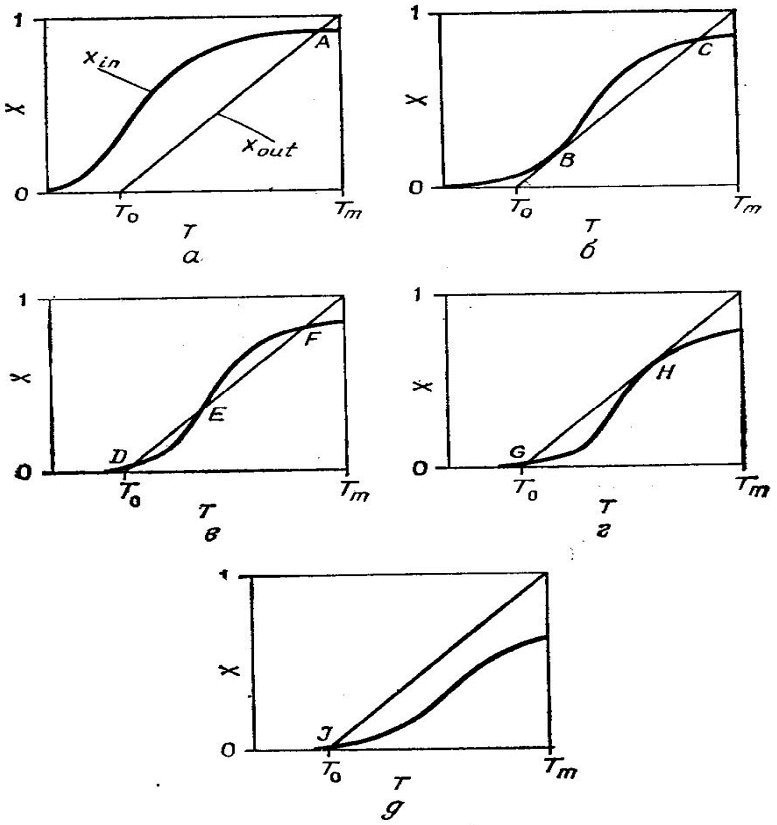

Рис. 3. Схематическое представление решений уравнения теплового баланса водородно-кислородного парогенератора с помощью зависимостей величин $X(T)$

в) пересечения в левых нижних углах (пренебрежительно малой степени превращения воды в пар при температуре, близкой к T_0) соответствуют медленному подогреву воды, происходящему практически при начальной температуре смеси (точки *D*, *G* и *J*);

г) решение, соответствующее точке касания *B* (рис. 3*б*), представляет собой режим испарения воды в парогенераторе. Если первоначально происходит испарение воды, то любое небольшое изменение в исходных величинах приведет в результате к немедленному процессу испарения во всем объеме парогенератора и к переходу системы в точку *C*, соответствующую режиму испарения;

д) срыв процесса испарения из-за чрезмерной подачи смеси в парогенератор представлен на рис. 3*г* точкой касания кривых в верхней части графика. В этой точке любое незначительное изменение величины τ_s приведет систему к режиму процесса испарения, т. е. от точки H к точке G . Графики (рис. 3) дают качественное представление о характеристиках парогенератора интенсивного смешения в условиях различной нагрузки.

Следует отметить, что для практики требуется значительно больше количественной информации, особенно в отношении характерного времени процесса испарения на пленочной поверхности внутри пузырьков вихревого потока смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко, Р.В. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. – 229 с.

2. Малышенко, С.П. Водородные технологии для энергетики / С.П. Малышенко (ОИВТ РАН). URL: http:// www.energy-exhibition.com/

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. Ильичев, В.А. Гидродинамика, тепло- и массообмен в вихревых камерах сгорания водородных мини-парогенераторов: дисс. … канд. техн. наук / Ильичев В.А. – ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, 2013.

5. Парогенератор. Заявка № RU 2018125924. Начало действия: 13.07.2018; Изобретатель(и): Султанов М.М., Терентьев Г.Ф., Иваницкий М.С., Гусева Ю.В., Курьянова Е.В. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

6. Вулис, Л.С. Тепловой режим горения / Л.С. Вулис. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 288 с.

7. Гупта, А. и др. Закрученные потоки: пер. с англ. / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.: ил.

УДК 621.311

АВТОНОМНАЯ МИНИ-ТЭЦ НА ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

Терентьев Г.Ф.[1] – канд. техн. наук, доцент
Султанов М.М.[1] – канд. техн. наук, доцент
Курьянова Е.В.[1] – ст. преподаватель
Буров В.Д.[2] – канд. техн. наук, профессор
[1]Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском
[2]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

АННОТАЦИЯ. В статье проведен анализ современного состояния, а также приведены пути развития передовых технологий мини-ТЭЦ в теплоэнергетике и разработка экологически чистого варианта проекта системы электро- и теплоснабжения на основе перспективных разработок по водородной энергетике. Представлена схема водородной турбоустановки, работающей в пиковом режиме ТЭС, и принципиальная тепловая схема проекта мини-водородно-кислородной тепловой электростанции (мини-ВКТЭС).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водородная установка, мини-водородно-кислородная тепловая электростанция (мини-ВКТЭС), водородная установка гидролиза твердого реагента – алюминия, электролизер.

Отечественная теплоэнергетика в настоящее время находится на пути перехода на парогазовые технологии и создания автономных эффективных технологий, которые могли бы дополнить традиционные централизованные способы выработки тепла и электроэнергии. До сих пор в нашей стране оба эти вида энергии вырабатывались в основном либо раздельно на КЭС и в котельных, либо на ТЭЦ в паротурбинном цикле. При этом надо отметить, что централизованное производство и распределение тепловой и электрической энергии сейчас довольно дорогое удовольствие для отдельного предприятия-потребителя.

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.

Активно ведется патентование различных технических решений по водородным технологиям и топливным элементам.

В работе анализируется современное состояние, проблемы развития водородной энергетики, пути развития передовых технологий мини-ТЭЦ в теплоэнергетике и разработки экологически чистого варианта проекта системы электро- и теплоснабжения на основе перспективных разработок по водородной энергетике. Рост стоимости топлива, а также ужесточение требований к экологическим

показателям в энергетике создали необходимость использования более эффективных технологий производства тепловой и электрической энергии.

Рассмотрим принципиальные проектные решения развития первого этапа. На начальном этапе отрабатываются агрегатные комплексы мини-ТЭС с водородно-кислородными парогенераторами и переход к водородно-кислородной электростанции (мини-ТЭЦ).

На рис. 1 представлена схема водородной турбоустановки, работающей в пиковом режиме ТЭС [1–3].

Особенностью предложенного проекта является дополнение действующей ТЭС водородной турбоустановкой для покрытия пиковых нагрузок.

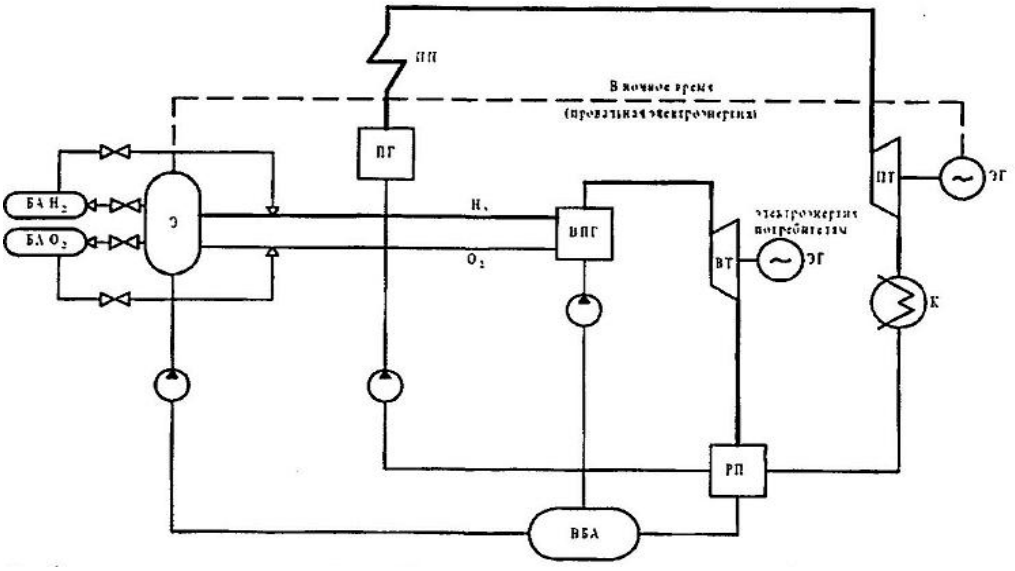

Рис. 1. Схема водородной турбоустановки, работающей в пиковом режиме ТЭС

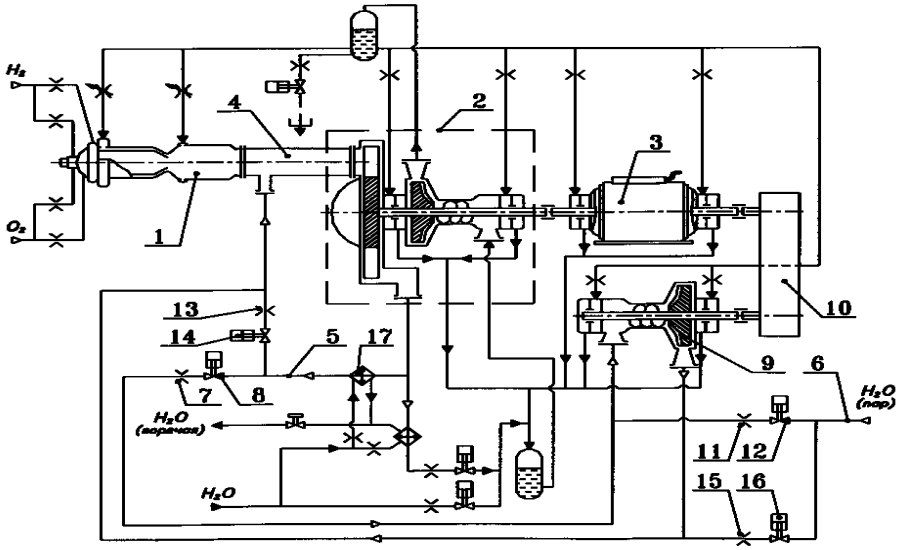

Рис. 2. Схема энергоустановки: 1 – парогазогенератор; 2 – турбонасосный агрегат; 3 – электрогенератор; 4 – пароперегреватель; 5 – паропровод; 6 – паропровод внешнего источника пара; 7, 11, 13, 15 – дросселирующие устройства; 8, 12, 14, 16 – пневмоклапаны; 9 – компрессор; 10 – редуктор; 17 – конденсатор

На рис. 2 представлена схема энергоустановки [4], особенностью которой является установка пароперегревателя между парогазогенератором и турбонасосным агрегатом (ТНА), вход которого связан паропроводом с выходом турбины ТНА или с внешним источником пара, при этом пароперегреватель выполнен в виде эжектора.

Следует отметить, что топливо для водородного парогенератора вырабатывается во «внепиковое» время с помощью электролизера в баки-аккумуляторы или доставляется автомобильным и железнодорожным транспортом. Такое топливоснабжение усложняет эксплуатацию ТЭС.

На рис. 3 представлена принципиальная тепловая схема проекта мини-водородно-кислородной тепловой электростанции (мини-ВКТЭС) [5, 6].

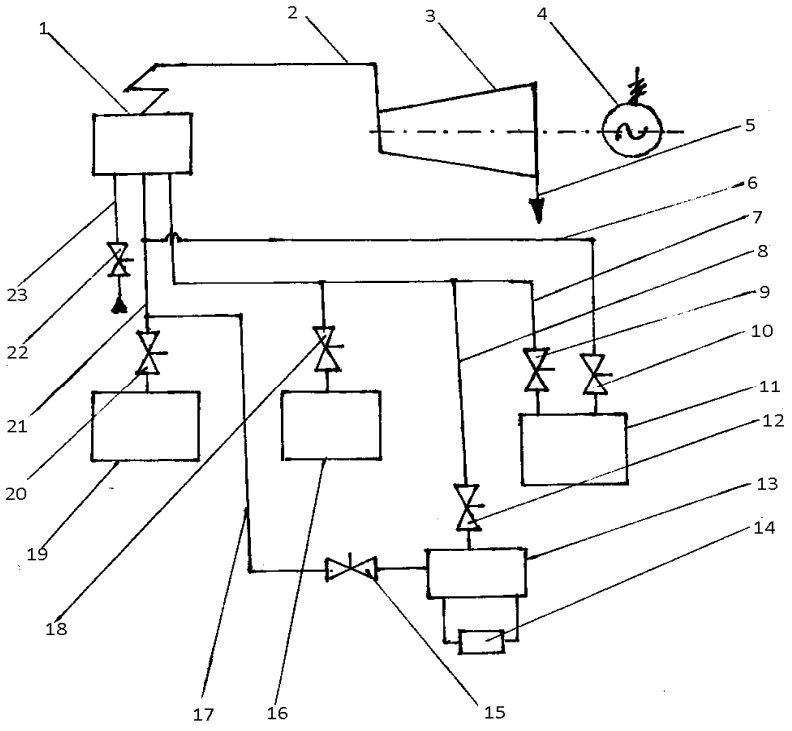

Рис. 3. Тепловая паротурбинная электростанция

Тепловая паротурбинная электростанция 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*; электролизер *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*.

Особенностью разработанного проекта является модульно-блочная схема станции, которая включает:

– модуль генерации водорода (водородная установка гидролиза твердого реагента – алюминия и электролизер);

– модуль генерации кислорода (кислородная установка);

– паротурбинный модуль (парогенерирующая водородно-кислородная установка и турбогенератор);

– модуль электрогенерации (электрохимическая установка на топливных элементах);

– магистральная арматура для связи модулей.

Основные функции установок модулей следующие:

– водородная генераторная установка на гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде, представленная на рис. 4 на основе проектов [7–12].

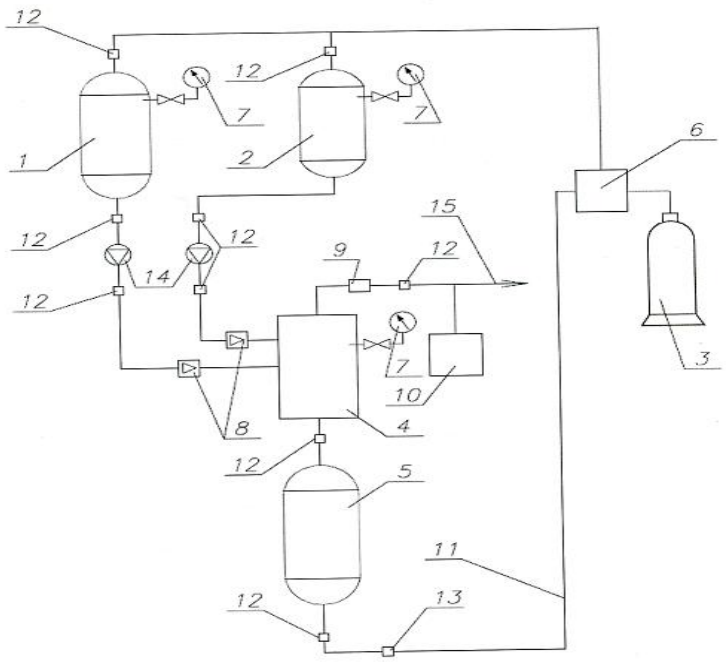

Рис. 4. Принципиальная схема водородной установки гидролиза твердого реагента – алюминия

Принципиальная схема водородной установки гидролиза твердого реагента – алюминия содержит: *1* – бак с водным раствором NaOH; *2* – бак с суспензией алюминия; *3* – баллон с азотом или гелием; *4* – реактор водорода; *5* – бак с отработанными продуктами (алюминат натрия); *6* – редуктор; *7* – манометр; *8* – вихревой расходомер; *9* – регулятор расхода водорода; *10* – газоанализатор – обеспечивает работу парогенерирующей водородно-кислородной установки и электрохимической установки на топливных элементах, которая обеспечивает

аварийные и собственные нужды станции. Электролизерная установка выполняет функции резервной установки по водороду. Модуль генерации кислорода по методу короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) [13], представленный на рис. 5, обеспечивает работу как парогенерирующей водородно-кислородной установки, так и работу электрохимической установки 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 водородно-кислородную электрическую станцию (ВКЭС). В этом случае основное теплотехническое оборудование парогенерирующая водородно-кислородная установка и турбогенератор выполняют функции резервно-аварийного оборудования, и станция работает в режиме ВКЭС.

