

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОСТИ ТЕКСТОВОГО НАБОРА РУССКОЯЗЫЧНЫХ ТЕКСТОВ

В статье рассматривается программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций по показателю уровень яркости (0–255) с использованием инструментария программы для создания и обработки растровой графики Photoshop. Рассматривается возможность модернизации метода, обеспечивающей универсализацию его использования относительно русскоязычных текстов, и вопросы разработки соответствующего тест-объекта.

Ключевые слова: текстовый набор, насыщенность текстового набора, программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций, универсальный тест-объект.

Одним из важнейших показателей, определяющих привлекательность внешнего облика страницы печатной или электронной публикации и удобочитаемость размещенного на ней текста, является контраст. Практика показывает, что публикации с высоким контрастом воспринимаются во всех отношениях лучше малоконтрастных.

Контраст графического образа страницы текстового документа определяется наличием и соотношением на странице белого (фон, поля), серого (основной текст) и черного (заголовки, выделения жирным шрифтом, графические элементы и изображения) пространств (при использовании цветовых решений — светлого, среднего по светлоте и темного). Поскольку основного текста на странице всегда больше, серое пространство является самым значительным фактором, определяющим контраст публикации.

Текст (текстовый набор) создаёт на странице определённый оттенок серого цвета, называемый также в русскоязычной типографике «цветом шрифта» («цветом набора»). Указанный оттенок серого цвета зависит не только от насыщенности используемого шрифта (тонкий, светлый, книжный, нормальный, средний, полужирный, жирный, тёмный, чёрный, сверхжирный), но и от параметров текстового набора (кегель, интерлиньяж, величина трекинга). Для описания оттенка серого цвета, создаваемого текстовым набором, введено понятие «насыщенность текстового набора» [1].

Насыщенность текстового набора не может быть измерена приборно, поскольку оттенок серого цвета, создаваемый блоком текста, как параметр применим только к значительной площади (порядка кв. дм; для сравнения апертура фотометра имеет порядок кв. мм).

В Омском государственном техническом университете был разработан программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций с использованием инструментария программы для обработки изображений Adobe Photoshop [1–4], а совместно с коллегами из Белорусского государственного технологического университета — основанный на вышеуказанном методе способ определения степени заполнения полосы набора текстом [5, 6].

Сущность метода заключается в оценке оттенка серого цвета, создаваемого текстовым набором, посредством показателя «уровень яркости» (0–255), определяемого с помощью инструмента «Гистограмма» в программе для обработки изображений Photoshop. В импортированном в программу изображении страницы текста выделяют произвольную прямоугольную область площадью не менее 100 000 пикселей и, используя фильтр «Размытие» — «Среднее», осуществляют размытие выделенной области, в результате чего она приобретает однородный по площади оттенок серого цвета. После этого считывают значение уровня яркости («Среднее»).

На основании проведенных исследований был разработан способ определения контраста графического образа полосы набора [7, 8].

Контраст графического образа страницы печатных и электронных публикаций определяется как $K = H_{om} - H_z$, где K — контраст страницы публикации; H_{om} — насыщенность текстового набора основного текста (единицы уровня яркости — ед. ур. ярк.); H_z — насыщенность текстового набора заголовка (ед. ур. ярк.).

Зная конкретные числовые значения, можно на основе объективных данных добиваться

требуемого контраста при оформлении печатных публикаций.

Целью данного исследования является модернизация метода определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций, обеспечивающая универсализацию его использования относительно русскоязычных текстов.

Первым этапом реализации метода являются определение базовых требований к тексту и параметры его набора, а также подготовка текстового тест-объекта в прикладной программе. С целью обеспечения однородности составляющих текст символов выбирают сплошной (без выделений) текст на одном языке (русском) на общую тему (без использования специальных символов). Текст набирается исследуемым шрифтом с заданными кеглем, интерлиньяжем и трекингом (для обеспечения однородности межсимвольных пробелов) с выключкой влево (для обеспечения однородности межсловных

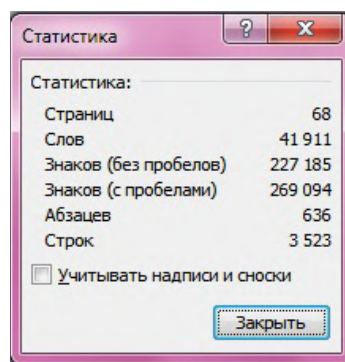


Рис. 1. Окно инструмента «Статистика», содержащее информацию о количестве символов в тексте с учетом и без учета межсловного пробела

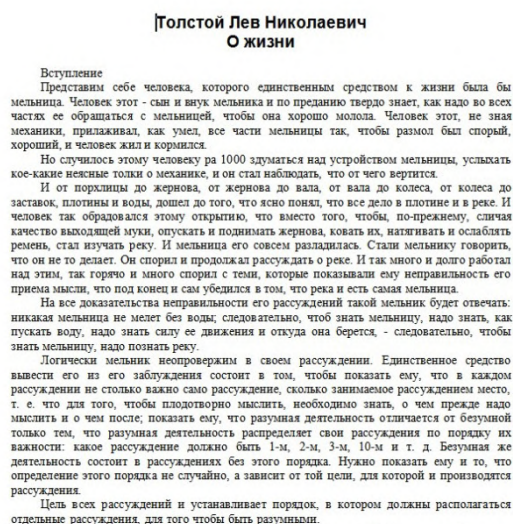


Рис. 2. Окно инструмента «Найти и заменить» с выбранной для замены буквой «а»

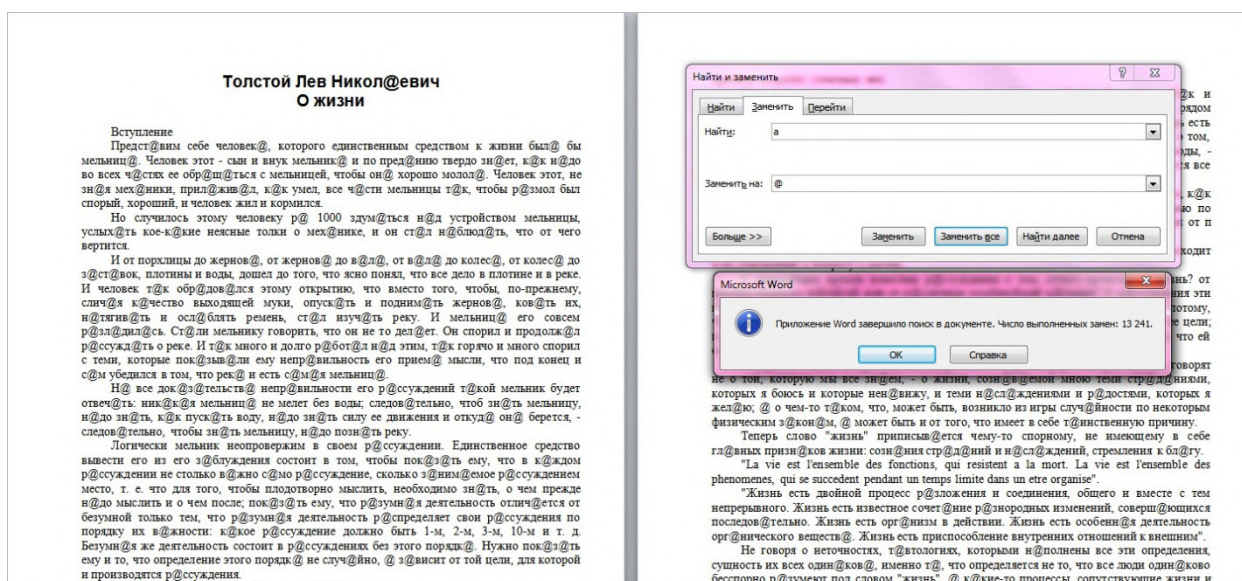


Рис. 3. Всплывающее окно (нижнее) с указанием количества символов «а»

пробелов) с программным делением на строки и без переносов в последних словах строк, без деления на абзацы (для обеспечения однородности заполнения строк текстом).

Недостатком в данном случае является использование выбираемых для исследования русскоязычных текстов, посимвольное содержание которых является различным. Модернизацией метода являлось бы использование текстового тест-образца, содержащего такие количества символов русскоязычного текста, включая межсловные пробелы, которые соответствовали бы частоте их встречаемости. Это позволит сделать метод универсальным и избавит от необходимости выбирать в качестве образцов конкретные тексты для исследования.

Для реализации проблемы универсализации требуется определить частоту встречаемости символов в составе русскоязычных текстов на общую тему и среднестатистическую длину русского слова —

для определения частоты встречаемости межсловных пробелов.

Определение частоты встречаемости символов в русскоязычных текстах на общую тему. Определение общего количества и количества отдельных символов производится с использованием программы для набора текстов Microsoft Word.

Для обеспечения статистической достоверности выбираются не менее пяти русскоязычных произведений на общую тему с общим содержанием символов не менее 1 млн.

Отбор производится по параметрам: длина произведения свыше 100 тыс. символов, отсутствие или малое количество диалогов в тексте, отсутствие стихотворений.

Для исследования выбираются строчные и прописные символы русского алфавита (66 символов), а также наиболее часто встречающиеся знаки препинания: точка, запятая, дефис и межсловный пробел.

Таблица 1

Средняя частота встречаемости символов в русскоязычных текстах на общую тему

Символ	Произведения*					Суммарное количество символов	Средняя частота встречаемости символа
	1	2	3	4	5		
1	2	3	4	5	6	7	8
а	13206	13686	9997	21281	15722	73892	0,06143
б	3627	2886	2360	4053	3545	16471	0,01369
в	9888	5949	5157	9714	9336	40044	0,03329
г	3734	2657	2443	4676	4047	17557	0,01460
д	5929	4588	4080	7281	6708	28586	0,02376
е	22080	11795	10430	19524	19353	83182	0,06915
ё	6	5	1	1	2	15	0,00001
ж	3894	1483	1303	2531	2238	11449	0,00952
з	4541	2633	1948	4079	3101	16302	0,01355
и	17184	10594	8048	19186	15078	70090	0,05827
й	1955	1587	1379	2572	2281	9774	0,00813
к	5520	6833	4218	9429	7407	33407	0,02777
л	8043	8746	6545	11325	9549	44208	0,03675
м	7261	4223	4252	6730	6988	29454	0,02449
н	16011	8650	7909	15161	13796	61527	0,05115
о	25007	15906	13852	26661	26379	107805	0,08962
п	3851	4376	3275	6057	5746	23305	0,01937
р	7225	6890	5171	10689	9421	39396	0,03275
с	11560	7796	6625	11714	11702	49397	0,04106
т	16013	8572	7178	14576	13515	59854	0,04976
у	5402	5282	3854	6927	5559	27024	0,02247
ф	81	227	11	346	232	897	0,00075
х	1585	1473	1082	1955	2389	8484	0,00705
ц	261	418	359	857	707	2602	0,00216
ч	4236	2146	1909	4127	3288	15706	0,01306
ш	1167	1507	1046	2265	1505	7490	0,00623
щ	1294	603	515	805	765	3982	0,00331
ъ	56	40	15	72	73	256	0,00021
ы	3118	2899	3006	4249	4053	17325	0,01440
ь	4113	3394	2781	4673	4000	18961	0,01576
э	766	257	262	440	825	2550	0,00212
ю	2145	865	576	1345	1624	6555	0,00545
я	5296	3338	2711	4524	4090	19959	0,01659
.	1630	2501	1839	4071	2025	12066	0,01003
,	5782	3790	3537	6881	5321	25311	0,02104
—	528	409	300	587	357	2181	0,00181
пробел	41909	29956	25701	47660	41079	186305	0,15488