Рис. 5. Модуль генерации кислорода по методу КБА

Модульно-блочный принцип построения мини-ТЭЦ позволяет создавать мобильные автономные энергосистемы, где модули размещаются на платформах прицепов-трейлеров, которые устанавливаются в ангаре. Концепция мобильных модулей создает предпосылки для сервисного технического обслуживания и ремонта автономных систем децентрализованного энергообеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турбоводородная энергоустановка: пат. 92473, Рос. Федерация / И.Г.Дроздов, С.В. Дахин, В.С. Рачук, С.П. Малышенко, А.В. Москвичев, В.И. Пригожин, А.Б. Шивцова, Д.П. Шматов. – № 2009138575/22, Бюл. № 8. – 2 с.: ил.

2. Автономная турбоводородная энергоустановка: пат. 92474, Рос. Федерация / И.Г. Дроздов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов, В.С. Рачук, С.П. Малышенко, А.В. Москвичев, В.И. Пригожин, А.Б. Шивцова, Д.П. Шматов. – № 2009138576/22, Бюл. № 8. – 2 с.: ил.

3. Ильичев, В.А. Гидродинамика, тепло- и массообмен в вихревых камерах сгорания водородных мини-парогенераторов: дисс. … канд. техн. наук / Ильичев В.А. – ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, 2013.

4. Энергоустановка: пат. 113537 Рос. Федерация / А.Р. Савич, В.А. Ильичев, С.П. Малышенко, О.П. Свиридов, А.А. Пригожин. – № 2010124469/06, Бюл. № 5. – 2 с.: ил.

5. Тепловая паротурбинная электростанция с парогенерирующей водородно-кислородной установкой. Заявка № RU 2018126592. Начало действия: 19.07.2018; Изобретатель(и): Н.Д. Рогалев, М.М. Султанов, Г.Ф. Терентьев, М.С. Иваницкий, Е.В. Курьянова, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

6. Парогенератор. Заявка № 2018125924. Начало действия: 13.07.2018; Изобретатель(и): М.М.Султанов, Г.Ф. Терентьев, М.С. Иваницкий, Ю.В. Гусева, Е.В. Курьянова, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

7. Способ получения водорода за счет гидролиза твердого реагента-алюминия в реакционном сосуде: пат. 2545290, Рос. Федерация / М.М. Султанов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов, П. В. Шамигулов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 15.11.2013.

8. Генератор водорода: пат. 2553885, Рос. Федерация / М.М. Султанов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов, П.В. Шамигулов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 15.11.2013.

9. Энергоустановка с электрохимическим генератором на основе водородно-кислородных топливных элементов: пат. 2594895, Рос. Федерация / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 21.07.2015.

10. Электрохимический генератор на основе водородно-кислородных топливных элементов: пат. 2597412, Рос. Федерация / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, Г.Ф. Терентьев, В.С. Кузеванов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»); заявл. 21.07.2015

11. 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.

12. Способ глубокого регулирования при получении водорода путем гидролиза твердого реагента – алюминия в реакционном сосуде и устройство для его осуществления. Заявка № 2018105754. Начало действия: 15.02.2018; Изобретатель(и): М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, Г.Ф. Терентьев, А.В. Пивченко, Е.В. Курьянова, Ю.А. Стружинская. Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).

13. Благочиннов, А. Альтернативная система производства водорода для охлаждения генераторов / А. Благочиннов // Энерговектор. – 2017. – № 9 (73).

14. http://metal-archive.ru/osnovy-metallurgii/1804-proizvodstvo-tehnicheskogo-kisloroda.html.

УДК 628.1

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ПРОМЫШЛЕННОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ

Дорофеев Ю.Н., Спиридонов Д.А. – студенты
Одоевцева М.В. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Показана эффективность применения тестовых установок для мониторинга отложений на обратноосмотических мембранных элементах производственной водоподготовительной установки. С использованием энергодисперсионного анализа отложений на поверхности мембран выявлено, что загрязнения второй стадии мембранной обессоливающей установки состоят из соединений кальция, железа и оксида кремния. Определение состава отложений на мембранных элементах обеспечит выбор оптимального водно-химического режима установки обратного осмоса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, химическая мойка, загрязнения мембран, водоподготовка.

Интерес к использованию обратного осмоса при подготовке обессоленной воды вызван тем, что его внедрение позволяет сократить количество потребляемых реагентов (кислот, щелочей, хлорида натрия). Независимо от колебаний состава и температуры воды современные обратноосмотические мембраны обеспечивают практически неизменное качество очищенной воды, что делает обратный осмос чрезвычайно перспективным для энергетики [1].

Со временем в процессе эксплуатации установок обратного осмоса (УОО) мембранные элементы подвергаются загрязнению взвешенными или слаборастворимыми веществами, присутствующими в исходной воде. Наиболее распространенные вещества, которые могут отлагаться на поверхности мембранных элементов: карбонат кальция, сульфат кальция, оксиды металлов, соединений кремния, органические или биологические отложения [2].

Характер и скорость отложений на поверхности мембраны зависят от состояния исходной воды и стабильности работы системы предподготовки.

Формирование отложений на поверхности мембран – это прогрессирующий процесс, и если его не контролировать на ранней стадии, то эксплуатационные качества обратно-осмотических мембранных элементов снизятся за относительно короткий период.

Сегодня на энергетическом рынке множество фирм предлагают свои моющие растворы и методики очистки мембранных элементов УОО. Конкретный выбор реагентов и технологии очистки в реальных условиях эксплуатации УОО определяется эмпирическим способом, так как все фирмы обещают высокую

эффективность удаления отложений с поверхности мембраны. Направленный выбор реагентов может быть реализован только после определения состава отложений [3, 4].

Состав и количество загрязняющих веществ определялись следующими методами:

– анализ исходной воды и прогнозирование возможных загрязнений;

– визуальный осмотр торцов мембранных элементов;

– анализ состава кислых и щелочных растворов после химической мойки тестовой установки;

– разборка (вскрытие) мембранного элемента и прямой анализ отложений с поверхности мембраны.

Гидравлическая схема производственной УОО с подключением тестовой установки приведена на рис. 1.

Для соблюдения условий эксплуатации производственную и тестовую установки подключали параллельно на концентрат первой стадии производственной УОО [4].

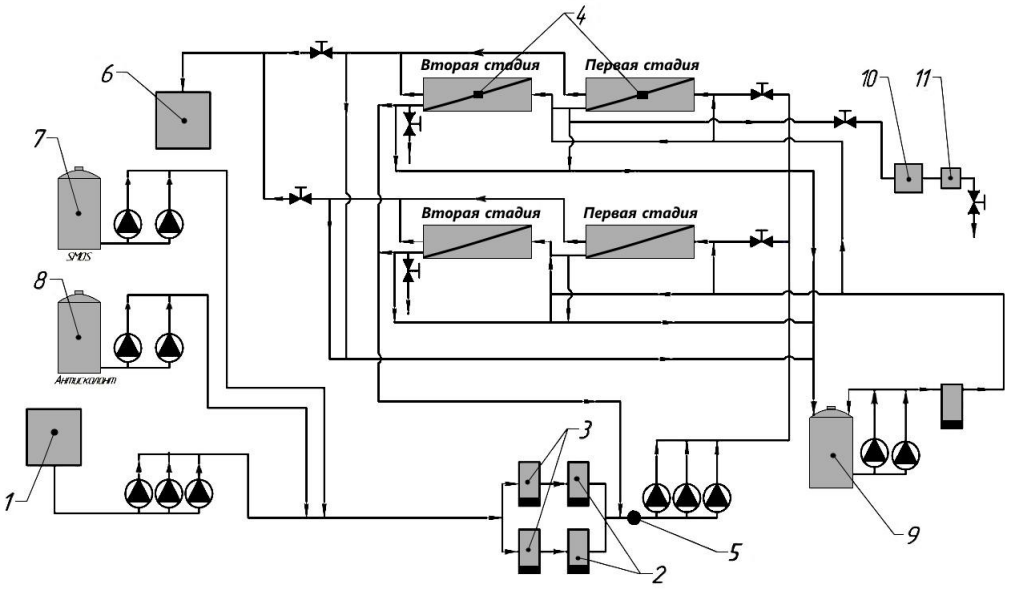

Рис. 1. Схема действующей установки: 1 – емкость исходной воды; 2 – мешочный тканевый фильтр 20 микрон; 3 – фильтр полипропиленовый 5 микрон; 4 – секции обратного осмоса; 5 – насосы подачи исходной воды на секции обратного осмоса; 6 – емкость пермеата; 7 – система дозировки бисульфита; 8 – система дозировки антискаланта; 9 – станция промывки обратного осмоса; 10 – бак-накопитель концентрата после первой ступени; 11 – тестовая установка обратного осмоса

В ходе работы отслеживались следующие параметры работы тестовой установки: расходы потоков, давление на механических фильтрах, величина конверсии и селективность мембранных элементов. После 800 часов эксплуатации тестовой установки селективность мембран уменьшилась на 22 %, солесодержание пермеата увеличилось в 20 раз (табл. 1). Увеличение солесодержания пермеата являлось критерием для проведения химической мойки мембран.

Для реализации химической мойки мембранный элемент подключали к станции химической мойки [3, 4].

Таблица 1

Результаты испытаний при подключении тестовой установки на концентрат первой стадии производственной УОО

Показатели	Исходный раствор	Концен-трат	Пермеат	Исходный раствор	Концен-трат	Пермеат
	Начало работы (27.03.18)			Окончание работы (4.06.18)		
SDI	8,81	–	–	9,65	–	–
$Ж_{о}$, мг-экв/дм^3	4,50	6,40	0,02	4,00	6,30	0,58
$Ж_{Ca}$, мг-экв/дм^3	3,00	4,80	0,01	3,00	4,60	0,36
$Ж_{Mg}$, мг-экв/дм^3	1,50	1,60	0,01	1,00	1,70	0,22
$Щ_{о}$, мг-экв/дм^3	3,00	4,70	0,10	3,00	4,40	0,55
Хлориды, мг/дм^3	19,20	32,50	0,35	38,40	47,30	8,90
Солесодержание, мг/дм^3	848,4	1232,9	8,2	767,5	1029,2	159,8
pH	7,65	7,70	5,75	7,00	7,75	6,30
Расход, дм^3/ч	34,80	24,82	13,58	45,81	32,72	13,09
Конверсия, %	39,0			28,6		
Селективность мембран, %	98,2			76,8		

Химическую мойку мембранных элементов 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.

Продолжительность химической мойки мембранного элемента тестовой установки 4 часа.

Визуальный осмотр торцов мембранных элементов после химической мойки показал, что торцы мембран осветлились. Результаты анализа проб моющих растворов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав загрязнений моющих растворов мембранных элементов тестовой установки по данным производственной лаборатории

Показатели	Щелочной раствор	Кислотный раствор
Взвешенные вещества, мг/дм^3	28	35
Железо общее, мг/дм^3	1,0	1,4
SiO_2, мг/дм^3	16,3	–

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.

После разборки (вскрытия) мембранных элементов проводился визуальный осмотр мембран и анализ отложений с поверхности мембраны с использованием энергодисперсионного метода. Результаты анализа отложений на поверхности мембран тестовой установки и, следовательно, производственной УОО с использованием энергодисперсионного метода приведены в табл. 3.

Результаты исследования отложений на поверхности мембран позволили уточнить состав отложений на элементах производственной УОО. Выявлено, что на мембранах накапливаются отложения из органических веществ, оксида кремния, железа и соединений кальция, что определяет низкое качество обессоленной воды, высокие энергозатраты, расходы на химические реагенты и собственные нужды производственной УОО.

Таблица 3

Результаты энергодисперсионного метода анализа отложений

Элемент	До проведения химической очистки	
	Доля, %	Погрешность измерения, %
Углерод	13,32	11,23
Кислород	46,25	8,70
Натрий	0,73	14,88
Магний	1,55	9,20
Кремний	14,47	4,75
Калий	1,98	4,96
Кальций	3,10	4,00
Железо	9,17	3,07

Применение тестовых установок обратного осмоса является эффективным методом определения состава и интенсивности загрязнения мембранных элементов производственной УОО. Максимальная информация о составе отложений обеспечивается при исследовании поверхности мембран. Определение состава отложений на мембранных элементах обеспечит выбор оптимального водно-химического режима производственной установки обратного осмоса. Выбор оптимального водно-химического режима снизит скорость формирования отложений, что увеличит срок эксплуатации мембранных элементов промышленной водоподготовительной установки при стабильном высоком качестве обессоленной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландина, А.Г. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии / А.Г. Баландина, Р.И. Хангильдин, И.Г. Ибрагимов и др. // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 5. – С. 336–375.

2. Первов, А.Г. Влияние биологического загрязнения на работу обратноосмотических и ультрафильтрационных мембранных элементов / А.Г. Первов, А.П. Андрианов, Э.А. Телитченко // Мембраны. – 2004. – № 1. – С. 3–18.

3. Макаренко, Е.А. Опыт применения экспериментально-обучающей установки мембранного обессоливания воды на АО «Волжский трубный завод» / Е.А. Макаренко, М.В. Одоевцева, Ю.Н. Дорофеев, Д.А. Спиридонов // Ресурсоэнергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: сборник докладов Межрегиональной конференции, 26 декабря 2017 г. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2018. – С. 95–98

4. Пантелеев, А.А. Методологические подходы к проведению пилотных и тестовых испытаний на установках обратного осмоса: результаты сравнительных исследований / А.А. Пантелеев, В.В. Бобинкин, С.Ю. Ларионов и др. // Теплоэнергетика. – 2017. – № 10. – С. 92–98.

УДК 621.165

РАЗВИТИЕ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ТРЕЩИНЫ В СИСТЕМЕ «ЛОПАТКА – ЗАЩИТНОЕ НАПЫЛЕНИЕ» В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Смирнов С.П. – студент
Кулькова В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается процесс отслоения защитного напыления от материала самой лопатки вследствие скопления и переползания серии дислокаций от источника, расположенного на границе «лопатка – напыление».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: паровая турбина, лопатка турбины, дислокация, трещина, наноструктура, защитное покрытие.