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
А	35	171	187	383	209	985	0,00082
Б	29	121	40	219	56	465	0,00039
В	154	321	245	666	224	1610	0,00134
Г	49	82	36	554	90	811	0,00067
Д	65	261	72	302	164	864	0,00072
Е	88	43	54	121	53	359	0,00030
Ё	0	0	0	0	0	0	0,00000
Ж	79	22	9	67	20	197	0,00016
З	34	93	44	117	53	341	0,00028
И	187	849	219	558	226	2039	0,00170
Й	0	0	1	394	1	396	0,00033
К	56	148	248	223	124	799	0,00066
Л	75	138	56	443	58	770	0,00064
М	58	234	200	716	122	1330	0,00111
Н	204	387	259	483	359	1692	0,00141
О	89	328	340	388	226	1371	0,00114
П	95	264	205	76	278	918	0,00076
Р	58	152	80	520	48	858	0,00071
С	110	297	154	246	213	1020	0,00085
Т	141	283	225	141	155	945	0,00079
У	22	97	45	45	45	254	0,00021
Ф	1	28	0	40	64	133	0,00011
Х	17	49	18	11	26	121	0,00010
Ц	5	3	0	127	4	139	0,00012
Ч	99	69	28	52	46	294	0,00024
Ш	3	34	8	1	56	102	0,00008
Щ	0	4	0	0	2	6	0,00000
Ъ	0	0	0	0	0	0	0,00000
Ы	0	0	0	0	0	0	0,00000
Ь	0	0	0	0	0	0	0,00000
Э	33	41	140	108	77	399	0,00033
Ю	0	0	1	6	0	7	0,00000
Я	32	42	34	110	76	294	0,00024
Суммарное количество знаков в произведении	269094	195791	159923	307005	271111	1202924	0,9917
						Суммарное количество знаков в пяти произведениях	Средняя сумма частот встречаемости

*Примечание. Здесь и в табл. 2 использованы данные, полученные при исследовании следующих произведений:

- 1 — Л. Н. Толстой, рассказ «О жизни»;
- 2 — В. П. Астафьев, повесть «Перевал»;
- 3 — Ч. Айтматов, повесть «Пегий пес, бегущий краем моря»;
- 4 — Ю. В. Трифонов, роман «Исчезновение»;
- 5 — Н. С. Лесков, очерк «Мелочи архиерейской жизни».

На первом этапе проводится определение общего количества $N_{\text{общ}}$ символов, содержащихся в выбранном тексте с помощью инструмента «Статистика» (рис. 1).

Количество каждого конкретного символа определяется с применением инструмента «Замена», с помощью которого последовательно выполняется замена каждого символа на гарантированно незадействованный в тексте символ «@» (рис. 2). Во всплывающем окне инструмента отображается количество произведенных замен, т. е. количество N_i данного символа в составе текста (рис. 3). Количество межсловных пробелов определяется в диалоговом окне инструмента «Статистика» (рис. 1).

Частота встречаемости P_i символа рассчитывается: $P_i = N_i / N_{\text{общ}}$, где P_i — частота встречаемости

i -го символа, N_i — количество i -го символа в составе текста, $N_{\text{общ}}$ — количество символов во всем тексте.

Результаты исследования частоты встречаемости символов представлены в табл. 1.

Определение длины слов в русскоязычных текстах на общую тему. После всех проведенных замен весь текст состоит из символов «@», разделенных межсловными пробелами, т. е. из слов различной длины, каждое из которых состоит только из символов «@» (рис. 4). (Помимо этого в тексте крайне редко встречаются также и символы, не задействованные в исследовании, например, цифры и тире, но их общее количество (0,0073, табл. 1) настолько мало, что не влияет на достоверность полученных результатов.)



Таблица 2

Суммарное количество слов различной длины,
содержащихся в текстах пяти выбранных произведений,
и их средняя длина

Количество букв в слове	Количество слов различной длины в произведениях*					Суммарное количество слов
	1	2	3	4	5	
1	5046	3199	2798	5147	5111	21301
2	4375	3287	2964	4955	4879	20460
3	5113	2689	2890	4753	4852	20297
4	3547	2527	2509	4071	3384	16038
5	5053	3886	3615	5547	4449	22550
6	4683	4114	3191	5635	4187	21810
7	3242	3392	2461	5239	3894	18228
8	3214	2576	1784	4027	3422	15023
9	2564	1911	1246	2669	2397	10787
10	1782	1170	895	1873	1745	7465
11	1209	750	605	1277	1255	5096
12	875	395	395	792	924	3381
13	596	185	196	479	498	1954
14	345	96	142	224	299	1106
15	97	43	45	95	191	471
16	70	20	13	60	74	237
17	25	14	10	32	41	122
18	10	9	0	21	22	62
19	7	2	3	8	21	41
20	4	3	2	5	21	35
21	1	—	1	2	11	15
22	—	1	1	4	1	7
23	1	—	1	3	1	6
24	—	—	—	1	2	3
25	—	—	—	—	—	—
26	—	—	—	—	1	1
27	—	1	—	—	—	1
Сумма букв	41859	30270	25767	46919	41682	186497
Средняя длина слова	5,394	5,404	5,180	5,445	5,418	5,368

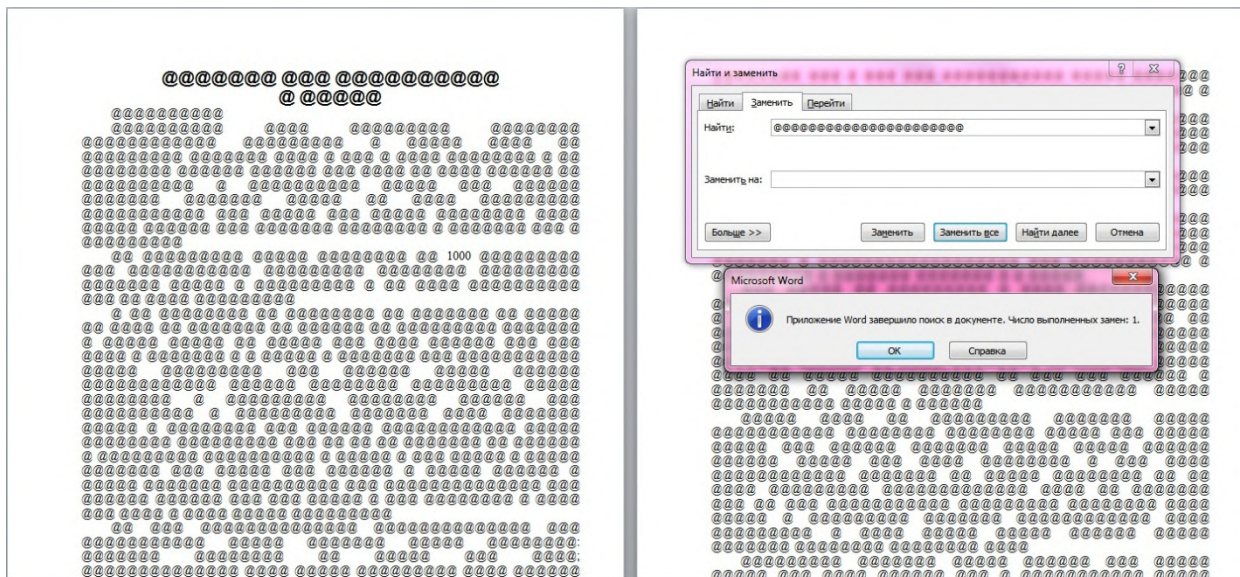


Рис. 5. Всплывающее окно с указанием количества слов с длиной в 30 символов («@»)

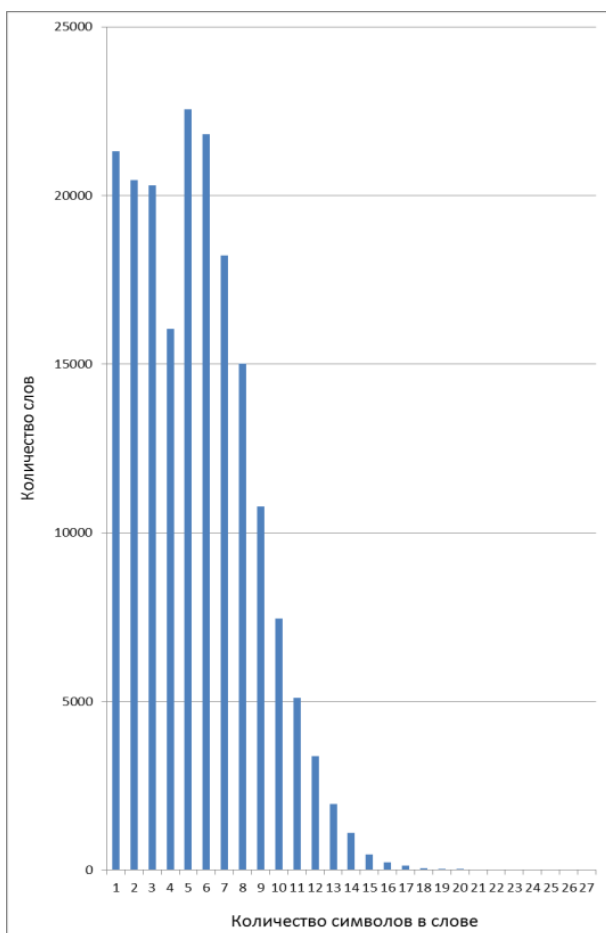


Рис. 6. Диаграмма, отражающая содержание количества слов различной длины в текстах пяти выбранных произведений (см. примечание к табл. 1)

Для определения количества слов определенной длины снова используется инструмент «Замена», но в данном случае производится замена целых слов на единичный пробел введением поискового запроса: «Заменить «@...«@» на межсловный пробел».

Замена производится с учетом того, что исследование необходимо начинать со слов наибольшей длины — с наибольшим количеством символов

«@» в своем составе, в противном случае исследуемый текст начнет видоизменяться по составу n -символьных слов. В результате пилотных исследований было установлено, что наибольшая длина слова составляет 30 символов, поэтому вначале выполняется замена 30-символьных слов на пробел, количество найденных слов отображается во всплывающем окне инструмента «Замена» (рис. 5). Затем производится определение количества 29-символьных, 28-символьных слов и т. д.

Результаты исследования длины слов в русскоязычных текстах на общую тему представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Таким образом получены данные для составления универсального текстового тест-образца, содержащего такие количества символов русскоязычного текста, включая межсловные пробелы, которые соответствовали бы реальной частоте их встречаемости.