Введение

Стремительное развитие технологий последнего времени неизменно ведет к росту потребности человечества в энергии, необходимой для их работы, что неизменно сказывается увеличением нагрузки на энергетическое оборудование и ведет к его повышенному износу. В таких условиях представляется необходимым усовершенствование не только инженерных конструкций отрасли, но и применяемых материалов.

Особое место среди используемых материалов в последние десятилетия занимают наноструктурные и ультрамелкозернистые металлы, обладающие целым рядом нетривиальных механических свойств. В энергетике такие материалы применяются в качестве защитных покрытий, а также как основной материал для частей ответственных конструкций, работающих в сложных температурно-деформационных условиях.

Одной из острых проблем энергетики традиционно является поиск путей повышения срока службы турбинных лопаток. Под действием потока перегретого

пара и сконденсировавшейся жидкости на их поверхности активно развиваются такие дефекты, как эрозия, коррозия и трещины, что ведет к относительно скорому выходу лопаток из строя. По статистке лопатка турбины служит в среднем 20 000 часов. Применение внешних покрытий позволяет защитить лопатку от агрессивного воздействия среды и тем самым увеличить ее ресурс.

Одним из наиболее перспективных материалов, используемых в таком качестве, являются наноструктурированные металлы благодаря их повышенной механической прочности. Однако и они подвержены процессам разрушения. Как показывает анализ выведенных из слоя лопаток, процесс растрескивания начинается с образования трещины на поверхности покрытия, продолжается на границе раздела «лопатка – напыление» и далее уходит в тело лопатки, вызывая стремительное разрушение последней. Таким образом, одним из обязательных условий повышения надежности энергетического оборудования является углубление представлений о процессах образования и развития трещин в нем.

Рассмотрим участок лопатки турбины с наноструктурным напылением. Предположим, что на него действует внешнее периодическое напряжение:

$$\tau = \tau_0 \cos\omega \cdot t, \tag{1}$$

где ω – скорость вращения турбины, t – время, l – длина границы.

Под действием внешних напряжений на границе раздела «напыление – подложка» происходит относительное смещение зерен, в результате чего образуется периодически действующий источник дислокаций.

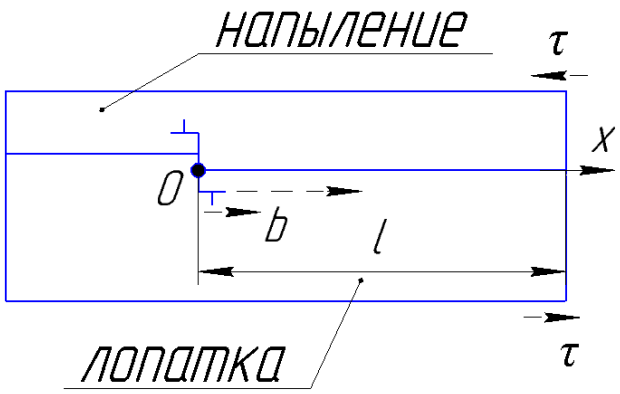

Рис. 1. Модель образования дислокаций

Запишем энергию, необходимую для образования дислокаций как

$$E_d = E_{ed} + E_{sd} + E_{vd}, \tag{2}$$

где E_{ed} – энергия ядра дислокации, E_{sd} – энергия собственная дислокации, E_{vd} – энергия взаимодействия дислокации с полем внутренних напряжений. В свою очередь

$$E_{sd} = (\sigma_{ik} \cdot e_{ik})/2, \tag{3}$$

где e_{ik} – модуль упругости определяем для изотропного материала как $e_{ik} = \sigma_{ik}/2G$. Расписав напряжения по координатным осям, центр которых связан с источником дислокации, и проведя интегрирование по длине участка границы l до ближайшего тройного стыка зерен, найдем энергию дислокации на этом участке границы:

$$E_{sd} = \int_0^l \int_0^{2\pi} E(x) x dx d\theta = \frac{Gb^2 4\pi}{1-\nu} \tag{4}$$

В качестве радиуса ядра дислокации рассмотрим расстояние $r_я$, на котором напряжения взаимодействия дислокаций максимальны. При этом максимальная энергия, заключенная в этой области, будет выражаться:

$$U_{sd} = (r \le r_я) \le \frac{Gb^2}{8\pi^2 \cdot r_я^2}. \tag{5}$$

Определим полную энергию ядра дислокации, заключенной в объеме материала, окружающего ее как

$$E_{ed} = \pi \cdot \tau_я^й \cdot U(\tau_я) \le \frac{Gb^2}{8\pi} \approx 0{,}04Gb^2. \tag{6}$$

В случае периодического источника на границе происходит скопление дислокаций, которые под действием внешнего периодического напряжения будут перемещаться по границе до тех пор, пока будет выполняться условие

$$n\sigma_д \ge \sigma_{кр},$$

где $\sigma_д$ – релаксация напряжения от одной дислокации; $\sigma_{кр}$ – критическое значение напряжения, действующего на границе.

Запишем выражение для функции дислокаций от одного источника:

$$C = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{1} f(\eta)/(\eta - \eta_0) \cdot d\eta, \tag{7}$$

решением которого является выражение

$$f(\eta) = C(\eta)/(1-\eta^2)^{1/2},$$

где $n = x/l, C = 2\tau/G$. Интегрирование данного выражения по длине границы ($0 \le x \le l$) дает зависимость количества дислокаций от внешнего напряжения и длины границы:

$$n = 2 \cdot \left(\frac{\tau}{G}\right) \cdot \left(\frac{L}{b}\right). \tag{8}$$

Энергия, необходимая для образования n-дислокаций, может быть получена суммированием произведений (8) и (6) с (8) и (4):

$$E_d = \left(0{,}08 + \frac{8\pi}{1-\nu}\right) \cdot lb\tau. \tag{9}$$

Работа по перемещению серии из n-дислокаций может быть найдена из выражения:

$$A = n\tau b\delta l = \frac{2}{G}\tau_0^2 \cos^2(\omega t) \cdot l^2. \tag{10}$$

Полная требуемая энергия для накопления предельного количества дислокаций на границе между лопаткой и подложкой будет выражена как сумма (9) и (10):

$$E = \left(0{,}08 + \frac{8\pi}{1-\nu}\right) \cdot lb\tau_0 \cos(\omega t) + \frac{2}{G}\tau_0^2 \cos^2(\omega t) \cdot l^2. \tag{11}$$

Расчеты по уравнению количества движения показывают, что при прочих равных условиях, например при заданной скорости и расходе рабочего тела, с наибольшей силой поток будет воздействовать на лопатку, форма которой обеспечивает его поворот на 180°.

Примерная оценка энергии, передаваемой потоком пара на лопатку может быть

$$w = \frac{Q}{N \cdot z} + \frac{mv_1^2}{2}\left(1 - \zeta^2\right), \tag{12}$$

где Q – расход тепловой энергии на турбоустановку, N – мощность турбины, z – количество лопаток турбины, v_1 – скорость входящего потока пара для ступени, ζ – коэффициент потерь, которые для турбин берут 0,96…0,97, m – расход пара.

Анализ зависимости отношения полученной от потока энергии к энергии, необходимой для отслаивания, позволяет оценить приблизительное время работы лопатки до перехода трещины непосредственно в нее саму.

Таким образом, длина отслоившегося слоя защитного покрытия показывает прямопропорциональную зависимость от времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витязь, П.А. Наноматериаловедение: учебное пособие / П.А. Витязь, Н.А. Свидунович, Д.В. Куис. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 512 с.

2. Андриевский, Р.А., Рагуля, А.В. Наноструктурные материалы: учебное пособие для вузов / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Академия, 2005. – 192 с.

3. Валиев, Р.З. Александров, И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.

4. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры и нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

5. Азаренков, Н.А. Наноматериалы, нанопокрытия, нанотехнологии: учебное пособие / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Л.В. Маликов, П.В. Турбин. – Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 209 с.

6. Коротаев, А.Д. Наноструктурные и нанокомпозитные сверхтвердые покрытия / А.Д. Коротаев, В.Ю. Мошков, С.В. Овчинников, Ю.П. Пинжин, В.М. Савостиков, А.Н. Тюменцев // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 103–116.

УДК 621.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МАТЕРИАЛЕ БАРАБАНОВ КОТЛОВ

Лебедев В.В. – магистрант
Кулькова В.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается дислокационный механизм роста трещины барабана котла, а также основанный на нем приближенный метод оценки остаточной работоспособности материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: барабан котла, металл, зернограничная трещина, дислокация, область деформации.

Одним из объектов повышенного риска в энергетической отрасли являются барабаны котлов высокого давления. Высокий уровень запасенной в них энергии упругой деформации с одной стороны и склонность к хрупкому разрушению их материала с другой, могут стать причинами серьезных техногенных катастроф.

В подавляющем большинстве такие разрушения были зафиксированы на оборудовании, проработавшем длительное время. В этих случаях исправно работавшее в номинальном режиме оборудование стремительно разрушалось при очередном гидроиспытании. Данное мероприятие является обязательным при каждом запуске котла и заключается в нагнетании избыточного давления в его системы. Такое положение дела может свидетельствовать о протекании в металле барабанов процессов, ведущих к накоплению усталостных напряжений в некоторой области вблизи трещины. Эта область, находящаяся в равновесии при длительной работе барабана, стремительно разрушается при повышении давления, при гидроиспытаниях, удлиняя трещину и снижая остаточную прочность материала.

Рассмотрим границу зерен, в начале которой расположена трещина длиной l. На систему действует постоянное внешнее напряжение σ_0, которое рассчитывается из теории упругости барабана котла:

$$\sigma_0 = \sigma_p + \sigma_t + \sigma_k, \tag{1}$$

где σ_p – напряжение, вызванное давлением воды и пара в барабане; σ_t – температурное напряжение из-за градиента температуры внутри стенки барабана; σ_k – напряжение, вызванное конструктивными особенностями (отверстия, сварные швы).

В связи с протекающими по границе зерна релаксационными процессами, общее напряжение на границе будет иметь вид:

$$\sigma_{c\tau} = \sigma_0 - \sigma_1,$$

где σ_1 – напряжение внутреннего трения материала.

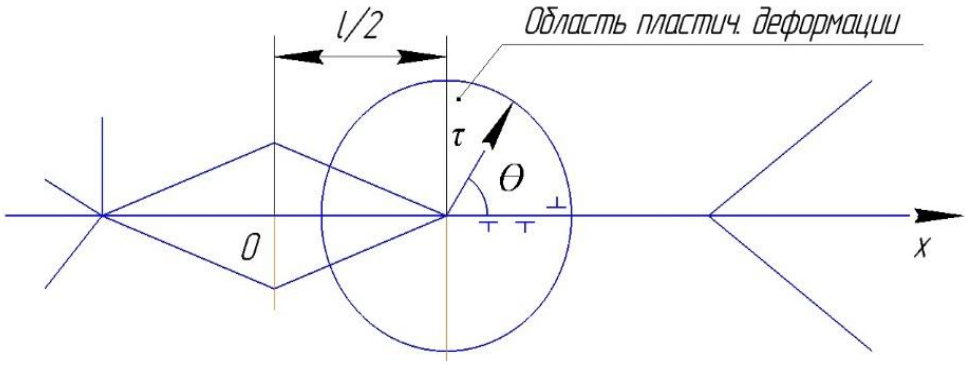

Рисунок. Область деформации радиусом *r*
в вершине зернограничной трещины

Под действием этого напряжения σ_{gr} у вершины трещины образуется зона пластической деформации *r* (так как рабочие температуры котла много меньше температуры плавления, в данном случае возможна лишь «холодная» деформация металла, т. е. по дислокационному механизму), см. рисунок. Радиус области деформации в общем виде можно записать как

$$r(\theta) = \frac{k^2}{4\pi\sigma_t} \cdot \left[1 + \frac{3}{2}\sin^2\theta + \cos\theta\right], \qquad (2)$$

где σ_τ – напряжение текучести, *k* – коэффициент трещиностойкости.

Для решения данной одномерной задачи угол $\theta = 0$, тогда (1) примет вид:

$$r = \frac{k_1^2}{4\pi\sigma_t} = \frac{\sigma_{gr}^{\ 2} l}{2\sigma_t^{\ 2}}. \qquad (3)$$

Напряжение на деформированном участке границы будет зависеть от количества собранных здесь дислокаций и может быть выражено следующим образом:

$$\sigma_{gr} = \frac{2DN}{r}, \qquad (4)$$

где $D = \dfrac{Gb}{2\pi(1-v)}$; *N* – количество дислокаций. Найдем количество дислокаций в пластической зоне:

$$D\int \frac{\rho(x')dx'}{x - x'} = \sigma_t(x), \qquad (5)$$

где ρ – плотность дислокаций в деформированной области.

Решая это уравнение для области $\frac{l}{2} < x < \frac{l}{2} + r$, получим

$$\rho(x) = -\frac{\sqrt{R}}{\pi^2 D}\int \frac{\sigma(x)dx}{(x'-x)\sqrt{R}}, \tag{5}$$

$$\rho(x) = -\frac{\sigma_1}{\pi^2 D}\left[A\tau ch\left|\frac{2r(l^2+r)+l(\frac{l}{2}-x)}{(l+2r)(\frac{l}{2}-x)}\right| - A\tau ch\left|\frac{2r(l^2+r)+l(\frac{l}{2}+x)}{(l+2r)(\frac{l}{2}+x)}\right|\right]. \tag{6}$$

Количество дислокаций найдем интегрированием (6) по области r:

$$N = \frac{2\sigma_1 l}{\pi^2 D}\ln\left(\frac{l}{l+2r}\right), \tag{7}$$

тогда, подставив (7) в (4), получим

$$\sigma_{gr} = \frac{2\sigma_1 l}{\pi^2 r}\ln\left(\frac{l}{l+2r}\right). \tag{8}$$

Подставив (7) в (2), найдем длину области разгружения:

$$r = \frac{4\sigma_1^2 l^2}{r^2\pi^4\sigma_т^2}\ln\left(\frac{l}{l+2r}\right)^2. \tag{9}$$

Из граничных условий решения уравнения

$$\frac{l}{l+2r} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma_p+\sigma_t+\sigma_k}{\sigma_1}\right).$$

Решим это уравнение относительно r:

$$r = \left(\frac{4\sigma_1^2 l^2}{\pi^4\sigma_т^2}\ln\left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma_p+\sigma_t+\sigma_k}{\sigma_1}\right)\right)^2\right)^{1/3}. \tag{10}$$

Для анализа остаточной прочности необходимо определить критическую длину трещины, при которой воздействие повышенным давлением приведет к хрупкому развитию трещины. Найдем эту длину $l_{кр}$ как

$$\sigma_с = \sqrt{\frac{2E(\gamma-\gamma_p)}{\pi l_{кр}}}, \tag{11}$$

где σ_c – внешнее напряжение, действующее на металл в условиях гидроиспытаний; γ – упругая энергия границы; γ_p – работа пластической деформации, накопленной в предыдущем цикле работы. Выразим $l_{кр}$ из (11):

$$l_{кр} = \frac{2E(\gamma - \gamma_p)}{\pi \sigma_c^{\ 2}}. \tag{12}$$

Найдем γ_p как произведение $f \cdot U$, где f – сила, действующая на единичную дислокацию; U – смещение в пластической зоне [4]:

$$U = \frac{\sigma_1 l}{\pi^2 D} b \ln\left(\frac{l}{l + 2r}\right). \tag{13}$$

В свою очередь f может быть найдена из равенства работы по прохождению N дислокаций длины и под напряжением σ_{gr} и произведения $f \cdot b$.

$$f = \sigma_{gr} b, \tag{14}$$

тогда

$$\gamma_p = \frac{\sigma_{gr}\sigma_1 l}{\pi^2 D} b^2 \ln\left(\frac{l}{l + 2r}\right). \tag{15}$$

Оценим количество пусков до стадии неконтролируемого роста трещины как отношение критической длины трещины при данных условиях к элементарному приращению трещины на радиус деформированной зоны $n = \frac{l_{кр}}{r}$. Подставляя сюда выражения (12), (15) и (10), получим окончательную зависимость:

$$n = \frac{2E\left(\gamma - \frac{\sigma_{gr}\sigma_1 l}{\pi^2 D} b^2 \ln\left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma_p + \sigma_t + \sigma_k}{\sigma_1}\right)\right)\right)}{\pi \sigma_c^{\ 2}} \left(\frac{4\sigma_1^2 l^2}{\pi^4 \sigma_т^2} \ln\left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma_p + \sigma_t + \sigma_k}{\sigma_1}\right)\right)^2\right)^{-1/3}. \tag{16}$$

Таким образом, в конечном итоге данная зависимость позволяет приближенно оценить количество пусков до момента разрушения котла.

СПИСОК ЛИТЕРАУРЫ

1. Каур, И., Густ, В. Диффузия по границам зерен и фаз. Пер. с англ. Б.Б. Страумала; под ред. Л.С. Швиндлермана / И. Каур, В. Густ. – М.: Машиностроение, 1991. – 448 с.

2. Штремель, М.А. Прочность сплавов. Часть II. Деформация: учебник для вузов / М.А. Штремель. – М.: Издательство «МИСиС», 1997. – 527 с.

3. Михалев, М.Ф. Примеры и задачи: Учебное пособие для студентов втузов / М.Ф. Михалев, Н.П. Третьяков, А.И. Мильченко, В.В. Зобнин; под общ. ред. М.Ф. Михалева. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1984. – 301 с.

4. Орлов, А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах / А.Н. Орлов. – М.: Высшая школа. 1983. – 144 с.

УДК 628.5

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ

Мельникова А.А., Мельников Д.Ю. – магистранты
Иваницкий М.С. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В данной работе проанализированы методики расчетного определения эффективности работы электрофильтров. Рассмотрено и приведено описание объекта промышленного исследования. Выполнено обобщение результатов численного моделирования работы систем газоочистки. Представлены результаты расчета эффективности газоочистки электрофильтрующего оборудования и их анализ. Показаны результаты расчетов электрофильтрующих установок с учетом особенностей конструктивного исполнения их коронирующих и осадительных электродов. Изучено влияние различных факторов (электрофизических параметров и конструктивных размеров), влияющих на эффективность удаления твердых частиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрофильтры, дымовые газы, пыле-, газоочистка, тепловые электрические станции, коронирующие электроды, осадительные электроды.

Очистка газов в электрофильтрах от взвешенных частиц происходит под действием электрического поля, в котором газовые молекулы ионизируются электрическим зарядом. В составе газа находятся частицы диаметром от 5 до 50 мкм и более. Газы не проводят электрический ток, но при определенных условиях частицы, входящие в состав газа, становятся электрически заряженными. Если поместить газ с заряженными ионами между электродами, соединенными с источником тока высокого напряжения, ионы начинают двигаться в газе по силовым линиям поля. При этом на скорость движения частиц влияет величина напряженности электрического поля. Распределение фракционного состава частиц приведено на рис. 1.

Конструкция электрофильтра содержит осадительную камеру, в которой происходит улавливание заряженных частиц, а также высоковольтную аппаратуру, питающую электрофильтр выпрямленным током высокого напряжения, достигающего 10 000 кВ. Высоковольтный выпрямитель преобразует переменный ток в выпрямленный, который подается на коронирующие электроды электрофильтра.

Условно частицы газовой пыли имеют шарообразную форму, их можно разделить на несколько фракций, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Разделение частиц на фракции

Номер фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Размер частиц, мкм	0–5	>5–10	>10–15	>15–20	>20–30	>30–40	>40–60	>60–90	>90–100

Осадительная часть содержит осадительные и коронирующие электроды. При прохождении очищаемого газа через межэлектродное пространство ионы заряжаются под действием электрического поля и оседают на электродах. Уловленные частицы собираются в установленном под электрофильтром бункере, откуда удаляются на золошлакоотвалы.

Частицы можно разделить на три группы:

– к первой группе относятся частицы, которые при соприкосновении с осадительным электродом получают заряд электродов, при этом они отталкиваются от электродов и возвращаются в газовый поток. Для улавливания таких частиц необходимо увеличивать скорость у поверхности осадительных электродов;

– пыль второй группы преобладает в газовом потоке, улавливание таких частиц происходит без затруднений;

– к третьей группе относятся частицы, которые при осаждении действуют как изоляция, они создают напряжение в слое газовой пыли. При повышении напряжения происходит электрический «пробой», это явление называется «обратной короной», оно сопровождается выделением положительно заряженных ионов.

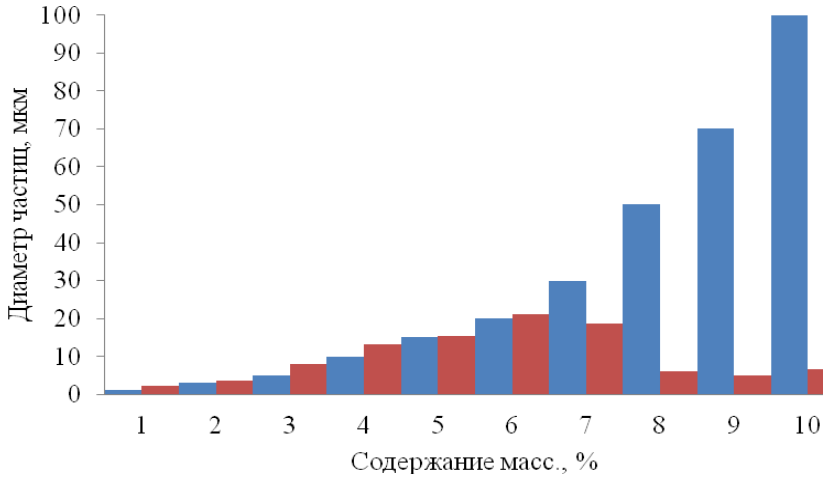

Рис. 1. Зависимость диаметра частиц от их массового содержания в продуктах сгорания

Ионы движутся к коронирующим электродам и частично нейтрализуют отрицательный заряд частиц. При этом положительные ионы преобразуют электрическое поле между электродами в поле, идентичном полю между двумя остриями электродов. Ниже представлены основные способы расчета эффективности очистки газов электрофильтрами, обусловленные вышеуказанными факторами [1–3].

1. *Общий вид степени очистки газов, учитывающий конструктивные параметры электрофильтрующего оборудования*

В общем виде формула степени очистки газов зависит от коэффициента *f*, характеризующего геометрические размеры электрофильтра и скорость газов в электрофильтре:

$$\eta = 1 - e^{-w \cdot f}. \quad (1)$$

Коэффициент *f* рассчитывается по формуле, м^2/(м^3/с):

$$f = \frac{L}{H \cdot \upsilon}. \quad (2)$$

2. *Способ очистки, учитывающий фракционное содержание твердых частиц в газах*

В случае наличия данных по фракционному составу пыли $\Phi_1 + \Phi_2 + \ldots + \Phi_n = 100$ %, где Φ_n – процентное содержание пыли в данной фракции. Общий коэффициент очистки можно определить по формуле

$$\eta = \frac{\eta_{ф1} \cdot \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{ф2} \cdot \Phi_2}{100} + \ldots + \frac{\eta_{фn} \cdot \Phi_n}{100}. \quad (3)$$

здесь $\eta_{ф1}$, $\eta_{ф2}$, … $\eta_{фn}$ – степень очистки *i*-й фракции, %.

3. *Влияние количества электрических полей*

При увеличении количества электрических полей эффективность очистки выходящих газов увеличивается. Данная зависимость выражается формулой

$$\eta = 1 - e^{-B \cdot n}. \quad (4)$$

где *B* – эмпирическая константа (*B* = 0,9 при неблагоприятных условиях очистки газов от золы, обладающей повышенным удельным электрическим сопротивлением; *B* = 1,3 – экспериментальное значение, *B* = 2 при благоприятных условиях очистки газов от сжигания углей в устойчиво работающем аппарате); *n* – число электрических полей электрофильтра [1].

4. *Способ очистки, учитывающий скорость газов в трубе*

В случае наличия данных по скорости газов в трубе и скорости движения заряженных частиц эффективность очистки газов рассчитывается по формуле

$$\eta = 1 - e^{-w \frac{2 \cdot L}{R \cdot \upsilon}}, \quad (5)$$

где *w* – скорость движения заряженных частиц к поверхности трубы (скорость дрейфа), м/с; *L* – длина трубки, м; *R* – радиус осадительного электрода, м; υ – скорость газов в трубе, м/с.

Для пластинчатого электрофильтра формула (5) имеет вид:

$$\eta = 1 - e^{-w\frac{2\cdot L}{H\cdot \upsilon}}, \qquad (6)$$

где H – расстояние между коронирующими и осадительными электродами, м.

Для электрофильтра с электродами шестигранной или квадратной формы формула (5) имеет вид:

$$\eta = 1 - e^{-w\frac{P\cdot L}{S\cdot \upsilon}}, \qquad (7)$$

где P – периметр осадительного электрода, м; S – общая площадь поперечного сечения, м^2 [1, 2].

Модели электрофильтров и их технические характеристики приведены в табл. 2 [1].

Таблица 2

Технические характеристики электрофильтров

Тип электрофильтра	**ЭГД2-152-9-6-5**	**ЭГБ1М2-50-12-6-5**	**ЭГВ1-26-12-6-5**	**ЭГВ2-38-12-6-5**	**ЭГСЭ 2-66-12-18-5**
Производительность по очищаемому газу (при условной скорости 1 м/с), м^3/ч	1 260 000	846 000	486 360	711 000	2 000 000
L	31 105	28 500	22 740	22 740	37 400
B	25 940	22 460	14 000	17 540	34 440
H	29 250	19 910	19 910	19 910	22 600
Количество секций	2	2	1	2	2
Количество газовых проходов	152	50	26	38	66
Номинальная высота электродов, м	9	12	12	12	12
Количество элементов в осадительном электроде	6	6	6	6	18
Количество электрических полей по длине электрофильтра	5	5	5	5	5
Межэлектродный шаг, мм	350	400	460	460	350

Принятые параметры расчета: напряженность электрического поля E = = 3,26·10^5 В/м, скорость газов υ = 2 м/с, длина трубы H = 100 м.

Обобщенный график зависимости КПД от размера твердых частиц для различных моделей электрофильтра представлен на рис. 2.

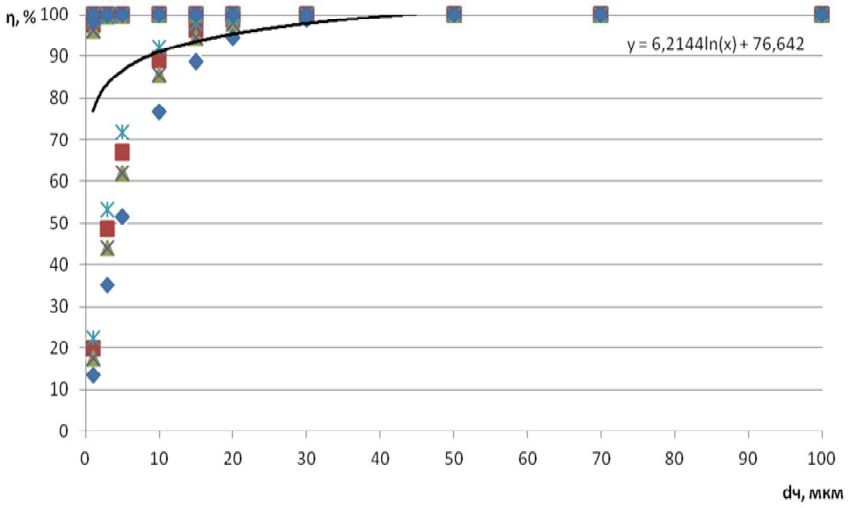

Рис. 2. График зависимости КПД электрофильтра от размера частиц

В результате обработки полученных данных имеем обобщенное уравнение для расчета степени очистки от диаметра твердых частиц:

$$\eta = 6{,}2144\, ln(\, d_{ч}\,) + 162{,}5. \qquad (8)$$

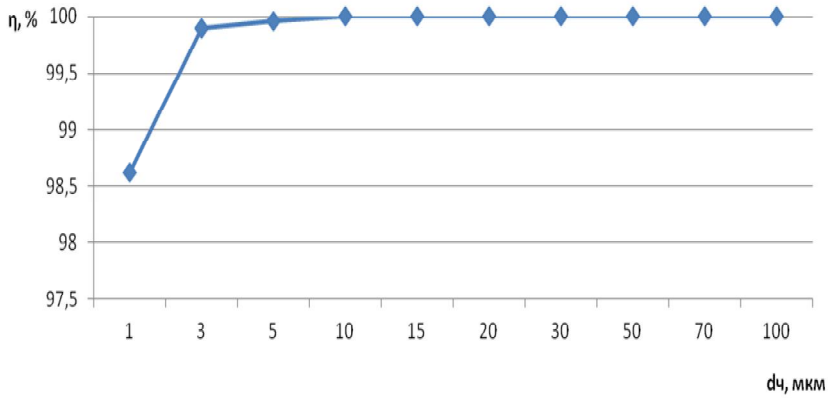

Рис. 3. Первый метод расчета

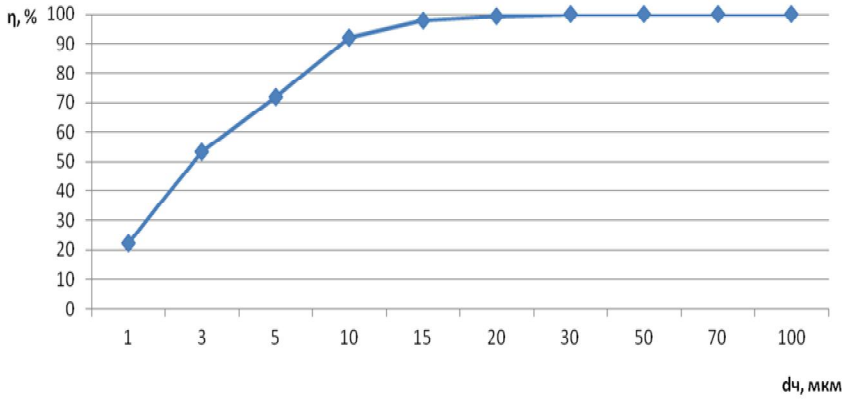

Рис. 4. Второй метод расчета

Графики зависимости КПД электрофильтра типа ЭГСЭ 2-66-12-18-5 от размера движения частиц представлены на рис. 3, 4 и 5.