Модернизированный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций приобрел универсальность использования относительно русскоязычных текстов.

Библиографический список

1. Сысуев, И. А. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора электронных публикаций / И. А. Сысуев // Динамика систем, механизмов, машин : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск : ОмГТУ, 2009. — С. 327–330.
2. Григорова, Ю. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных публикаций / Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : ОмГТУ, 2010. — С. 54–58.
3. Воробьева, А. С. Насыщенность текстового набора электронных публикаций / А. С. Воробьева, И. А. Сысуев // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : ОмГТУ, 2010. — С. 39–45.
4. Воробьева, А. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных

и электронных публикаций / А. С. Воробьева, Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск. — 2010. — № 2 (90). — С. 228–231.

5. Пат. 17388 Белоруссия, МПК G 01 D 21/00. Способ определения степени заполнения полосы набора текстом / Косова М. М., Зильбергейт М. А., Токарь О. В., Сысуев И. А., Григорова Ю. С., Тимошенко О. А.; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технолог. ун-т. № а 20110681; заявл. 17.05.2011; опубл. 30.08.2013. — 3 с.

6. Пат. 17390 Белоруссия, МПК G 01 D 21/00. Способ определения степени заполнения полосы набора текстом / Косова М. М., Зильбергейт М. А., Токарь О. В., Сысуев И. А., Григорова Ю. С., Тимошенко О. А.; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технолог. ун-т. № а 20110943; заявл. 07.07.2011; опубл. 30.08.2013. — 3 с.

7. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко, Ю. С. Григорова // Динамика систем, механизмов, машин : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск : ОмГТУ, 2012. — Кн. 1. — С. 282–285.

8. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных и электронных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко, Ю. С. Григорова //

Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск. — 2013. — № 2 (120). — С. 328–331.

9. Сысуев, И. А. Модернизация метода определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций / И. А. Сысуев, Е. А. Державина, И. В. Пруд // Инновационные решения при реструктуризации логистических систем : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск, 2014. — С. 44–48.

СЫСУЕВ Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

ПРУД Ирина Валерьевна, ассистент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства», магистрант гр. ТПП-514 факультета элитного образования и магистратуры.

ДЕРЖАВИНА Екатерина Александровна, магистрант гр. ТПП-514 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: sia1960@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2014 г.

© И. А. Сысуев, И. В. Пруд, Е. А. Державина

УДК 655.3.03

**И. А. СЫСУЕВ
И. В. ПРУД
Е. А. ДЕРЖАВИНА
О. Е. СЕРДЮК
В. В. СКИТЧЕНКО**

**Омский государственный
технический университет**

ВЛИЯНИЕ ЦВЕТА БУМАГИ НА НАСЫЩЕННОСТЬ ТЕКСТОВОГО НАБОРА И КОНТРАСТ ГРАФИЧЕСКОГО ОБРАЗА СТРАНИЦЫ ПЕЧАТНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к созданию привлекательного и удобочитаемого внешнего графического облика страницы печатных публикаций. Оценка графического образа страницы производится по одному из существенных параметров — контрасту. Приводится усовершенствованный программно-инструментальный метод оценки насыщенности текстового набора печатных публикаций, позволяющий учитывать цвет подложки (бумаги). Показано изменение контраста графического образа страницы при использовании цветной бумаги.

Ключевые слова: графический образ страницы, печатные публикации, контраст, насыщенность текстового набора, метод оценки насыщенности текстового набора печатных публикаций.

Возможности современной печатной техники и разнообразие запечатываемых материалов позволяют реализовать различные дизайнерские решения.

При работе с цветными подложками специалисту необходимо подобрать оптимальное соот-

ношение начертаний шрифта, кегля, интерлиньяжа и величины трекинга, так как от этого зависит насыщенность текстового набора и, как следствие, контраст и качество восприятия.

На сегодняшний день оценка типографического оформления текста на цветной бумаге (подложке)

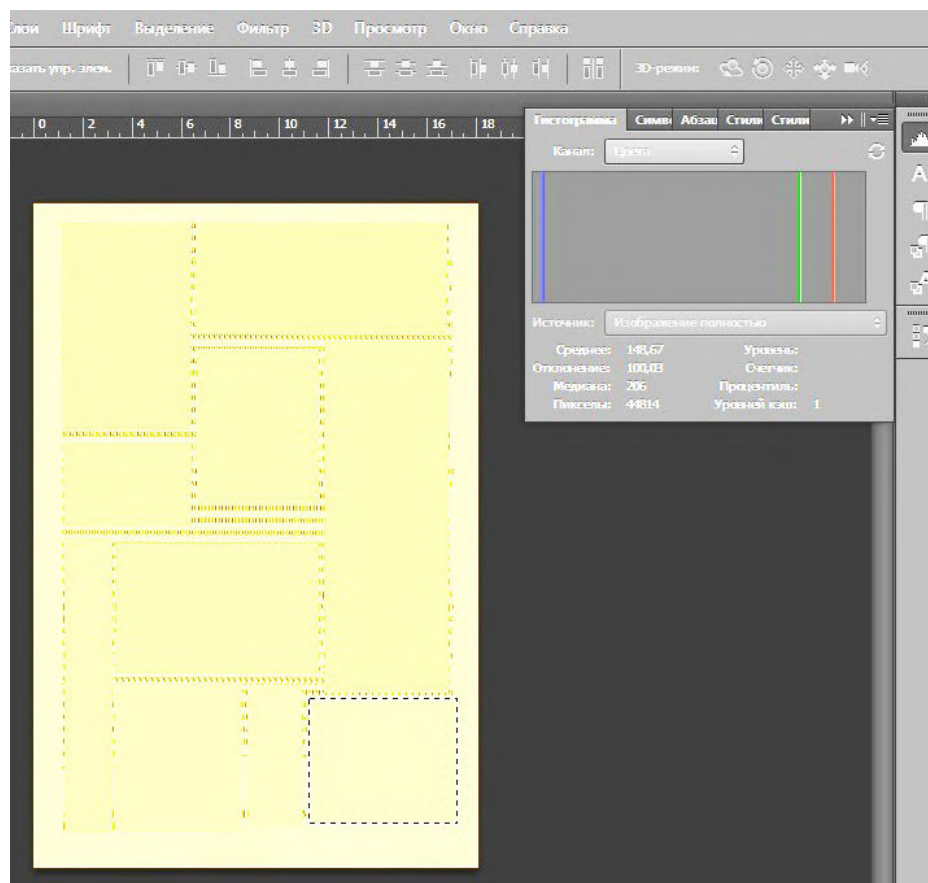


Рис. 1. Размытие прямоугольных областей размером не менее 100 000 пикселей

проводится визуально и субъективно. Зачастую можно встретить малоконтрастные публикации.

Цель исследований заключалась в изучении влияния цвета бумаги (подложки) на насыщенность текстового набора и контраст графического образа страницы печатных публикаций. Оценка производилась с использованием программно-инструментального метода определения насыщенности текстового набора.

Сущность метода определения насыщенности заключалась в оценке оттенка серого цвета, создаваемого текстовым набором, посредством показателя «уровень яркости» (0–255), определяемого с помощью инструмента «Гистограмма» в программе для обработки изображений Adobe Photoshop [1–6]. Усовершенствование метода заключается в сканировании печатного текста не в 8-битовом режиме (256 оттенков серого цвета), а в 24-битовом режиме с использованием цветовой модели RGB. Метод определения насыщенности текстового набора, отпечатанного на цветной подложке, включает в себя последовательность нижеприведенных операций:

1. Набор текста в прикладной программе.
2. Распечатка текста на лазерном принтере с разрешением 1200 точек на дюйм с параметрами печати по умолчанию [1–3].
3. Сканирование текста с разрешением 300 выборок на дюйм [4] в 24-битовом режиме (цветовая модель RGB).
4. Импорт отсканированного изображения в формате TIFF в программу для обработки изображений Adobe Photoshop.
5. Определение показателей оценки насыщенности текстового набора.

Для определения параметра «уровень яркости» выделяют на странице текста произволь-

ную прямоугольную область площадью не менее 100 000 пикселей (контроль размера осуществляется по показателю «Пиксели» в окне «Гистограмма») и, используя фильтр «Размытие» — «Среднее», осуществляют размытие выделенной области, в результате чего она приобретает однородный по площади оттенок цвета подложки. Значение уровня яркости («Среднее») считывали в окне «Гистограмма» — канал RGB (цвета) (рис. 1).

Для обеспечения статистической достоверности определяемых значений показателей измерения повторялись 10 раз, всякий раз выбиралась новая произвольная область.

Среднее арифметическое значение результатов измерений H_{cp} рассчитывали: $H_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$, где n — количество измерений; H_i — результат i -го измерения, а среднеквадратичное отклонение S_H :

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{cp} - H_i)^2}{n \times (n - 1)}}.$$

Для исследования был выбран сплошной (без выделений) текст на русском языке на общую тему (без использования специальных символов). Текст набирался шрифтом гарнитуры Таймс прямого светлого и полужирного начертаний с заданными кеглем и интерлиньяжем (10/11, 10/12 — как основной текст и 14/14,5, 14/15 — как заголовочный) и трекингом (для обеспечения однородности межсимвольных пробелов) с выключкой влево (для обеспечения однородности межсловных пробелов) с программным делением на строки и без переносов в последних словах строк, без деления на абзацы (для обеспечения однородности заполнения строк

**Насыщенность текстового набора с различными параметрами,
отпечатанного на подложках разных цветов**

№ п/п	Гарнитура	Начертание	Кегль	Интер- линьяж	Подложка	Насыщенность текстового набора, усл. ед.
1	Таймс	Прямое светлое	10	11	Белая	227,01±0,11
2	Таймс	Прямое светлое	10	11	Желтая	144,02±0,23
3	Таймс	Прямое светлое	10	12	Белая	228,06±0,16
4	Таймс	Прямое светлое	10	12	Желтая	145,36±0,14
5	Таймс	Прямое полужирное	14	14,5	Белая	217,03±0,22
6	Таймс	Прямое полужирное	14	14,5	Желтая	138,39±0,18
7	Таймс	Прямое полужирное	14	15	Белая	218,08±0,22
8	Таймс	Прямое полужирное	14	15	Желтая	138,73±0,17

текстом). Набранный текст распечатывался (п. 2) на белой бумаге «Снегурочка» и желтой бумаге Maestro Color Pastell YE23 (yellow — желтая) массой 80 г/м². Полученные результаты приведены в табл. 1.

Контраст определяли согласно [7, 8].

На основании расчетных данных было установлено, что насыщенность текстового набора при использовании желтой подложки снижается на 74–76 единиц по сравнению с белой бумагой (табл. 1).

Из этого следует, что при работе с цветными подложками для получения требуемых значений контраста [7–9] необходимо увеличивать насыщенность текстового набора за счет изменения кегля шрифта, интерлиньяжа и начертания.

Библиографический список

1. Сысуев, И. А. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора электронных публикаций / И. А. Сысуев // Динамика систем, механизмов, машин : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск : ОмГТУ, 2009. — С. 327–330.
2. Григорова, Ю. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных публикаций / Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : ОмГТУ, 2010. — С. 54–58.
3. Воробьева, А. С. Насыщенность текстового набора электронных публикаций / А. С. Воробьева, И. А. Сысуев // Полиграфия: технология, оборудование, материалы : материалы заоч. науч.-практ. конф. с междунар. участием. — Омск : ОмГТУ, 2010. — С. 39–45.
4. Воробьева, А. С. Программно-инструментальный метод определения насыщенности текстового набора печатных и электронных публикаций / А. С. Воробьева, Ю. С. Григорова, О. А. Зырянова, И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск. — 2010. — № 2 (90). — С. 228–231.
5. Пат. 17388 Белоруссия, МПК G 01 D 21/00. Способ определения степени заполнения полосы набора текстом / Косова М. М., Зильберглейт М. А., Токарь О. В., Сысуев И. А., Григорова Ю. С., Тимошенко О. А. ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технолог. ун-т. № а 20110681 ; заявл. 17.05.2011 ; опубл. 30.08.2013. — 3 с.

6. Пат. 17390 Белоруссия, МПК G 01 D 21/00. Способ определения степени заполнения полосы набора текстом / Косова М. М., Зильберглейт М. А., Токарь О. В., Сысуев И. А., Григорова Ю. С., Тимошенко О. А. ; заявитель и патентообладатель Белорус. гос. технолог. ун-т. № а 20110943 ; заявл. 07.07.2011 ; опубл. 30.08.2013. — 3 с.

7. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко, Ю. С. Григорова // Динамика систем, механизмов, машин : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск : ОмГТУ, 2012. — Кн. 1. — С. 282–285.

8. Сысуев, И. А. Определение оптимального контраста графического образа страницы печатных и электронных публикаций / И. А. Сысуев, О. А. Тимошенко, Ю. С. Григорова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск. — 2013. — № 2 (120). — С. 328–331.

9. Сысуев, И. А. Исследование влияния цвета бумаги на насыщенность графического образа страницы печатных публикаций / И. А. Сысуев, Е. А. Державина, И. В. Пруд // Инновационные решения при реструктуризации логистических систем : матер. заоч. науч.-практ. конф. с между. участием. — Омск, 2014. — С. 49–52.

СЫСУЕВ Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства».

ПРУД Ирина Валерьевна, ассистент кафедры «Оборудование и технологии полиграфического производства», магистрант гр. ТПП-514 факультета элитного образования и магистратуры.

ДЕРЖАВИНА Екатерина Александровна, магистрант гр. ТПП-514 факультета элитного образования и магистратуры.

СЕРДЮК Ольга Евгеньевна, студентка гр. ТП-312 нефтехимического института.

СКИТЧЕНКО Виктория Викторовна, студентка гр. ТП-312 нефтехимического института.

Адрес для переписки: sia1960@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2014 г.

© И. А. Сысуев, И. В. Пруд, Е. А. Державина, О. Е. Сердюк, В. В. Скитченко

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОБЛАСТИ НЕПОЛНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ КРАСКИ В КРАСОЧНОМ ЯЩИКЕ ОФСЕТНОЙ МАШИНЫ

Проведен натурный эксперимент по определению квазитвердого тела, которое образуется в красочном ящике офсетной машины вследствие тиксотропности печатной краски. В основу эксперимента положено измерение температуры в красочном ящике. Определена зона течения краски с областью, вращающейся, как квазитвердое тело.

Ключевые слова: квазитвердое тело, красочный ящик, перемешивание краски, печатная краска.

Обоснование эксперимента. Качество оттиска при печати офсетным способом во многом зависит от работы красочного аппарата. Одним из условий получения стабильной печати является стабильная подача краски питающей группой красочного аппарата.

Перемешивание краски в ящике технологически необходимо [1]. Для того чтобы дукторный цилиндр выводил из ящика краску, она должна прилипать к его поверхности и силами вязкого трения постоянно перемешиваться в ящике. Нарушение перемешивания краски приводит к неравномерному поступлению ее в раскатную группу [2, 3].

Печатная краска обладает тиксотропией, то есть в состоянии покоя в ней образуется внутренняя структура, обладающая механической прочностью, для разрушения которой требуется некоторое механическое напряжение, называемое предельным напряжением сдвига [4, 5].

Рассматривая движение краски в плоскости, перпендикулярной оси дукторного цилиндра (рис. 1), можно увидеть, что часть краски образует циркуляционное течение. В области течения краски, где скорость близка к нулю (поз. 4 рис. 1), часть краски может вращаться без смещения соседних слоев, а касательные напряжения вокруг оси вращения меньше предельного напряжения сдвига. Можно предположить, что в этой области образуется внутренняя структура, обладающая механической прочностью. При этом часть краски вращается без перемешивания, как твердое тело. Эту область течения называют квазитвердым телом [6, 7]. В результате не вся краска участвует в перемешивании, что негативно сказывается на стабильности подачи краски питающей группой в раскатную группу красочного аппарата.

Негативное влияние неполного перемешивания заключается в следующем. При перемешивании краски, которое происходит за счет сил вязкого трения, происходит выделение тепла. Наиболее эффективна в данном случае конвективная передача тепла, то есть за счет перемешивания краски. Но, поскольку квазитвердое тело вращается без

перемешивания, эффективность передачи тепла снижается. В результате тепло хуже отводится от зоны интенсивного перемешивания, которая расположена в области, прилегающей к дукторному цилиндру. Это приводит к повышению температуры и снижению вязкости краски. Повышение температуры и образование квазитвердого тела требуют некоторого времени, в течение которого подача краски в раскатную группу нестабильна [8].

Ранее был проведен вычислительный эксперимент [9], который подтвердил высказанное предположение. При вращении дукторного цилиндра в краске образуется область, в которой сдвиговые напряжения меньше предельного напряжения сдвига. Проведенные вычисления позволили определить геометрические параметры квазитвердого тела, такие как его диаметр, координаты центра вращения, а также зависимость диаметра и координат центра вращения от вязкости и объема краски. В частности, было обнаружено, что диаметр квазитвердого тела зависит незначительно от объема краски (не более 20 %).

Это позволяет сделать вывод о том, что квазитвердое тело негативно влияет на стабильность подачи краски не только на стадии установления режима печати, но и в ее процессе, так как объем краски в красочном ящике меняется непрерывно во время работы машины.

Описание эксперимента. В данной работе была предпринята попытка определения наличия квазитвердого тела в красочном ящике печатной машины. Наиболее наглядным способом этого является измерение скорости движения краски и построение поля скоростей области течения. Однако из-за малых размеров области течения, малых скоростей и высокой вязкости измеряемой жидкости в настоящее время это является сложной инженерной задачей. В связи с этим нами был проведен натурный эксперимент, который опосредованно мог бы доказать наличие квазитвердого тела. В качестве измеряемой величины использовали температуру краски в красочном ящике. При вращении дукторного цилиндра происходит нагревание краски

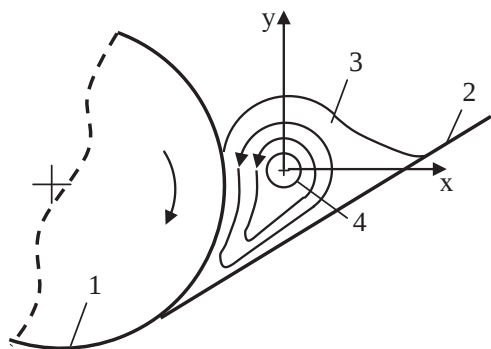


Рис. 1. Течение краски в красочном ящике в плоскости, перпендикулярной оси вращения дукторного цилиндра:
1 — дукторный цилиндр; 2 — рапель;
3 — краска; 4 — квазитвердое тело

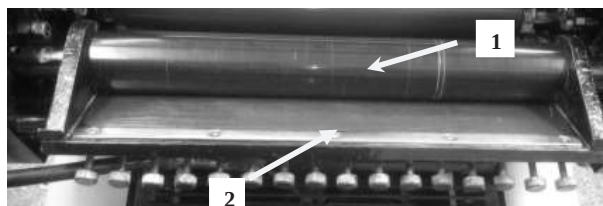


Рис. 2. Красочный аппарат печатной машины Gronhi 1800 YK:
1 — дукторный цилиндр; 2 — рапель



Рис. 3. Внешний вид ИТП-11;
внешний вид хром-алюминиевой термопары

за счет сил вязкого трения. Температура повышается в области, прилегающей к дукторному цилиндру, и уменьшается в остальной части краски. Поскольку квазитвердое тело вращается без перемешивания, то его нагрев осуществляется от периферии к центру до некоторой, равновесной для данного течения, температуры. Далее температура стабилизируется и в каждом сечении, перпендикулярном оси квазитвердого тела, температура распределена равномерно.

Натурный эксперимент проводился в красочном аппарате печатной машины Gronhi 1800 YK (рис. 2).

Для изменения температуры краски в красочном ящике использовали измеритель температуры ИТП-11 (Россия), который позволяет сохранять результаты измерений во внутренней энергонезависимой памяти и передавать их для дальнейшей обработки в ЭВМ (рис. 3).

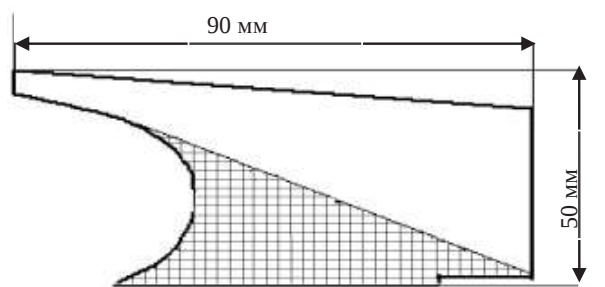


Рис. 4. Схема детали для ограничения количества краски в красочном аппарате

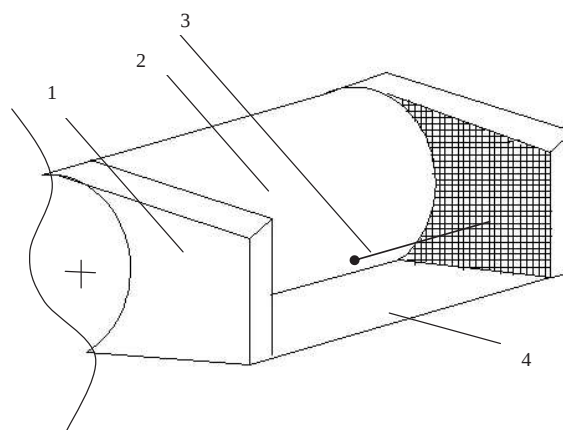


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:
1 — боковая стенка; 2 — дукторный цилиндр;
3 — датчик; 4 — рапель

Прибор работает с термопарами по ГОСТ Р 8.585-2001.