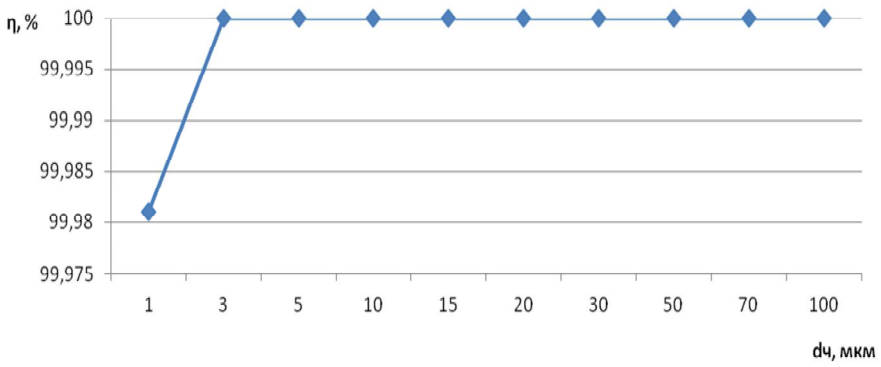

Рис. 5. Третий метод расчета

Уравнение (8) является обобщением результатов, полученных аппроксимацией известных методов расчета, его можно использовать для оценки эффективности работы электрических аппаратов газоочистки на стадии предпроектного выбора оборудования. Относительная погрешность расчета эффективности улавливания твердых частиц в электрическом фильтре по уравнению (8) не превышает 20 %.

Анализ результатов показывает, что частицы радиусом 2,5 мкм улавливаются менее эффективно, поскольку их скорость мала и достигает не более 0,01 м/с, это способствует их перезарядке и электрическому пробою. Частицы размером 50 мкм имеют более высокую скорость, поэтому их относят к частицам второй группы, которые не вызывают затруднений при осаждении (степень их задержки в электрофильтре достигает 99,99 %). Из приведенных данных следует, что эффективность работы электрических аппаратов газоочистки в значительной степени зависит от фракционного состава твердых частиц и их скорости движения в электрическом поле устройства. Отметим, что максимальная степень очистки газовых выбросов от твердых частиц в рассмотренных условиях численного моделирования достигается при скорости частиц от 1,5 до 3 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1967. – 344 с.

2. Санаев, Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами / Ю.И. Санаев – Ярославль: Кондор-Эко, 2009. – 163 с.

3. ГОСТ 31830-2012. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013.

УДК 628.3

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Алеев А.С. – магистрант
Гусева Ю.В. – канд. физ.-мат. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности и экономичности работы водоподготовительной установки ООО «Тепловая генерация г. Волжского» путем утилизации сточных вод в трехкорпусной выпарной установке. Проанализированы начальные параметры и режимы работы водоподготовительной установки, определены расчетные характеристики процесса выпаривания сточных вод для получения сухого остатка.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергетическая эффективность, сточные воды, термические способы водоподготовки.

В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2035 года снижение энергоемкости экономики и повышение эффективности использования энергоносителей являются важнейшим стратегическим направлением. Электроэнергетика является определяющей составляющей в структуре энергопотребления, в которой вместе с теплоснабжением используется более 70 % всех потребляемых в стране топливно-энергетических ресурсов. При этом вспомогательные системы, обеспечивающие качественную подготовку и использование энергоресурсов на теплогенерирующих предприятиях, нуждаются в совершенствовании работы посредством улучшения энергетических и экологических показателей.

Актуальность выполнения данной работы также подтверждается федеральным законом от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и заключается в повышении энергетической эффективности оборудования химводоподготовки Волжской ТЭЦ ООО «Тепловая генерация г. Волжского» за счет утилизации сточных вод водоподготовительной системы в трехкорпусной выпарной установке. Целью данной работы является исследование проблемы по снижению объема сточных вод в процессе водоподготовки на Волжской ТЭЦ ООО «Тепловая генерация г. Волжского» в результате внедрения схемы их утилизации в трехкорпусной выпарной установке. В табл. 1 представлены данные по изменению качества шлама водоподготовки в течение года.

Таблица 1

Показатели качества шлама

Месяц	pH		Хлориды, мг/дм^3		Сульфаты, мг/дм^3		Взвешенные вещества, мг/дм^3		Сухой остаток, мг/дм^3	
	ср	min	ср	max	ср	max	ср	max	ср	max
январь	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
февраль	7,11	–	49,5	–	840,0	–	15,0	–	2039,0	–
март	7,90	7,50	144,2	208,6	1125,0	1655	12,7	13,9	2762,0	4097
апрель	8,47	8,00	217,0	224,3	1800,0	1940	21,7	38,2	4002,0	4157
май	7,80	7,40	253,0	303,5	1782,0	2700	33,6	69,2	4813,0	5913
июнь	8,07	5,61	274,0	372,6	2492,0	3160	29,6	58,4	5527,0	6603
июль	8,40	3,68	335,0	631,6	2894,0	5100	38,7	69,4	6725,0	13087
август	6,47	4,00	739,0	1879,0	4513,0	11480	51,6	80,6	14207,0	33361
сентябрь	2,95	2,68	213,0	315,2	1703,0	2780	30,0	44,8	4072,0	5841
октябрь	2,89	2,65	254,0	309,6	1845,0	2280	19,2	33,2	3736,0	5321
ноябрь	3,05	2,85	228,0	255,2	1835,0	2340	14,7	17,8	3332,0	4018
декабрь	3,22	2,95	245,8	269,6	1948,0	2290	15,3	16,8	3632,0	4023
ср.-год.	6,03	–	268,4	–	2070,59	–	25,65	–	4986,09	–

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что среднее солесодержание сточных шламовых вод в сухом остатке составляет 4986,09 мг/м^3. Для утилизации такого количества солей эффективной технологией может являться применение выпарных установок, принцип работы которых заключается в следующем описании. В многокорпусной выпарной установке вторичный пар каждого корпуса, кроме последнего, используется для обогрева следующего корпуса. Давление от корпуса к корпусу уменьшается так, чтобы температура кипения раствора в каждом корпусе была ниже температуры насыщения пара, обогревающего этот корпус [1–3].

Применение многокорпусных выпарных установок дает значительную экономию пара. Если приближенно принять, что с помощью 1 кг греющего пара в однокорпусном аппарате выпаривается 1 кг воды, то в многокорпусной выпарной установке на 1 кг греющего пара, поступившего в первый корпус, приходится количество килограммов выпаренной воды, равное числу корпусов. Расход греющего пара на выпаривание 1 кг воды обратно пропорционален числу корпусов. Вторичный пар, образующийся в каждом корпусе, можно не целиком направлять на обогрев следующего корпуса, а частично отводить на сторону и использовать для предварительного подогрева раствора, поступающего на выпаривание, или для других технологических целей, не связанных с выпариванием.

Отводимый на сторону вторичный пар называется экстра-паром. Экстра-пар может быть отобран из любого корпуса, кроме последнего. Из последнего корпуса не производят отбора экстра-пара, так как вторичный пар оттуда направляется в конденсатор. Если же выпаривание ведется под давлением, вторичный пар можно полностью использовать вне выпарной установки. Преимущество отбора заключается в том, что возрастание расхода греющего пара при

отборе экстра-пара меньше, чем количество отбираемого экстра-пара; целесообразнее отбирать экстра-пар не из первых, а из последующих корпусов [1].

В многокорпусных выпарных установках экономия пара достигается за счет увеличения поверхности теплообмена. Сравним, например, однокорпусную и двухкорпусную установки, работающие при одинаковой температуре греющего пара равной 110 °С и одинаковом вакууме в конденсаторе, соответствующем температуре конденсации вторичного пара 50 °С. В этом случае, пренебрегая температурными потерями, получим для однокорпусной установки температурный напор равный 60 °С. В двухкорпусной установке температура кипения в первом корпусе должна быть выше 50 °С и не ниже 110 °С. Примем ее равной 80° С, так что температурный напор в первом и втором корпусе составит 30 °С.

Тепловая нагрузка каждого корпуса двухкорпусной установки в два раза меньше нагрузки однокорпусной установки, температурный напор в каждом корпусе тоже в два раза меньше. Следовательно, поверхность каждого корпуса будет такой же, как поверхность однокорпусного аппарата. Полная поверхность обоих корпусов двухкорпусной установки будет в два раза больше, чем поверхность однокорпусного аппарата. Обобщая, можно сказать, что поверхность многокорпусной установки больше поверхности однокорпусной в число раз равное количеству корпусов. Если учесть температурные потери, то увеличение поверхности теплообмена многокорпусной установки будет еще больше [1–3].

В рассмотренном варианте температура кипения в первом корпусе была выбрана произвольно, для того чтобы получить равные температурные напоры по корпусам. В действительности температуры кипения по корпусам устанавливаются сами собой в зависимости от поверхности отдельных корпусов и коэффициентов теплопередачи в них. Если, например, в одном из корпусов коэффициент теплопередачи понизится, то поступающий на обогрев этого корпуса вторичный пар из предыдущего корпуса не будет полностью конденсироваться, и давление в предыдущем корпусе повысится, пока не установится новое распределение температур [1].

Таким образом, анализ показывает, что температуры в отдельных корпусах при работе установки не регулируются. Единственной возможностью регулирования этих температур является изменение отбора экстра-пара. При увеличении отбора экстра-пара из какого-либо корпуса количество пара, поступающего на обогрев следующего корпуса, уменьшится, вследствие чего уменьшится и температура. Следовательно, применение выпарных установок является одним из наиболее эффективных способов для утилизации сточных вод ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1983. – 270 с.

2. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике / А.С. Копылов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.

3. Стерман, Л С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов / Л С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.: ил.

УДК 628.16

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБМЕННОЙ ЕМКОСТИ СЛАБОКИСЛОТНОГО КАТИОНИТА

***Косолапова К.С.*[1] – магистрант**
***Гончарова Л.К.*[1] – канд. хим. наук, профессор**
***Емельянов В.С.*[2] – инженер отдела гл. энергетика**
[1]Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском
[2]АО «ВТЗ»

АННОТАЦИЯ. Данная работа посвящена исследованию свойств слабокислотного катионита CYBBER LX-280, который находился в эксплуатации на Камышинской ТЭЦ в Н-фильтрах с «голодной» регенерацией. Экспериментальная часть исследований включала оценку качества катионита после восьми лет эксплуатации, его обработку растворами серной кислоты с контролем состава растворов фильтратов и последующее определение основных показателей качества обработанного катионита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: слабокислотный катионит, CYBBER LX-280, регенерация, регенерант, серная кислота.

Технико-экономические показатели работы водоподготовительных установок ТЭС, осуществляющих обессоливание вод методом ионного обмена, зависят от ряда факторов, и немаловажное значение среди них имеет качество ионообменных материалов.

В процессе эксплуатации иониты загрязняются неорганическими и органическими соединениями, которые не удаляются полностью при регенерации, накапливаются от цикла к циклу и ведут к снижению обменной емкости ионитов, повышению расходов регенерантов и воды на отмывку от регенеранта и последующему снижению фильтроциклов.

Объектом исследования был слабокислотный катионит CYBBER LX-280, производства Cyber Prosper Industrial Ltd (Индия), после эксплуатации в течение восьми лет в Н-фильтрах с «голодной» регенерацией на Камышинской ТЭЦ.

Входной контроль качества катионита при его поступлении на станцию проводился в аккредитованной лаборатории технологии воды филиала МЭИ в г. Волжском.

Основные показатели качества проб катионитов определялись в соответствии с рекомендациями СТО ВТИ 37.002-2005 «Основные требования к применению ионитов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. Технологические рекомендации по диагностике их качества и выбору» по соответствующим ГОСТам:

– ГОСТ 20255.1-89. Иониты. Методы определения статической обменной емкости;

– ГОСТ 10900-84. Иониты. Методы определения гранулометрического состава;

– ГОСТ 10898.1-84. Иониты. Методы определения влаги;

– ГОСТ 10898.4-84. Иониты. Методы определения удельного объема;

– ГОСТ 17338-88. Иониты. Методы определения осмотической стабильности, а определение содержания железа и окисляемость в растворах реагентов и фильтратов после обработки ими катионита проводилось по методикам соответствующих ПНД Ф.

Экспериментальная часть исследований включала оценку качества катионита после восьми лет эксплуатации, его обработку растворами серной кислоты с контролем состава растворов фильтратов и последующее определение основных показателей качества обработанного катионита.

Обработка катионита проводилась путем его регенерации трехкратным количеством серной кислоты, так как при обычной регенерации расход кислоты составляет 1:1, и поэтому катионит от цикла к циклу загрязняется соединениями железа и органическими веществами, которые не удаляются полностью при регенерации.

Регенерация велась ступенчато – с последовательной обработкой катионита растворами сначала 1 %, а затем 5 % H_2SO_4.

При проведении регенерации отбирались растворы регенеранта и отмывочная вода, прошедшие через колонку, и в них определялись содержание железа и окисляемость. Результаты определений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Определение содержания железа и окисляемости в растворах после регенерации катионита слабокислотного Cybber LX-280

Раствор регенеранта, окраска	**Объем раствора, пропущенного через колонку, см^3**	**Содержание железа, снятого с катионита после обработки, мг/дм^3**	**Ох, г O_2/дм^3**
1 % H_2SO_4 (светло-желтый)	300	48	3,16
5 % H_2SO_4 (темно-коричневый)	100	50	3,28
5 % H_2SO_4 (темно-желтый)	350	210	3,36
Отмывочная вода (прозрачная)	300	следы	1,36

Раствор регенеранта после пропускания через катионит 5 % кислоты окрашен в коричневый цвет, что свидетельствует о значительном загрязнении катионита железом, а высокая окисляемость этого раствора – о загрязнении органическими соединениями.

Показатели качества катионита при входном контроле, после длительной эксплуатации и после обработки растворами серной кислоты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные показатели качества проб катионита слабокислотного CYBBER LX 280

Определяемый показатель	Информация фирмы-производителя	Полученные результаты		
		Входной контроль пробы	Проба после эксплуатации	Проба после обработки катионита серной кислотой
Полная статическая обменная емкость, моль/см^3, не менее	4,4	3,25	0,82	2,16
Коэффициент однородности, не более	1,6	1,59 ± 0,43	1,69	1,69
Массовая доля влаги, %	45–55	48,40 ± 2,13	50,05	45
Удельный объем, см^3/г	–	2,48 ± 0,11	2,63	2,94
Осмотическая стабильность, %, не менее	96,0	99,8 ± 7,0	99,9 ± 7,0	99,9 ± 7,0
Внешний вид	Сферические зерна белого цвета, прозрачные	Зерна катионита сферической формы, белого цвета, чистые, без трещин, осколков нет	Зерна катионита сферической формы, желто-коричневого цвета, без трещин, осколков нет	Зерна катионита сферической формы, светло-желтого цвета, без трещин, осколков нет

Как видно из табл. 2, показатели качества катионита при входном контроле соответствуют данным фирмы-производителя. После длительной эксплуатации у катионита резко снизилась полная статическая обменная емкость – с 3,25 до 0,82 моль/см^3, несколько увеличился коэффициент однородности, то есть произошло небольшое измельчение катионита, цвет зерен катионита поменялся с белого цвета на желто-коричневый. Последнее также свидетельствует о том, что катионит загрязнен соединениями железа и органическими веществами.

После регенерации катионита серной кислотой в соотношении 3:1 обменная емкость увеличилась до 2,16 моль/см^3 и изменился цвет зерен катионита, что свидетельствует о том, что восстановление обменной емкости катионита возможно путем его обработки повышенным, сверх стехиометрического, расходом кислоты.

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., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.

2. ПНД Ф 14.1:2.50-96. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации общего железа в природных и сточных водах фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой. – М.: Издательство стандартов, 1996.

3. Федосеев, Б.С. Современное состояние водоподготовительных установок и водно-химических режимов ТЭС / Федосеев Б.С. // Теплотехника. – 2005. – № 7. – С. 2– 9.

УДК 628.16

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СОРБЦИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА ИЗ ВОДЫ НА КАТИОНИТЕ ТОКЕМ-100

Савич С.С. – магистрант
Гончарова Л.К. – канд. хим. наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Данная работа посвящена экспериментальной проверке сорбции железа из вод на модифицированном катионите ТОКЕМ-100 в Na-форме. Модификация проводилась последовательной обработкой катионита растворами $FeCl_3$ и NaOH, а затем через катионит пропускался модельный раствор, содержащий 6 мг/дм^3 Fe^{3+}. Регенерация катионита проводилась растворами лимонной кислоты. Была показана способность модифицированного катионита удалять железо из природных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: катионит ТОКЕМ-100, модификация катионита, модельный раствор, регенерация, лимонная кислота.

Анализ технической и патентной информации показал, что для удаления из вод ионов железа наиболее подходящей является методика, описанная в патенте [1].

По патенту катионит может быть как в H-, так и в Na-форме. Для экспериментов был выбран сильнокислотный Токем-100 в H^+ форме.

Катионит отмывался от мелкодисперсной примеси дистиллированной водой, для набухания замачивался также в дистиллированной воде на 1–2 часа, а затем переносился в колонку (рис. 1), где проводилась его модификация.

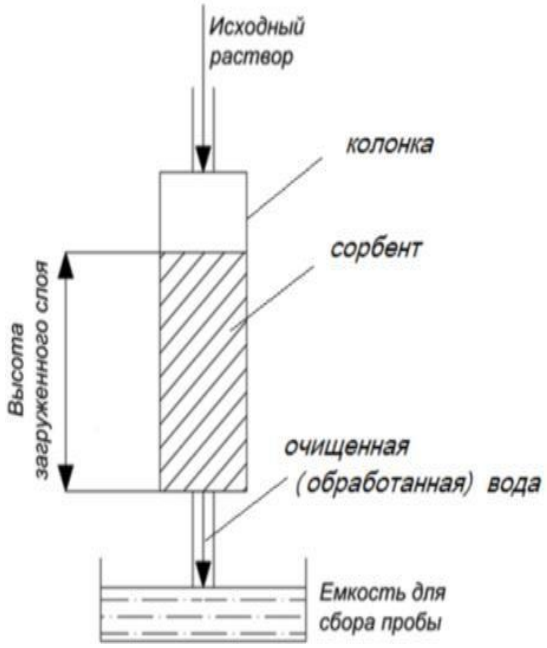

Рис. 1. Схема лабораторной установки

Модификация катионита проводилась следующим образом: в колонку диаметром 3 см загружалось 80 см^3 набухшего катионита, а затем через него пропускали 0,1 н. раствор хлорида железа (III) со скоростью 40 см^3 в минуту до появления в фильтратах колонки ионов железа. После промывки колонки дистиллированной водой через нее пропускался 0,1 н. раствор NaOH с таким же расходом до появления в фильтрате следов щелочи (по индикатору фенолфталеину). После такой обработки верхняя половина катионита в колонке поменяла свой цвет с оранжевого на темно-красный. Затем катионит в колонке промывался дистиллированной водой до нейтральной реакции.

Далее через колонку с модифицированным катионитом пропускали модельный раствор железа (III), приготовленный на водопроводной воде с добавлением 0,1 н. раствора хлорида железа до концентрации железа в нем 3 мг/дм^3. Скорость пропускания модельного раствора была такой же, как при модифицировании катионита.

Появление ионов железа в фильтратах контролировали качественно – по реакции с роданидом калия.

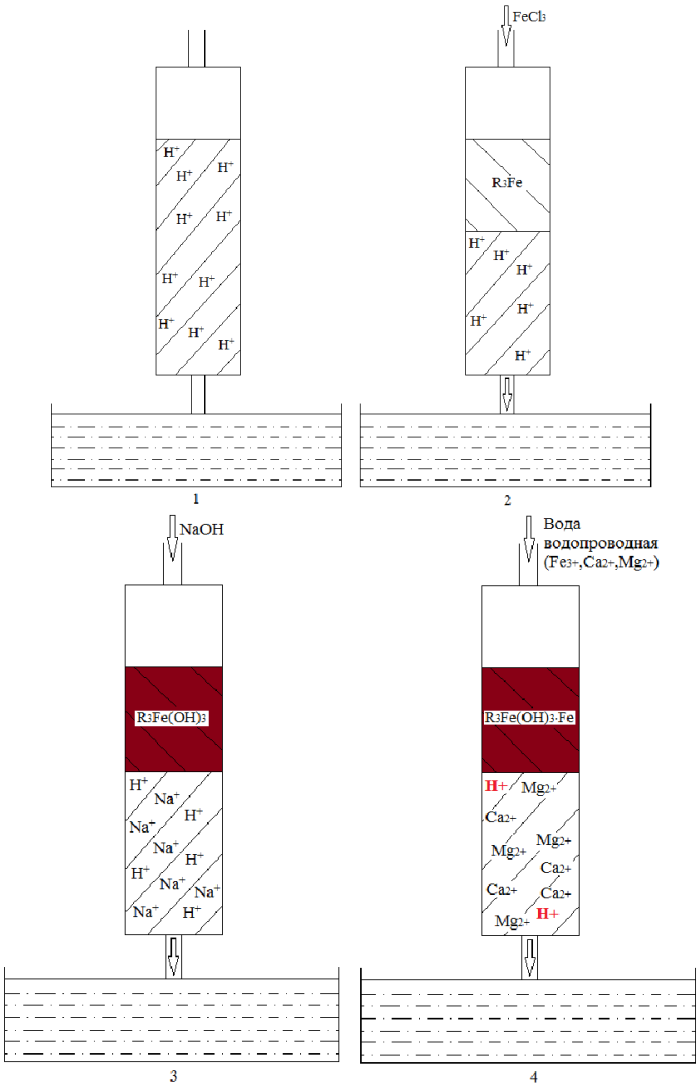

Рис. 2. Процессы на катионите при его модифицировании и работе

Проскок ионов железа в фильтрат начинался после пропускания через колонку 7,5 дм^3 модельного раствора.

Процессы на катионите при модификации представлены на рис. 2. При пропускании через катионит в Н-форме раствора хлорида железа происходил обмен ионов H^+ катионита на ионы Fe^{3+}:

$$\underset{\text{ионит}}{3RH} + \underset{\text{р-р}}{Fe^{3+}} \leftrightarrow \underset{\text{ионит}}{R_3Fe} + \underset{\text{р-р}}{3H^+}$$

При последующей обработке катионита раствором гидроксида натрия ионы железа(III) на катионите гидролизуются до $Fe(OH)_3$:

$$R_3Fe + 3NaOH \leftrightarrow R_3Fe(OH)_3 + 3Na^+.$$

Таким образом, на зернах катионита образуется трудно растворимый $Fe(OH)_3$, то есть происходит модификация катионита. При пропускании через такой модифицированный катионит раствора, содержащего ионы типичных металлов, происходит их сорбция на поверхности частиц $Fe(OH)_3$, но ионы Fe^{3+} сорбируются в первую очередь.

Для регенерации катионита использовался рекомендованный в патенте 5%-ный р-р $NaHCO_3$. При пропускании этого раствора через колонку наблюдалось бурное выделение углекислого газа, катионит был взрыхлен и в растворе на выходе из колонки ионы железа отсутствовали.

Процессы, протекающие на катионите при регенерации, можно представить следующим образом:

$$RH + NaHCO_3 \leftrightarrow R\text{-}Na + CO_2 + H_2O.$$

Так как катионит после обработки раствором $FeCl_3$ остался частично в H^+-форме, то при пропускании регенерационного раствора происходила нейтрализация групп H^+ катионита раствором $NaHCO_3$ с выделением углекислого газа.

Считаем, что желательно проверить методику, пропуская через катионит раствор хлорида железа до полного насыщения катионита ионами железа, а также на сильнокислотном катионите в Na-форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 211117 МПК C02F1/28. «Способ сорбционной очистки воды от железа» / Открытое акционерное общество «Ачинский нефтеперерабатывающий завод «ВНК» Регистрационный номер заявки 97102257; заявл. 02.14.1997; опубл. 20.05.1998.

2. ПНД Ф 14:1:2:4.50-96 «Методика измерений массовой концентрации общего железа в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой».

3. 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.

СЕКЦИЯ № 3

ИННОВАЦИОННЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 621.311

УПРАВЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АИИСКУЭ

Николаева С.И. – канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, г. Волгоград

АННОТАЦИЯ. Рассматривается проблема автоматизации учета потребления электроэнергии. Предложена структура АИИСКУЭ на базе средств учета АО «Электротехнические заводы «Энергомера».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коммерческий учет электроэнергии, АИИСКУЭ, расщепленная архитектура, RF-модуль.

Высокая стоимость энергоресурсов заставляет особо внимательно относиться к вопросам учета электроэнергии. В первую очередь вопрос учета и контроля электроэнергии связан с возможностью выбора наиболее оптимального режима энергопотребления. Следует отметить, что это важно как для поставщика, так и для потребителя электроэнергии. В связи с этим выбор оптимальной системы учета и построения ее структуры позволит управлять процессом потребления электроэнергии и принимать решения о выборе энергосберегающего режима работы [1].

На современном этапе такие задачи решаются с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы (АИИСКУЭ). Современные АИИСКУЭ представляют собой масштабные системы, выполняющие одновременно измерение и учет количества энергии и энергоресурсов различного рода по территориально распределенным точкам учета и работающие в реальном времени с последующей передачей информации по иерархическому уровню.

В настоящее время в энергосистемах России широко внедряются АИИСКУЭ для сбора коммерческих данных со счетчиков электроэнергии, созданных на базе вычислительной техники и оборудования для измерения, сбора и передачи информации [2]. С этой стороны вопроса основными заинтересованными лицами являются распределительные и энергосбытовые компании, для которых вопрос правильного учета отпущенной электроэнергии также является ключевым.

В последние годы наблюдается повышение доли потребления электроэнергии бытовыми потребителями, что занимает большую часть работы энергетических организаций.

Сейчас в основном используется система расчетов с бытовыми потребителями, организованая таким образом, что потребитель в определенные сроки самостоятельно снимает показания расчетного счетчика и предоставляет их в энергосбытовую организацию. Энергосбытовая организация проверяет и обрабатывает счета на оплату. В ее функции входит контроль за своевременную оплату и проверку соответствия показаний по счетам с реальным показанием счетчиков.

Такая система учета имеет много недостатков, основными из которых является невозможность узнать о фактических потерях в распределительных сетях и оценить эффективность работы гарантирующего поставщика. Эту проблему способна решить АИИСКУЭ.

В чем же заключаются преимущества АИИСКУЭ?

1. Появляется возможность регулярного учета электроэнергии для каждого потребителя.

2. Осуществляется контроль над всеми приборами учета в сети.

3. Появляется возможность применения многоставочного тарифа за оплату электроэнергии.

В автоматизированной информационно-измерительной системе учета электрической энергии выделяют три уровня [3], рис. 1.

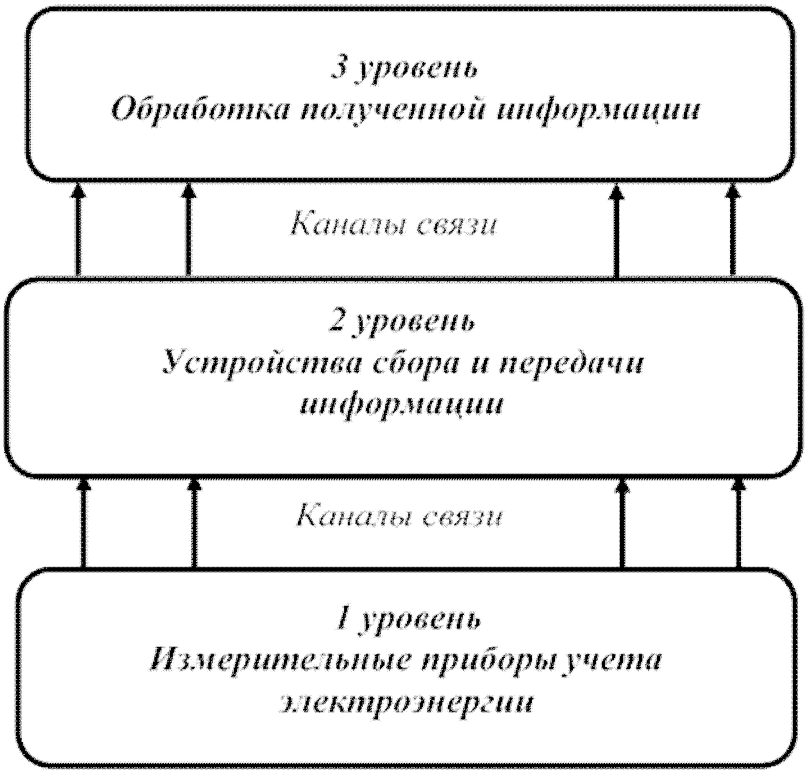

Рис. 1. Структура АИИСКУЭ

Первый уровень составляют интеллектуальные приборы учета электроэнергии с цифровыми выходами, которые обеспечивают измерение параметров потребления электроэнергии в режиме реального времени (непрерывно) в

определенных точках сети. Измеренные параметры попадают на следующий уровень по каналам связи (радиомодем, GSM, Ethernet и др.).

Второй уровень состоит из устройств сбора и передачи информации на верхний уровень.

Третий уровень – это центральный блок сбора и обработки информации, поступающей со всех устройств сбора и передачи, включенных в систему. На этом уровне используется специальное программное обеспечение АИИСКУЭ, позволяющее анализировать полученную информацию и подготавливать отчетную документацию по показаниям.

Для автоматизации процессов, связанных с учетом отпуска и потребления электроэнергии, была рассмотрена возможность и оценена эффективность внедрения АИИСКУЭ в Еланских районных электрических сетях филиала ПАО «МРСК Юга» – «Волгоградэнерго».

Филиал ПАО «МРСК Юга» – «Волгоградэнерго» «Еланский РЭС» является основным предприятием, снабжающим Еланский район электроэнергией. В настоящее время филиал обеспечивает централизованное электроснабжение административных образований Еланского района с общей численностью населения около 30 тысяч человек.

Основу программ по снижению потерь электроэнергии составляют рейды по выявлению хищений электроэнергии, замена устаревших счетчиков у бытовых потребителей, использование нового электротехнического оборудования и другие мероприятия. К сожалению, они не обладают необходимой эффективностью, а конечные затраты на их реализацию превосходят получаемый экономический эффект.