Исходя из геометрических размеров красочного аппарата были выполнены две боковые стенки, которые, в целях экономии, ограничивали длину красочного ящика. Материал стенки был выбран исходя из его минимальной теплопроводности. Для этого использовали пенополистирол толщиной 20 мм. В стенке выполнили отверстия, через которые в краску поочередно вводили термодатчик. Отверстия располагали с шагом 1 мм. Схема боковой стенки представлена на рис. 4.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 5.

Заполнение красочного ящика составляло 70 % (в соответствии с одним из вариантов расчета при проведении вычислительного эксперимента). Вес краски составлял 116 г.

Далее включали машину, проводили измерение температуры. Для более быстрого выхода на режим измерения проводили при скорости вращения дукторного цилиндра 4 об/с. Опыт заканчивали, когда температура достигала постоянного значения. Датчик температуры устанавливали на оси квазитвердого тела, расположение которого определяли по результатам вычислительного эксперимента. Каждое измерение проводили после остывания краски до комнатной температуры (18 °С). Для измерения использовали наиболее употребимые краски: металлизированную краску фирмы Skyey Lion Silver, триадную голубую фирмы Quickson, смешанную красную фирмы PANTON 208.

График изменения температуры
металлизированной краски

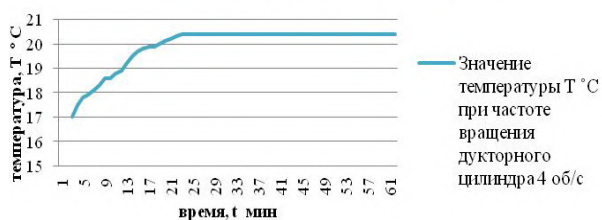


Рис. 6. График изменения температуры металлизированной краски в красочном ящике при вращении дукторного цилиндра со скоростью 4 об/с

График изменения температуры
триадной голубой краски

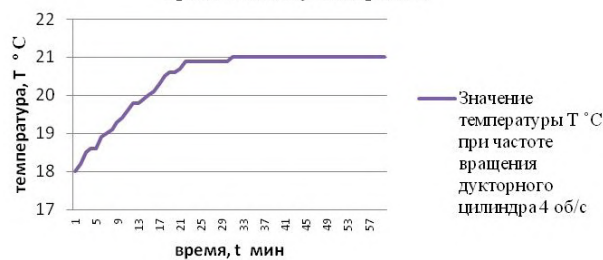


Рис. 7. График изменения температуры триадной голубой краски в красочном ящике при вращении дукторного цилиндра со скоростью 4 об/с

График изменения температуры смесевой
красной (Pantone) краски

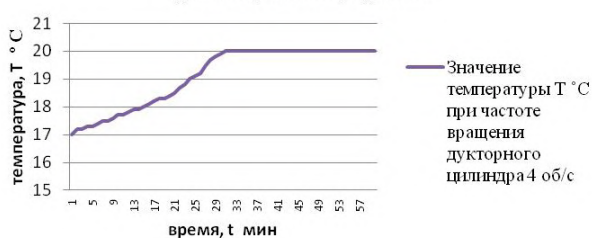


Рис. 8. График изменения температуры смесевой красной (Pantone) краски в красочном ящике при вращении дукторного цилиндра со скоростью 4 об/с

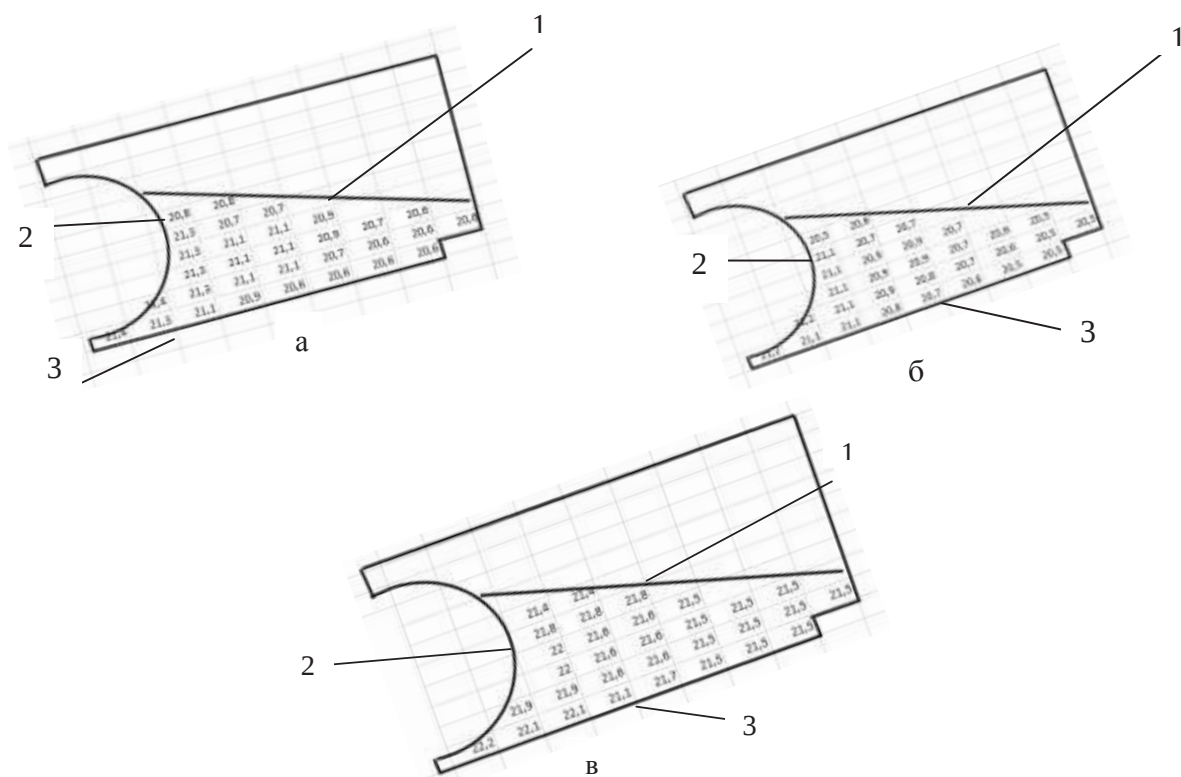


Рис. 9. Распределение температуры:
1 — линия, условно показывающая границу краски;
2 — дукторный цилиндр; 3 — рапель;
а — металлизированная краска;
б — триадная голубая краска;
в — смесевая красная краска

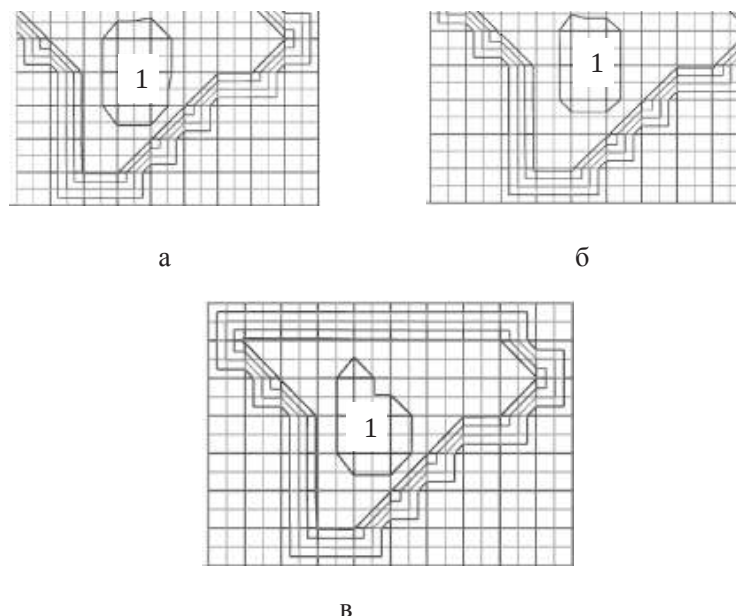


Рис. 10. Зона течения краски с областью, вращающейся, как квазитвердое тело:
1 — участок течения, в котором касательные напряжения меньше предельного напряжения сдвига;
а — металлизированная краска; б — триадная голубая краска;
в — смесевая красная краска (Panton)

Результаты, обсуждение, выводы. Изменения температуры испытуемых красок при вращения дукторного цилиндра со скоростью 4 об/с показаны на рис. 6–8. Результаты опытов по определению распределения температуры в плоскости, перпендикулярной оси квазитвердого тела, показаны на рис. 9. Из рисунка видно, что в каждом варианте течения существует область, в которой температура распределена равномерно. Данные обработаны в программе Excel, поэтому пропорции зоны течения не сохранены.

Для наглядности были построены изотермы в области течения (рис. 10а, 10б, 10в), которые соответствуют рис. 9а, 9б, 9в.

Согласно полученным результатам, можно сделать следующие **выводы**:

1. Температура печатной краски в красочном ящике в процессе работы печатной машины увеличивалась с течением времени до определенного значения, а затем стабилизировалась. При скорости вращения дукторного цилиндра 4 об/с время стабилизации температуры составило: для металлизированной краски 23 мин, для триадной голубой — 31 мин, для смесевой красной — 31 мин.

2. Распределение температуры в сечении, перпендикулярном оси квазитвердого тела, для каждой испытуемой краски показало наличие области с одинаковой температурой, расположение которой совпало с расположением квазитвердого тела, определенного с помощью вычислительного эксперимента.

3. Полученные результаты подтверждают гипотезу о существовании квазитвердого тела в печатной краске, находящейся в красочном ящике, при работе печатной машины.

Библиографический список

1. Технология печатных процессов [Текст] / А. Н. Раскин [и др.]. — М. : Книга, 1989. — 432 с.
2. Тюрин, А. А. Печатные машины / А. А. Тюрин. — М. : Книга, 1966. — 460 с.

3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М. : Дрофа, 2003. — 679 с.

4. Литунов, С. Н. К вопросу о перемешивании краски в красочном ящике печатной машины [Текст] / С. Н. Литунов, О. А. Тимошенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2013. — № 6. — С. 23–29.

5. Литунов, С. Н. О влиянии касательных напряжений на перемешивание краски [Текст] / С. Н. Литунов, О. А. Тимошенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 3 (133). — С. 246–250.

6. Куликов, Г. Б. Обзор автоматизированных систем функциональной диагностики современного печатного оборудования [Текст] / Г. Б. Куликов, В. И. Бобров // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. — 2012. — № 2. — С. 40–45.

7. Материаловедческие аспекты полиграфического производства [Текст] / О. В. Кузовлева [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2013. — № 3. — С. 167–173.

8. Литунов, С. Н. О перемешивании краски в красочном ящике [Текст] / С. Н. Литунов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 318–320.

9. Литунов, С. Н. Определение размеров квазитвердого тела печатной краски [Текст] / С. Н. Литунов, О. А. Тимошенко // Известия Тульского государственного университета. Методы и средства исследования функционирования полиграфического оборудования. — 2014. — № 7. — С. 233–243.

10. Литунов, С. Н. Моделирование течения краски с пассивным активатором в красочном аппарате печатной машины [Текст] / С. Н. Литунов, О. А. Тимошенко, Е. Н. Гусак // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 1 (127). — С. 215–219.