Одним из проблемных участков Еланского РЭС является подстанция ПС 35 кВ «Большевик». Подстанция находится в 54 км от районного центра. Большое расстояние, плохое состояние трассы, соединяющей поселки, усложняют процесс контроля потребления электроэнергии. Общая характеристика потребителей, подключенных к подстанции, приведена в табл.

Описание существующей системы электроснабжения и потребителей на ПС 35кВ «Большевик»

Наименование объекта (фидера – 10 кВ)	Количество и мощность ТП, кВА	Наименование населенного пункта	Количество счетчиков потребителей – физических лиц		Количество счетчиков потребителей – юридических лиц	
			одно-фазные, шт.	трех-фазные, шт.	одно-фазные, шт.	трех-фазные, шт.
ЛЭП № 5 -10кВ, ВЛ-10кВ № 5 1-68	7 КТП общей мощностью 1660 кВА	п. Большевик	187	37	16	22

На данном участке предлагается установить АИИСКУЭ на базе средств учета АО «Электротехнические заводы «Энергомера» (рис. 2).

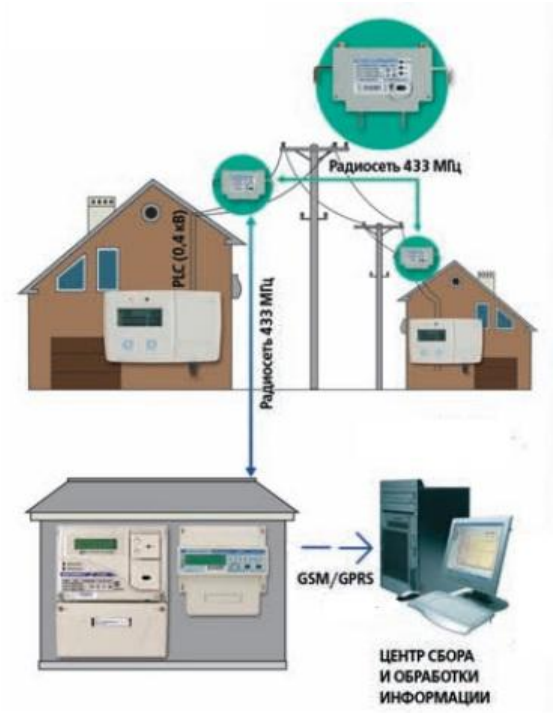

Рис. 2. Схема АИИСКУЭ на базе средств учета
АО «Электротехнические заводы «Энергомера»

Продукция АО «Электротехнические заводы Энергомера» широко представлена на российском рынке. Компания предлагает комплексные решения по автоматизации учета электрической энергии для бытовых потребителей и, кроме того, предоставляет полный перечень услуг по автоматизации учета электроэнергии от проектирования до внедрения систем [4]. Полный перечень функций учета, предлагаемых АИИСКУЭ АО «Электротехнические заводы «Энергомера», включает в себя автоматический сбор данных с приборов учета, хранение параметров учета в базе данных, возможность многотарифного учета, предотвращение несанкционированного потребления электроэнергии, а также возможность удаленного отключения абонента за неуплату/нарушение договора поставки.

К установке приняты приборы учета с расщепленной архитектурой и RF модулем. Особо следует отметить, что приборы учета состоят из измерительного блока, располагаемого на границе балансовой принадлежности и выносного дисплея, выдаваемого потребителю.

Расчет экономической эффективности от внедрения системы АИИСКУЭ на данном участке Еланского РЭС, проведенный в соответствии с отраслевой методикой «Расчет оценки экономического эффекта от внедрения АИИСКУЭ» [5], показал, что внедрение АИИСКУЭ:

– обеспечивает 100%-ный удаленный сбор информации с установленных приборов учета;

– приводит к снижению коммерческих потерь электрической энергии, обусловленных погрешностью устаревших приборов учета;

– приводит к снижению коммерческих потерь электрической энергии в связи с повышенной безотказностью современных приборов учета.

При проведении расчетов экономической эффективности по принятой методике за основу были взяты тарифы на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Волгоградской области [6].

Итоговый экономический эффект от внедрения системы АИИСКУЭ составит от 215 тыс. руб. в год. Данный показатель весьма существенен для сетей рассматриваемого энергорайона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» [Электронный ресурс]. URL: http://base.garant.ru/12184415/#ixzz5cJ509Y4f (дата обращения 15.09.18)

2. Осика, Л.К. Коммерческий и технический учет электрической энергии на оптовом и розничном рынках: Теория и практические рекомендации /Л.К. Осика. – СПб: Политехника, 2006. – 360 с.

3. Ожегов, А.Н. Системы АСКУЭ: учебное пособие /А.Н. Ожегов. – Киров: ВятГУ, 2006. – 102 с.

4. Каталог фирмы АО «Электротехнические заводы «Энергомера» [Электронный ресурс]. – 2001–2019. URL: http://www.energomera.ru/ (дата обращения 20.12.2018).

5. Коссов, В.В. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). Официальное издание / В.В. Коссов, В.Н. Лившиц, А.Г. Шахназаров. – М.: Экономика. 2000. – 421с.

6. Приказ Комитета тарифного регулирования Волгоградской области от 23 декабря 2016 г. № 53/2 «Об установлении тарифов на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Волгоградской области» с 1 января 2017 г. URL: http://urt.volgograd.ru/ (дата обращения 20.12.2018).

УДК 621.316.925

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЛИНИЙ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Янина Д.С., Широбоков Д.Е. – магистранты
Зенина Е.Г. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. Проведен ряд исследований защит для повышения чувствительности на линиях 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 существует ряд разработок, выполненных в Павлодарском индустриальном институте 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 на 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, т. е. 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, $Q_в$, Q_c – выключатели фаз *A*, *B*, *C*; 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. При двухфазных КЗ за трансформатором на выходе элемента СС2 появляется сигнал, что обеспечивает пуск элемента времени В1, который через выдержку времени $t_{лз}$ подают 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.

Для исключения блокирования защиты при работе линии в неполнофазном режиме предусмотрен еще один канал (элементы НЕ, В4, ИЗ).

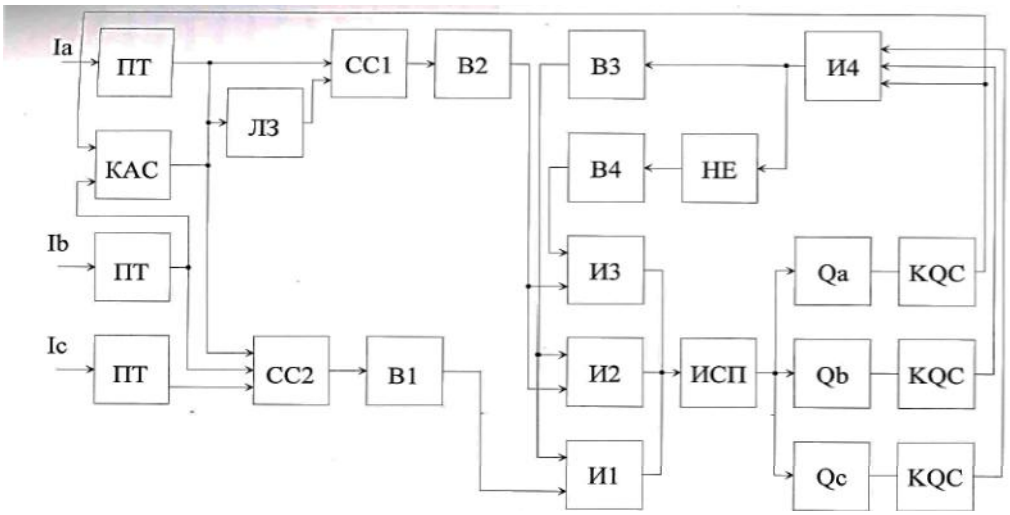

Рис. 1. Структурная схема резервной защиты,
реагирующей на разность модулей токов фаз

Анализ схемотехнических решений показывает, что контроль разностей модулей токов фаз более сложен по сравнению с выполнением контроля токов обратной последовательности.

В работе [2] предлагается также для повышения чувствительности применение защит, реагирующих на приращение токов (реактивных являющих) или самонастраивающихся защит.

Ток срабатывания самонастраивающейся защиты определяется по выражению

$$I_{\text{с.з},i} = \frac{I_{\text{н}g} \sin \varphi_{\text{н}} - I_n \sin \varphi_n + I_{\text{КЗ}} \sin \varphi_{\text{КЗ}}}{K_{\text{ч}}}, \tag{1}$$

где $I_{\text{н}g}$ – ток нагрузок линии в доаварийном режиме; I_n – номинальный ток трансформатора, за которым произошло КЗ; $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания; $\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{п}}$, $\varphi_{\text{кз}}$ – угол нагрузки линии, нагрузки за рассматриваемым трансформатором, короткого замыкания соответственно. Ток срабатывания пускового органа $I_{\text{н},i}$ i-й ступени определяется соотношением

$$I_{\text{н},i} = \frac{K_{\text{ч}}}{K} I_{\text{с.з},i} - I_{\text{отв},1} \sin j_1, \tag{2}$$

где K – коэффициент запаса; $K_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности.

На рис. 2 представлена структурная схема данного устройства, при этом приняты 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 *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.

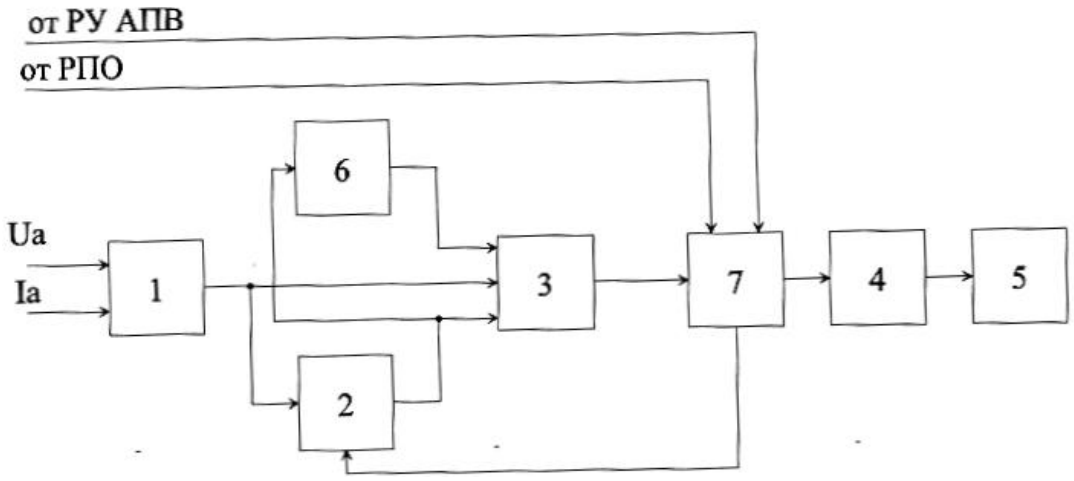

Рис. 2. Структурная схема самонастраивающейся защиты, реагирующей на приращение тока

Применение самонастраивающейся защиты более целесообразно на линиях с незначительной двигательной нагрузкой или малым временем самозапуска. Количество ступеней самонастраивающейся защиты определяется выражением

$$n = \frac{\ln\left(1 - \dfrac{K_{отс} - 1}{I_{k\,\min} - I_{отв\,\min} - K_{отс} I_{отс\,\max}}\right)}{\ln\left(1/K_{отс}\right)}, \qquad (3)$$

где $I_{отв\ \min}$, $I_{отв\ \max}$ – минимальный и максимальный ток нагрузки трансформатора; $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; $I_{k\ \min}$ – минимальный ток короткого замыкания за трансформатором.

$$V_i = \left(T_{Ai} + T_{Bi} + T_{Ci}\right)\left(T_{ni} + D_{li}\right), \qquad (4)$$

где V_i – выходной сигнал i-й ступени защиты; T_{Ai}, T_{Bi}, T_{Ci} – выходные сигналы измерительных органов тока фаз *A*, *B*, *C* соответственно; T_{ni} – выходной сигнал

пускового органа; D_{1i} – выходной сигнал органа выдержки времени пускового органа.

$$Y_з = \left\{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(T_{Ai} + T_{Bi} + T_{Ci}\right)\left(T_{пi} + D_{1i}\right)\right)\right\} D_з Y_{РПВ} D_5, \quad (5)$$

где $D_з$, 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

$$Y_{2i} = \left(T_{Ai} + T_{Bi} + T_{Ci}\right) Z_i Z_{АПВ}, \quad (6)$$

где Z_i, $Z_{АПВ}$ – логические функции ПАМЯТЬ i-й ступени и срабатывания АПВ:

$$Z_i = \left(\overline{T_{ni} D_i} D_{2i} Y_{РПО} + Z_i\right) \overline{T_{ni} D_i + Y_{РПО} D_6},$$

$$Z_{АПВ} = \left(Y_{РПВ} + Y_{АПВ}\right) \overline{Y_{РПВ} D_6},$$

где $Y_{АПВ}$, $Y_{РПО}$ – выходные сигналы срабатывания АПВ и реле положения «отключено» выключателя.

Структурная схема самонастраивающейся защиты дана на рис. 3. На рисунке приняты следующие обозначения: T_{A1}, T_{B1}, T_{C1} – 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; E_n – измерительно-логические блоки n-ступеней защиты.

В нормальном режиме работы ВЛ при увеличении тока нагрузки до уставки первого реле переключения $T_{П1}$ оно срабатывает и через элемент времени $В_{11}$ посылает сигнал на элемент $НЕ_1$, $И1_1$, что обеспечивает формирование блокирующего сигнала первого блока измерений и переход к следующей ступени. С помощью реле переключения $Т_{П1}$–$Т_{Пn}$ обеспечивается переход с одной ступени защиты на другую. При возникновении КЗ сигнал на отключение выключателя Q подается с выдержкой времени $t_з$ (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 $t_6 \geq t_{АПВ} + t_{вкл} + \Delta t$, где $t_{АПВ}$ – время действия АПВ линии; $t_{вкл}$ – время включения выключателя Q; Δt – ступень селективности.

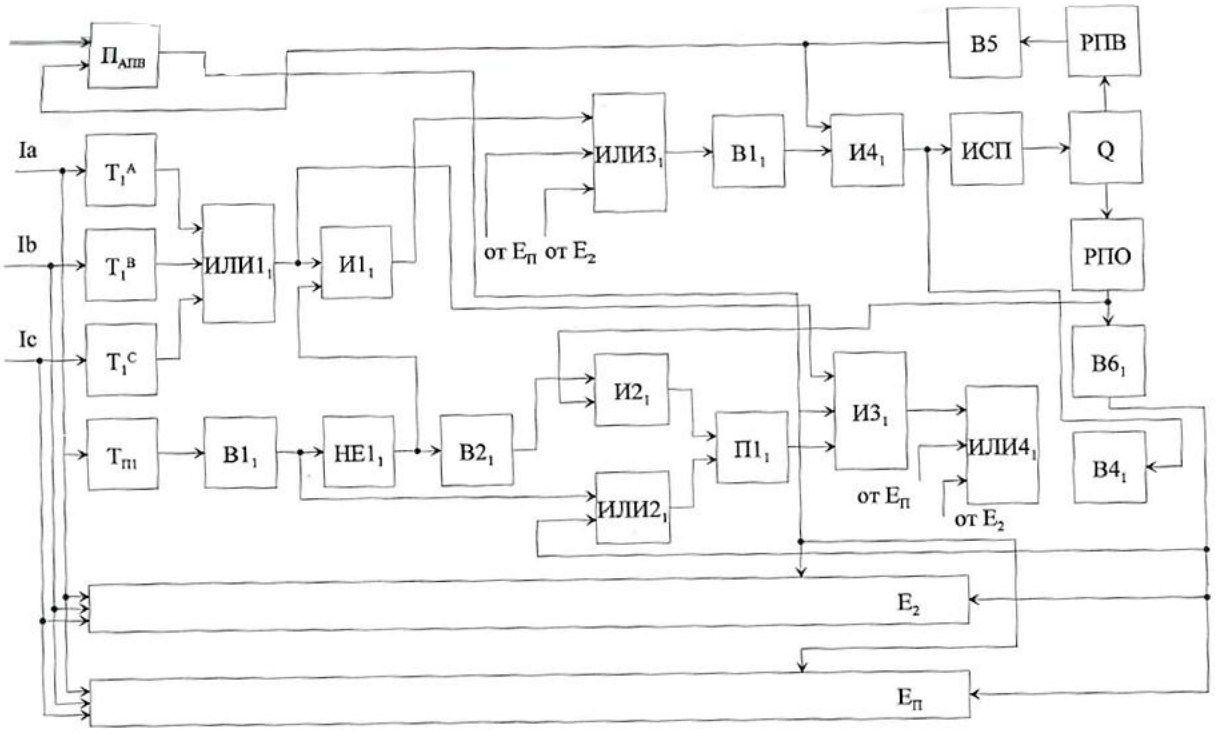

Рис. 3. Функциональная схема адаптивной токовой защиты

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.

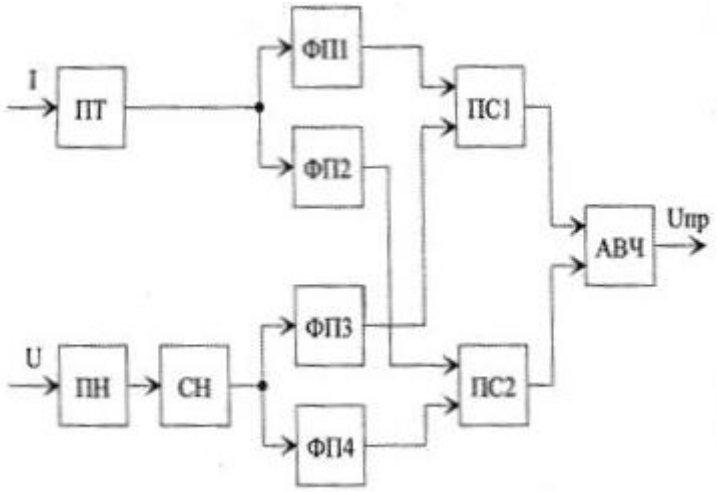

Рис. 4. Структурная схема преобразователя реактивной мощности на измерении приращения реактивного тока

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.

При этом в перемножителях ПС1 и ПС2 выполняются операции:

$$U_{\text{ПС1}} = U_1 U_3 = \\ = U_m U_{\text{СН}} \sin\left(wt + j_1 + \frac{p}{4}\right)\sin\left(wt + \frac{p}{4}\right), \quad (7)$$

$$U_{\text{ПС2}} = U_2 U_4 = \\ = U_m U_{\text{СН}} \sin\left(wt + j_1 - \frac{p}{4}\right)\sin\left(wt + \frac{p}{4}\right), \quad (8)$$

где $U_{\text{СН}} = 1$.

После преобразований можно получить следующие выражения:

$$U_{\text{ПС1}} = \frac{1}{2} I_m U_{\text{СН}}\left(\cos\left(j_1 + \frac{p}{2}\right) - \cos(2wt + j_1)\right), \quad (9)$$

$$U_{\text{ПС2}} = \frac{1}{2} I_m U_{\text{СН}}\left(\cos\left(j_1 - \frac{p}{2}\right) - \cos(2wt + j_1)\right). \quad (10)$$

Выходной сигнал аналогового сумматора получается

$$U_{\text{АВЧ}} = U_{\text{ПС1}} - U_{\text{ПС2}} = I_m \sin\varphi_1. \quad (11)$$

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. – 1992. – № 2. – С. 19–23.
4. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2016.

УДК 621.316.92

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РАСЧЕТА УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Гладков В.А. – студент
Зенина Е.Г. – канд. техн. наук, доцент
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрены современные программные средства расчета уставок релейной РЗиА, которые позволяют повысить надежность результатов и снизить ошибки «человеческого фактора». Произведен сравнительный анализ трех программных комплексов по признакам, которые определяют набор функциональных возможностей, направленных непосредственно на расчет уставок релейной защиты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: релейная защита, программные средства расчета уставок, автоматизация расчета, программный комплекс, короткие замыкания, повреждения в сети.

Релейная защита осуществляет непрерывный контроль над состоянием всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов. При возникновении повреждений релейная защита выявляет поврежденный участок и отключает его от сети.

Правильность срабатывания релейной защиты зависит от выбранных параметров срабатывания, которые в большинстве случаев рассчитываются вручную. При таком способе расчета не исключается возможность ошибки, которая может нарушить требования, предъявляемые к релейной защите. Для того чтобы этого не произошло, в настоящее время разработаны программные средства расчета, которые позволяют не только упростить и значительно ускорить процессы сложных расчетов, но и повысить надежность результатов. Сравнение таких программных средств представлено в табл. 1.

АРМ СРЗА и САРЕ содержат функциональные возможности, которых достаточно и минимально необходимо для расчетов и выбора устройств РЗиА.

Существенное и главное отличие зарубежного средства является применение системного симулятора, который позволяет производить последующее пошаговое моделирование различных повреждений в сети, анализировать поведение защит, устранить неселективную работу защит, что в свою очередь позволяет повысить надежность работы сети. Различие в нормативно-технической документации объясняется тем, что имеется большое количество различных требований, которые предъявляют энергокомпании стран.

Далее рассматривается расчет ступеней дистанционной защиты, а именно как происходит согласование и отстройка в России (на примере АРМ СРЗА) и за рубежом (на примере Cape Electrocon). Сравнение выбора параметров вторых ступеней дистанционной защиты ghbводится в табл. 2.

Исходя из табл. 2, можно сделать вывод, о том, что в России и странах СНГ условие селективности обеспечивается путем выбора срабатывания второй ступени в согласовании с первыми ступенями защиты смежной линии. За рубежом условие селективности второй степени выполняется упрощенно.

Достоинством российского программного средства является детальный и аккуратный выбор параметров срабатывания защиты с учетом всех требований. Недостатком зарубежного программного средства является то, что выбор параметров срабатывания вторых ступеней является упрощенным, из-за этого возможно получение не совсем реальных условий сети (экстремальные режимы работы сети), но данный недостаток покрывается системным симулятором, т. е. пошаговым моделированием сети.

Таблица 1

Сравнение программных средств

Признак сравнения	АРМ СРЗА (БРИЗ)	CAPE (ELECTROCON)
Графическое представление модели	неограниченный объем узлов и связей	сети неограниченного размера
Расчет при повреждениях в сети	при повреждениях любой сложности	при различных множественных повреждениях
Графическое согласование (характеристики защит, карты селективности)	присутствует	присутствует
Модуль расчета уставок дистанционной защиты	присутствует	присутствует
Модуль расчета уставок диф. защиты	отсутствует	присутствует
Расчет параметров линий	*сторонняя разработка	присутствует
Системный симулятор	отсутствует	пошаговое моделирование событий
Анализ срабатывания защит	ТЗНП и ДистЗ	все защиты
Нормативно-техническая документация	указания производителей защит, ПУЭ	IEEE стандарт, NERC PRC стандарты
Встроенная база паспортных данных электрооборудования	присутствует	крупнейшая библиотека в мире
Демоверсия	отсутствует	демоверсия (60 дней)
Последнее обновление	(5.03.2018)	(8.03.2018)
Сотрудничество с энергетическими вузами	отсутствует	возможна установка на базе университета

Таблица 2

Сравнение выбора параметров дистанционной защиты

Номер ступени	Формула и примечание	
	АРМ СРЗА	**CAPE ELECTROCON**
II ступень	Согласование с первой ступенью защиты смежных линий	Максимальный замер при КЗ на шинах противоположной ПС
	$Z_{\text{с.з}}^{\text{II}} \le 0{,}85 \cdot Z_{\text{Л1}} + \frac{0{,}66}{K_{\text{ТЛ}}} \cdot Z_{\text{Л1}}$; $Z_{\text{с.з}}^{\text{II}} \le 0{,}85 \cdot Z_{\text{Л1}} + \frac{0{,}78}{K_{\text{ТЛ}}} \cdot Z_{\text{с.з2}}^{\text{I}}$, где $K_{\text{ТЛ}}$ – коэффициент токораспределения; $Z_{\text{Л1}}$ – сопротивление защищаемой линии	$\max\begin{cases} Z_{\text{с.з}}^{\text{II}} \le (1{,}2-1{,}5) \cdot Z_{L1\max}; \\ Z_{\text{с.з}}^{\text{II}} \le Z_{L1\max} + (0{,}2-0{,}5) \cdot Z_{L1\min}, \end{cases}$ где $Z_{L1\max}$ – сопротивление защищаемой линии в максимальном режиме; $Z_{L1\min}$ – сопротивление самой короткой линии из отходящих от шин противоположной ПС
	Отстройка от КЗ на шинах НН или СН ПС	Условие допустимости
	$Z_{\text{с.з}}^{\text{II}} \le 0{,}85 \cdot (Z_{\text{Л1}} + \frac{Z_{\text{Т}}}{K_{\text{Т.ТР}}})$, где $K_{\text{Т.ТР}}$ – коэффициент токораспределения	$Z_{\text{с.з}}^{\text{II}} \le Z_{L1} + 0{,}5 \cdot Z_{\text{экв Т(АТ)}}$ условие допустимой зоны охвата смежного Т (АТ) второй ступенью (50 %)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов, Ю.А. Релейная защита и автоматика электрических систем. Расчет релейной защиты объектов электроэнергетической системы: учебное пособие / Ю.А. Ершов, О.П. Халезина. – Красноярск: КГТУ, 2012. – 126 с.

2. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК. – 2012. – 350 с.

3. АРМ СРЗА: [Электронный ресурс]. – М., 2008–2018. URL: http://www.pk-briz.ru/. (Дата обращения: 18.05.2018).

4. CAPE ELECTROCON: [Электронный ресурс]. – М., 2013–2018, URL: www.electrocon.com/. (Дата обращения: 18.05.2018).

СОДЕРЖАНИЕ

Секция № 1

Электроэнергетика и гидроэнергетика

Николаева С.И. Влияние параметров управляемых реакторов на предел мощности электропередачи по динамической устойчивости...…… 3
Широбоков Д.Е., Янина Д.С., Султанов М.М. Анализ методик прогнозирования отказов электрооборудования ЛЭС……..……..... 8
Гринченко М.В., Зенина Е.Г. Повышение надежности электроснабжения в распределительных сетях…… 14
Кирносов М.С., Гомазков Д.С., Курбалева А.Э., Жилина В.И. Анализ ресурсов компании ПАО «РусГидро»……...……... 17
Петровский А.А., Стрижиченко А.В. Применение изоляционных труб «Протекторфлекс» для прокладки силовых кабельных линий..……..…...…... 22
Дадалян А.А., Зенина Е.Г. Сравнение методик измерения величины наведенного напряжения в России и за рубежом……...…… 25
Асосков Р.И., Кущ Л.Р. Работа устройств частотно регулируемых приводов в условиях возникновения однофазных коротких замыканий в сети 110 кВ или понижения напряжения в сети собственных нужд электростанции...…... 28
Капля Е.В. Математическая модель переходных процессов гидравлической турбины с идентификацией параметров по экспериментальным данным разгона ……..……..…… 31
Хаванский Н.Г., Жилина В.И. Оценка качества основных элементов насосного оборудования Волжской ГЭС ПАО «РусГидро»……..... 36
Ткачев С.В., Курьянов В.Н. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии в параллельной работе с энергосистемой……..... 43
Наумов А.В., Курьянов В.Н. Разработка мероприятий по снижению технических потерь на линии 10 кВ……..……..……..... 51

Секция № 2

Теплоэнергетика, энергетические системы и экология

Пивченко А.В., Рогалев Н.Д. Исследование процессов в генераторе водорода непрерывного действия применительно к модели идеального смешивания……..……..…….. 57
Паначевный В.М., Терентьев Г.Ф. Результаты экспериментального и численного исследования тепломассообмена и гидродинамики в водородных парогенераторах...…….…. 62
Паначевный В.М., Терентьев Г.Ф. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена в вихревой камере сгорания лабораторной модели водородного парогенератора…….. 65
Мирошников В.В., Иваницкий М.С. Сравнительные расчеты тепловых схем с сепарацией для турбоустановки с влажно-паровой турбиной...…… 69

Ремизов А.И., Колебошина Е.Н., Кульков В.Г. Проблема шумового загрязнения и методы борьбы с ним…… 73
Терентьев Г.Ф., Султанов М.М., Курьянова Е.В., Буров В.Д. Направление развития оборудования водородно-кислородного топливоснабжения и парогенерации в водородной энергетике……..…… 77
Курьянова Е.В., Терентьев Г.Ф. Теоретическая модель вихревого водородно-кислородного парогенератора…… 85
Терентьев Г.Ф., Султанов М.М., Курьянова Е.В., Буров В.Д. Автономная мини-ТЭЦ на водородно-кислородном топливе……... 93
Дорофеев Ю.Н., Спиридонов Д.А., Одоевцева М.В. Мониторинг загрязнений мембранных элементов установки обратного осмоса промышленной водоподготовки…… 99
Смирнов С.П., Кулькова В.В. Развитие зернограничной трещины в системе «лопатка – защитное напыление» в процессе эксплуатации.....…….. 103
Лебедев В.В., Кулькова В.В. Исследование процессов трещинообразования в материале барабанов котлов……... 107
Мельникова А.А., Мельников Д.Ю., Иваницкий М.С. Обобщение результатов оценки эффективности работы электрических аппаратов системы газоочистки……..… 111
Алеев А.С., Гусева Ю.В. Анализ применения технологии термической очистки сточных вод тепловых электрических станций……..... 117
Косолапова К.С., Емельянов В.С., Гончарова Л.К. Изучение условий восстановления обменной емкости слабокислотного катионита…...…….. 120
Савич С.С., Гончарова Л.К. Экспериментальная проверка сорбции ионов железа из воды на катионите Токем-100……...……... 123

Секция № 3

Инновационные и цифровые технологии в электроэнергетике

Николаева С.И. Управление потреблением электроэнергии на основе использования АИИСКУЭ…….……..... 126
Янина Д.С., Широбоков Д.Е., Зенина Е.Г. Анализ технических решений выполнения релейной защиты для линий дальнего резервирования на воздушных линиях с ответвлениями…...……. 131
Гладков В.А., Зенина Е.Г. Современные программные средства расчета уставок релейной защиты и автоматики в России и за рубежом……..... 137