ТОЩАКОВА Юлия Дмитриевна, аспирантка кафедры оборудования и технологии полиграфического производства.

Адрес для переписки: toschakova.julia@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2015 г.

© Ю. Д. Тошаклова

ВЫБОР СХЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВС И ОЦЕНКА ПОЛЕЗНОГО ТЕПЛОИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Показана актуальность использования в малой энергетике когенерационных установок. Сформулированы их преимущества как технологические, так и технико-экономические. Выполнен технологический анализ наиболее распространенных схем утилизации отработавших газов поршневых ДВС, позволяющий более обоснованно принять схемное решение на первичном этапе проектирования установки когенерации и принятия технического решения. Приведена методика оценки использования тепла отработавших газов газопоршневой установки при различных условиях.

Ключевые слова: когенерация, газопоршневая установка, теплота, теплоснабжение, утилизация, комбинированное производство энергии.

В октябре 2013 года в Омске, в научном центре Сибирского отделения РАН, прошел научный семинар на тему «Перевод котельных на процесс когенерации». На нем выступили ученые с докладами о модернизации омской муниципальной теплоэнергетики [1]. Когенерация — это комбинированный процесс одновременного производства тепла и электроэнергии одним устройством. Когенераторы эффективно используют первичный источник энергии (обычно это дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), конвертированный для работы на газовом топливе) и электрогенератор, которые предназначены для получения двух форм энергии — электрической и тепловой. Такие установки обладают рядом особенностей: дешевой электрической и тепловой энергией, близостью к потребителю, отсутствием необходимости в дорогостоящих линиях электропередач и подстанции, экологической безопасностью и др.

Вложения в когенерационные установки экономически целесообразны, т. к. проект быстро окупится, а стоимость получаемой суммарной энергии ниже рыночной более чем в два раза. Сейчас в Омске и области на когенерацию переведены и переводятся, а также строятся котельные ряда промышленных предприятий [1].

В техническом отношении когенерация представляет собой процесс, при котором тепло и электричество вырабатываются одновременно в одной установке (чаще газопоршневой электростанции). Таким образом, когенерация представляет собой оптимальный способ обеспечения потребителей тепловой и электрической энергией. Принцип коге-

нерации лежит в основе различных современных технических и схемных решений.

Основой конструкции газопоршневой электростанции (ГПЭ) является газопоршневой двигатель внутреннего сгорания и электрический генератор. Двигатели (чаще всего дизели) могут применяться в установках, предназначенных как для постоянных, так и для переменных условий работы.

Конструкция поршневого двигателя внутреннего сгорания на базе дизеля, работающего на газовом топливе, менее подвержена износу за счет отсутствия в газообразном топливе абразивных частиц. Особенно это проявляется на малых нагрузках и холостом ходу.

Когенерационная газопоршневая станция (тепловая установка когенератора) способна обеспечить теплом и электроэнергией жилой дом или промышленное предприятие — в зависимости от их технических характеристик (потребности). При наличии газовой магистрали когенератор может осуществлять бесперебойную подачу электроэнергии. Себестоимость электроэнергии будет ниже тарифа в сети.

Преимуществами газопоршневых электростанций являются простота в использовании и, пока, невысокая стоимость газового топлива. В районах с магистральным газопроводом газопоршневая электростанция выступает в качестве самого экономичного постоянного или резервного источника энергии.

Когенерационные установки вырабатывают два типа энергии: электрической в виде переменного трехфазного тока с частотой 50 Гц, тепловой в виде

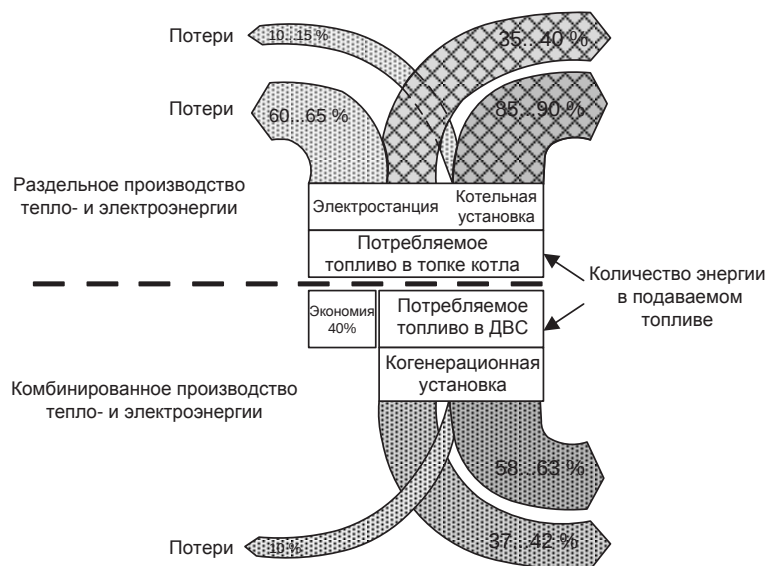


Рис. 1. Распределение статей теплового баланса при раздельном и комбинированном производстве энергии

горячей воды или пара. Коэффициент полезного использования топлива (природного газа) в когенерационных установках может достигать в зависимости от конструкции основного и вспомогательного оборудования — 92 %. Тепловая энергия, которая выбрасывается поршневым ДВС в атмосферу с выхлопными газами, в когенерационных установках утилизируется (в котле-утилизаторе) и направляется на нужды потребителя.

Использование принципа когенерации позволяет потребителю стать независимым от перебоев в снабжении электроэнергией или ее недостатка при одновременном автономном теплообеспечении. С учетом постоянной тенденции ежегодного роста стоимости электрической энергии, применение когенератора дает значительный экономический эффект — снижение затрат на тепло и электроэнергию до 2,8 раза [1].

На рис. 1 приведена схема распределения статей теплового баланса при разных способах производства энергии. Откуда следует, что при комбинированном способе производства энергии потери уменьшаются.

Однако теплота, выделяющаяся при сгорании топлива в двигателе внутреннего сгорания, как приводя в системе «ГП ДВС — электрический генератор», составляющей техническую основу газопоршневой когенерационной установки, только частично преобразуется в полезную работу, большая часть ее, примерно 55–65 %, теряется с выпускными газами и охлаждающей жидкостью [2–5].

Теряемая с выпускными газами теплота имеет высокий температурный уровень, поэтому ее легко можно утилизировать [2–5]. Потери теплоты зависят от температуры выпускных газов, суммарного коэффициента избытка воздуха и колеблются у разных поршневых двигателей на номинальном режиме в пределах 28–43 %.

Температура газов в выпускном коллекторе поршневых двигателей различных типов при номинальной нагрузке равна [2–5]:

для четырехтактных дизелей:
 без наддува.....360–410°С
 с наддувом.....380–450°С
 для двухтактных:

с наддувом и контурной продувкой...270–380°С
 с прямоточно-клапанной продувкой...360–380°С
 Суммарный коэффициент избытка воздуха для четырехтактных дизелей лежит в пределах 2,0–2,7, а для двухтактных — 3,0–3,5.

Для определения количества теплоты выпускных газов двигателей, которую можно использовать в схемах утилизации при работе двигателей на долевых нагрузках, необходимо знать характер изменения потери теплоты, относительное значение которой выражается формулой [2]:

$$q_r = \frac{((\alpha \cdot L_{\min} + 1) \cdot C_p^r \cdot t_r - \alpha \cdot L_{\min} \cdot C_p^b \cdot t_b)}{Q_p^H}, \quad (1)$$

где α — коэффициент избытка воздуха;

$L_{\min}$ — теоретически необходимое количество воздуха, м³/кг;

C_p^r и C_p^b — соответственно объемные теплоемкости газа и воздуха, кДж/(м³·К);

t_r и t_b — соответственно температура выпускных газов и воздуха, К;

Q_p^H — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

В поршневых двигателях с наддувом, несмотря на то что часть энергии выпускных газов используется в газовой турбине, потеря теплоты с газами несколько больше, чем в двигателях без наддува. Последнее объясняется тем, что в турбине преобразуется незначительная часть тепловой энергии выпускаемых газов и срабатываемая в ней теплота в основном зависит от разности давления газов на входе в турбину и на выходе из нее, в то же время уменьшается потеря ее с охлаждающей жидкостью.

Теплота, теряемая с выпускными газами на эксплуатационном режиме, будет:

$$Q_r = q_r^r \cdot N_e, \quad (2)$$

где N_e — эффективная мощность на эксплуатационном режиме, кВт;

q_r^r — удельное количество теплоты выпускных газов, кДж/кВт·ч, которое зависит, в том числе,

от низшей теплоты сгорания используемого топлива и его удельного расхода [2].

Эту теплоту нельзя использовать полностью, так как значительное снижение температуры выпускных газов за утилизационным устройством из-за развитых площадей поверхности теплообмена увеличивает аэродинамическое сопротивление выпускного тракта.

Как показали испытания четырехтактных дизелей [2], увеличение противодавления до 5000 Па не ухудшает их работы. Исходя из этих условий следует проектировать утилизационное устройство (котел), работающее на выпускных газах [2–7].

При проектировании утилизационных устройств нужно учитывать, что температура выпускных газов должна быть выше точки росы серной кислоты. Точку росы можно рассчитать по формуле [2, 6, 7]:

$$t_p = t_s + 98,5 \cdot \sqrt[3]{S_p}, \quad (3)$$

где t_s — температура конденсации водяных паров, соответствующая их парциальному давлению в выпускных газах, °C;

S_p — приведенное содержание серы в топливе, %.

При максимальном использовании теплоты выпускных газов их температуру за утилизационным устройством на номинальном режиме можно принимать равной выражению:

$$t_{o,r} = t_p + \Delta t_n, \quad (4)$$

где Δt_n — разность температур стенки и выпускных газов, обеспечивающая достаточно эффективный теплообмен, °C. Значения Δt_n принимаются не менее 25 °C [2, 3].

Дальнейшее повышение экономичности газопоршневых установок в составе схемы когенерации котельной установки может быть достигнуто более рациональным использованием тепла выпускных газов и тепла, отводимого водой, охлаждающей двигатель.

Заметим, что средние температуры охлаждающей воды составляют в обычной замкнутой системе охлаждения 65–70 °C; в высокотемпературной системе охлаждения двигателя 100–120 °C [2, 3, 5].

Тепло, отводимое отработавшими газами, может быть использовано в утилизационных котлах для получения горячей воды или пара, потребляемых для отопления, работы турбогенератора и др. [2, 3, 5].

Утилизационные установки различают по параметрам получаемого пара, по типу применяемых утилизационных котлов и их компоновке. Утилизационные котлы генерируют пар, насыщенный или перегретый, давлением 0,2–1,4 МПа. По типу утилизационные котлы делятся на газотрубные, водотрубные с естественной циркуляцией, водотрубные с многократно принудительной циркуляцией и комбинированные. По компоновке утилизационные котлы делятся на простые (имеющие только испарительную поверхность нагрева) и развитые (котлы, имеющие испарительную поверхность нагрева, экономайзер, перегреватель, водоподогреватель). Некоторые принципиальные схемы утилизационных установок приведены на рис. 2 [3].

На рис. 2а приведена схема простейшей утилизационной установки. Питательный насос 9 подает конденсат использованного пара в сепаратор 7, где он нагревается до температуры насыщения. Циркуляционный насос 8 подает воду в утилизационный котел 1, где она превращается в смесь воды и пара.

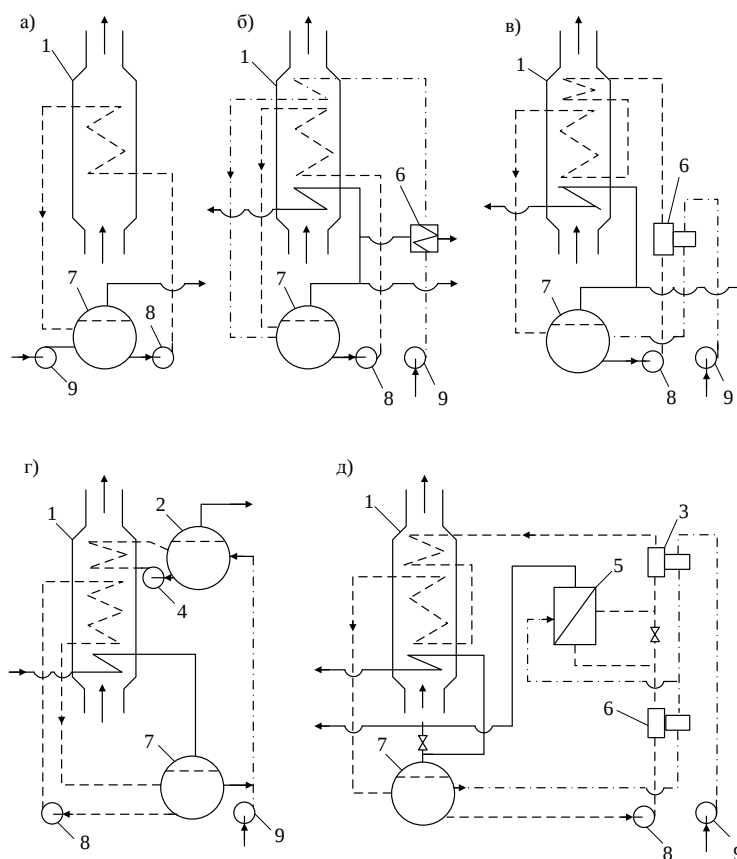


Рис. 2. Принципиальные схемы утилизационных установок для дизелей:

1 — утилизационный котел; 2, 7 — сепараторы; 3, 6 — подогреватели питательной воды; 4, 8 — циркуляционные насосы; 5 — испаритель низкого давления; 9 — питательный насос

Пароводяная смесь поступает в сепаратор, и отделенный пар отводится к потребителям.

Использование насыщенного пара для работы в турбине вызывает эрозию лопаток последних ступеней турбины из-за недопустимой влажности пара в конце процесса расширения. В связи с этим желательно генерировать пар таких параметров, чтобы в конце процесса расширения пара в турбине влажность не превышала 12 %. Для этого в утилизационных котлах производят перегрев пара.

На рис. 2б приведена схема развитой достаточно современной утилизационной установки.

Из сборника конденсата питательный насос 9 подает воду через подогреватель 6 в экономайзер, где питательная вода нагревается до температуры на 12–15°C ниже температуры насыщения. Циркуляционный насос 8 подает из сепаратора 7 воду в испарительную часть котла, а из нее пароводяная смесь поступает в сепаратор. Паропроизводительность таких установок больше производительности установок без экономайзера. С целью получения части перегретого пара для питания турбогенератора в первом газоходе утилизационного котла установлен пароперегреватель.

В целях предотвращения низкотемпературной коррозии хвостовых поверхностей нагрева, т.е. чтобы температуры стенки труб экономайзера не была ниже точки росы и не происходила конденсация водных паров, содержащихся в газах, питательная вода перед поступлением в экономайзер нагревается в паровом подогревателе 6 до температуры 100–105°C.

Необходимую температуру стенок труб экономайзера также можно обеспечить применением экономайзера с многократно принудительной циркуляцией. Схема такой установки изображена на рис. 2в.

Циркуляционный насос 8 подает из сепаратора 7 воду через подогреватель 6 в экономайзер 1. Циркуляционная вода служит греющей средой в подогревателе и она до поступления в экономайзер охлаждается, а питательная вода, подаваемая питательным насосом 9, нагревается до температуры ниже температуры насыщения на 10–15°C и поступает в сепаратор 7.

В последнее время устанавливают утилизационные котлы с многократно принудительной циркуляцией. В качестве сепараторов используют пароводяные коллекторы.

Применение отдельных сепараторов увеличивает габариты и вес установки, однако при этом обеспечивается автономность работы утилизационного котла.

Комбинированные котлы с принудительной циркуляцией не применяют вследствие того, что трудно обеспечить надежную работу циркуляционного контура при дополнительном сжигании топлива на различных режимах.

Потребители тепла можно обеспечить, используя пар низкого давления, получаемого дросселированием пара повышенного давления, при этом происходит потеря эксергии, из-за чего снижается экономичность установки.

Пар низкого давления можно также получить в отдельном контуре, установленном в хвостовой части утилизационного котла. На рис. 2г изображена схема двухконтурной утилизационной установки. Пар повышенного давления, генерируемый в первом контуре, обеспечивает работу турбогенератора, а пар низкого давления, генерируемый

во втором контуре, используется для тепловых потребителей.

При питании турбогенератора паром давлением 1,2–1,4 МПа можно также обеспечить потребителей паром давлением 0,15–0,25 МПа, отбираемым из турбины.

Пар низкого давления можно получить, используя испаритель, в котором греющей средой является вода, циркулирующая в контуре многократной циркуляции.

На рис. 2д изображена схема такой утилизационной установки. Питательный насос 9 подает воду через подогреватель 3, после которого питательная вода разветвляется на два потока. Один поток поступает в испаритель 5, где превращается в пар низкого давления, а второй направляется во вторую ступень подогрева — подогреватель 6, а из него в сепаратор 7. Циркуляционный насос 8 подает воду из водяного пространства сепаратора через подогреватель 6, испаритель 5, подогреватель 3 в экономайзер котла. Поскольку циркуляционная вода служит в теплообменниках 6, 5, 3 греющей средой, она до поступления в экономайзер охлаждается. Охлаждение циркуляционной воды дает возможность лучше использовать теплоту газов в хвостовой части котла.

Насыщенный пар повышенного давления из сепаратора 7 поступает в пароперегреватель, а из него в турбогенератор.

Таким образом, в этой установке генерируется пар двух давлений: перегретый пар повышенного давления для питания турбогенератора и насыщенный пар низкого давления для питания потребителей пара.

Применение утилизационных установок, генерирующих пар двух давлений, практически возможно, если имеются потребители пара давлением 0,64–1,6 МПа и пара давлением 0,15–0,25 МПа.

Паропроизводительность утилизационного котла определяют из уравнения теплового баланса котла [3]:

$$D = \frac{G_r \cdot (h_r - h_{yx}) \cdot \xi}{h_n - h_{nb}}, \quad (5)$$

где D — паропроизводительность котла, кг/ч;

ξ — коэффициент, учитывающий потерю тепла в окружающую среду (0,95–0,97);

h_n, h_{nb} — соответственно энтальпия пара и питательной воды, кДж/кг;

h_r, h_{yx} — соответственно энтальпия газа, поступающего в котел и уходящего из котла, кДж/кг. Энтальпия газа можно определить по графику работы [3];

G_r — количество газа, кг/ч

$$G_r = (1 + \alpha_s \cdot L_0) \cdot b_e \cdot N_e, \quad (6)$$

где L_0 — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, кг/кг.

α_s — суммарный коэффициент избытка воздуха;

b_e — удельный эффективный расход топлива двигателем, кг/кВт·ч;

N_e — эффективная мощность двигателя, кВт.

Количество газа можно также определить по формуле [4, 5]:

$$G_r = g_r \cdot b_e \cdot N_e, \quad (7)$$

где g_r — количество газов, образующееся при сжигании 1 кг топлива.

Зависимость g_r от температуры выпускных газов t_r и доли тепла, отводимого выпускными газами, a_r в форме графиков также приведена в [3].

Из формулы (5) видно, что паропроизводительность утилизационного котла зависит от температуры газа перед и за котлом, от параметров получаемого пара и температуры питательной воды. Температура газа перед котлом зависит от типа и нагрузки двигателя, а температура газа за котлом определяется из условия наличия минимально необходимой разности температуры газа после испарительной поверхности нагрева котла и температуры насыщенного пара при рабочем давлении в котле, которая составляет $30 - 40^\circ\text{C}$, т.е.:

$$t'_r = t_s + (30 \div 40)^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где t'_r — температура газа за испарительной поверхностью нагрева;

t_s — температура насыщенного пара при заданном давлении в котле.

В утилизационных котлах, не имеющих экономайзеров, $t'_r = t_{yx}$.

Для предотвращения парообразования в экономайзере обычно принимают температуру воды на выходе из экономайзера на $(12 - 15)^\circ\text{C}$ ниже температуры насыщения, т.е. энтальпия воды на выходе из экономайзера:

$$h'_{b,э} = h'_s - (12 \div 15). \quad (9)$$

Температура уходящих газов в котле с экономайзером определяется следующим образом: по температуре насыщения t_s определяют температуру газа и энтальпию газа за испарительной поверхностью нагрева котла, а затем определяют паропроизводительность котла из равенства:

$$\xi \cdot G_r \cdot (h_r - h_{r1}) = D \cdot (h_n - h'_{b,э}). \quad (10)$$

Так как

$$D \cdot (h'_{b,э} - h'_{nb}) = G_r \cdot (h_{r1} - h_{yx}) \cdot \xi, \quad (11)$$

то отсюда получим:

$$h_{yx} = h_{r1} - \frac{D \cdot (h'_{b,э} - h'_{nb})}{\xi \cdot G_r}. \quad (12)$$

По найденному значению энтальпии h_{yx} определяют температуру уходящих газов, например, по графику работы [3].

Максимальное количество тепла, которое можно получить из отходящих газов поршневого ДВС, от мощности последнего [8].

Количество же тепла, потребного для потребителей, зависит от назначения теплоисточника (котельной).

На рис. 3 показана зависимость максимального количества тепла Q_0^m , которое может быть использовано из отходящих газов поршневого ДВС, от мощности последнего [4].

Значение Q_0^m также можно определить по формуле [4]:

$$Q_0^m = 0,85 \cdot N_e g_r c_p (T_{bx} - T_{yx}) \xi, \text{ кДж/ч}, \quad (13)$$

где N_e — мощность двигателя, кВт;

g_r — удельное количество газов, выходящих из двигателя, которое у четырехтактных дизелей

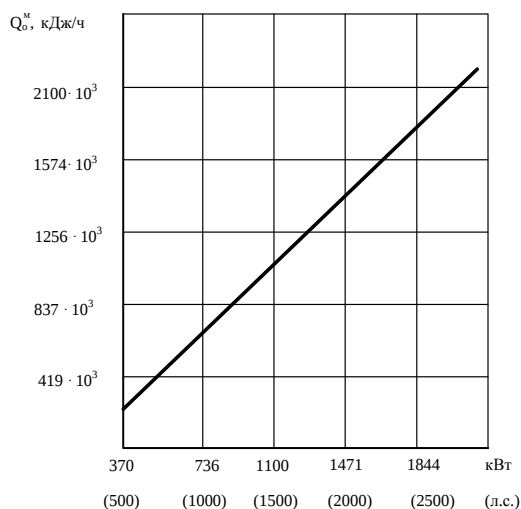


Рис. 3. Зависимость максимального количества тепла, которое может быть использовано из отходящих газов дизеля, от его мощности

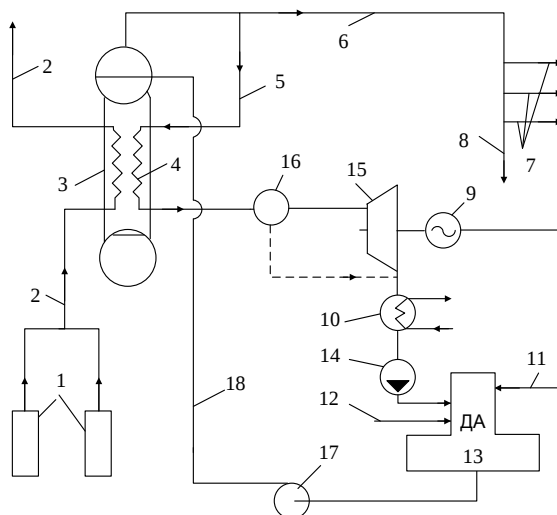


Рис. 4. Схема котельной установки с максимальным использованием тепла отходящих газов дизелей:
1 — дизель; 2 — газопроводы отработавших газов дизелей;
3 — паровой утилизационный двухбарабанный водотрубный котел; 4 — пароперегреватель;
5 — насыщенный пар в пароперегревателе;
6 — паропроводы насыщенного пара для отопления и прочих нужд;
7 и 8 — насыщенный пар для отопления и других нужд;
9 — электрогенератор, обеспечивающий электроэнергией все потребители; 10 — конденсатор паровой турбины;
11 — присадочная вода; 12 — сбор конденсата;
13 — деаэратор; 14 — конденсатный насос;
15 — паровая вспомогательная конденсационная турбина;
16 — регулятор расхода пара;
17 — питательный котельный насос;
18 — питание котла

составляет около $6,2 - 6,8 \text{ кг/кВтч}$ и у двухтактных около $11 - 12,3 \text{ кг/кВтч}$,

c_p — весовая теплоемкость газов, принимаемая в среднем $1,05 - 1,13 \text{ кДж/кг град}$;

T_{bx} и T_{yx} — температура газов соответственно при входе в котел и при выходе из него;

ξ — коэффициент потери тепла в окружающую среду.

Схема такой котельной установки с максимальным использованием тепла отходящих газов поршневых двигателей приведена на рис. 4 [4, 5].

Выводы.

1. Первичным источником энергии когенерационной установки может являться поршневой двигатель внутреннего сгорания, работающий как на газовом топливе, так и на жидком (нефтяном либо альтернативном).

2. Выбор тепловой схемы установки определяет для конкретного случая условиями размещения, видом топлива для первичного поршневого двигателя, потребной нагрузкой и режимами эксплуатации системы.

3. Системы когенерации с поршневыми ДВС целесообразно использовать при реконструкции выработавших ресурс муниципальных котельных, либо как самостоятельные тепло- и электроисточники небольшой мощности.

4. Существует теоретически обоснованное максимально возможное количество тепла утилизации отработавших газов поршневых ДВС в зависимости от их мощности.

Библиографический список

1. Кручинский, П. В. Курсе. Экономика. В Омской мэрии продолжают развивать идею когенерации [Текст] / П. Кручинский // Ваш Орел. — 2013. — 28 октября.
2. Селиверстов, В. М. Экономия топлива на речном флоте [Текст] / В. М. Селиверстов, М. И. Браславский. — М. : Транспорт, 1983. — 231 с.
3. Перельман, Р. С. Судовые энергетические установки. Энергетика [Текст] / Р. С. Перельман. — Одесса : Феникс, 2006. — 92 с.
4. Иконников, С. А. Силовые установки речных судов [Текст] / С. А. Иконников, Ф. Д. Урланг. — М. : Транспорт, 1971. — 248 с.

5. Овсянников, М. К. Судовые дизельные установки : справ. [Текст] / М. К. Овсянников, В. А. Петухов. — Л. : Судостроение. — 424 с.

6. Двойнишников, В. А. Конструкция и расчет котлов [Текст] / В. А. Двойнишников, А. В. Деев, М. А. Изюмов. — М. : Машиностроение, 1988. — 264 с.

7. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты [Текст] / А. П. Воинов [и др.] ; под ред. Л. Н. Сидельковского. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.

8. Ведрученко, В. Р. Альтернативные виды топлива для судовых дизелей : моногр. [Текст] / В. Р. Ведрученко, И. И. Малахов. — Омск : Омский ин-т водного транспорта, 2012. — 172 с.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

КРАЙНОВ Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: KrainovVV@omgups.ru

ЖДАНОВ Николай Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: zhdanov-n@mail.ru

КОКШАРОВ Максим Валерьевич, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики.

КУЗНЕЦОВА Дарья Константиновна, студентка гр. 30ж теплоэнергетического факультета.

Адрес для переписки: dashoshok@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.10.2014 г.

© В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, Н. В. Жданов, М. В. Кокшаров, Д. К. Кузнецова

Книжная полка

621.316/A22

Автоматизация систем управления электрохозяйством предприятия : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие / Е. Г. Андреева [и др.]. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM). — ISBN 978-5-8149-1855-0.

Представлены краткие теоретические сведения в области релейной защиты и автоматики: основные виды релейных защит (максимальная токовая, токовая направленная, дистанционная), функциональные части релейной защиты, принцип действия различных видов реле, устройства АПВ и АВР, защита и автоматика двигателей. Учебное пособие предназначено студентам, обучающимся по направлениям бакалавриата 140600.62 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», а также специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», очной и заочной форм обучения.

621.318/Д46

Динамика электромагнита переменного тока : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие / А. С. Татевосян [и др.]. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM). — ISBN 978-5-8149-1867-3.

Содержит краткое изложение теории по динамике электромагнитов переменного тока и методов построения соответствующих математических моделей в комплексе пакетов программ Elcut и Matlab/Simulink. Дано описание экспериментального стенда и методики исследования динамических характеристик контактора переменного тока. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 (140400) «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электрические и электронные аппараты»), изучающих дисциплины «Комплексы и системы электромеханических и электронных аппаратов», «Компьютерное моделирование электрических цепей, электромагнитного поля, тепловых полей» и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ПЕРЕНОСНОГО ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Приводятся технические средства, методика и результаты испытаний изоляторов контактной сети железнодорожного транспорта. Участок контактной сети представлен в виде модели линии с распределенными параметрами. Представлены схема проведения эксперимента, форма диагностирующих импульсов для определения возможного места положения неисправного изолятора.

Ключевые слова: диагностирование, контактная сеть, изолятор, прямоугольный импульс, прибор контроля изоляторов, линия с распределенными параметрами.

Наибольшее количество событий, связанных с нарушением безопасности движения поездов в хозяйстве электрификации и электроснабжения, происходит из-за отказов в работе устройств контактной сети. В 2013 году в результате отказов устройств контактной сети допущено 129 транспортных события (92,8 %), электроснабжения СЦБ и тяговых подстанций — по 5 (по 3,6 %) [1].

Повреждения изолирующих элементов приводят к сбою движения поездов, а в некоторых случаях и к большим перерывам, необходимым для восстановления поврежденных конструкций. В общем объеме повреждений изоляторов преобладающими являются механические. Подобные разрушения изоляторов наиболее часто происходят при неблагоприятных метеорологических условиях (в период сильных ветров и автоколебаний проводов, при низких температурах) в тех узлах КС, где на изоляторы воздействуют высокие механические нагрузки.

Определяющими причинами отказов контактной сети, влияющими на безопасность движения в хозяйстве электрификации и электроснабжения, являются перекрытие и разрушения изоляторов контактной сети (21 %), обрывы и пережоги проводов (19 %), разрушение зажимов (11 %), нарушение регулировки контактной сети (10 %), обрывы струн (7 %) [1].

Основные причины разрушения изоляторов: низкая механическая прочность при ударных нагрузках; быстрое старение в эксплуатации и, особенно, при низких температурах: недостатки конструкций, фиксирующих узлов; нарушение норм содержания; случаи, не связанные с эксплуатацией.

Недостаточная механическая прочность изоляторов при их заземлении и воздействии ударных нагрузок приводит к разрушению фарфора. Снижение механической прочности некоторых изоляторов при длительной эксплуатации обычно происходит из-за возникновения значительных напряжений в месте сопряжения фарфора, цементной заделки и металлической арматуры в связи с разными коэффициентами температурного расширения этих материалов. В таких местах в фарфоре возникают микро- и макротрещины, со вре-

менем развивающиеся и снижающие механическую прочность всего изолятора. Максимальная потеря прочности происходит при низких температурах [2].

Прочность изолятора уменьшается также из-за постоянных ударных нагрузок, передающихся на них при эксплуатации. В таких случаях в фарфоре также возникают скрытые трещины, которые затем развиваются. Скрытость дефектов, которые нельзя обнаружить ни визуально, ни электрическими испытаниями наиболее опасна в эксплуатации.

Контактную сеть постоянного тока с изолирующими элементами принято рассматривать в виде линии с распределенными параметрами (рис. 1). Для решения задачи контроля изолирующих элементов и оперативного определения места их повреждения необходимо использовать современный математический аппарат, элементы моделирования с целью постановки и реализации измерительного эксперимента.

Среди известных аналогов преобладают приборы, основанные на анализе схем с сосредоточенными параметрами [3]. На основе предложенного метода [4] разработан опытный образец прибора для диагностирования изоляции контактной сети постоянного тока железнодорожного транспорта. Составлена структурная схема измерительного комплекса (рис. 2).

В качестве тестовых воздействий выбраны прямоугольные импульсы, имеющие непрерывный спектр высших гармоник. Поскольку объект диагностирования представлен комплексным сопротивлением, каждая из составляющих гармоник входного напряжения будет по-разному влиять на форму выходного сигнала.

Последовательность прямоугольных импульсов, характеризуется длительностью, амплитудой и периодом следования единичного импульса.

Эксперимент проводился на участке контактной сети учебного полигона ОмГУПС (рис. 3). Неисправный изолятор (НИ) соединялся с контактной сетью и рельсовым заземлением в положениях 1, 2, 3, как показано на рис. 3. Подключение прибора контроля изоляции (ПКИ) к контактной сети осуществлялось при помощи измерительной штанги (ИШ).

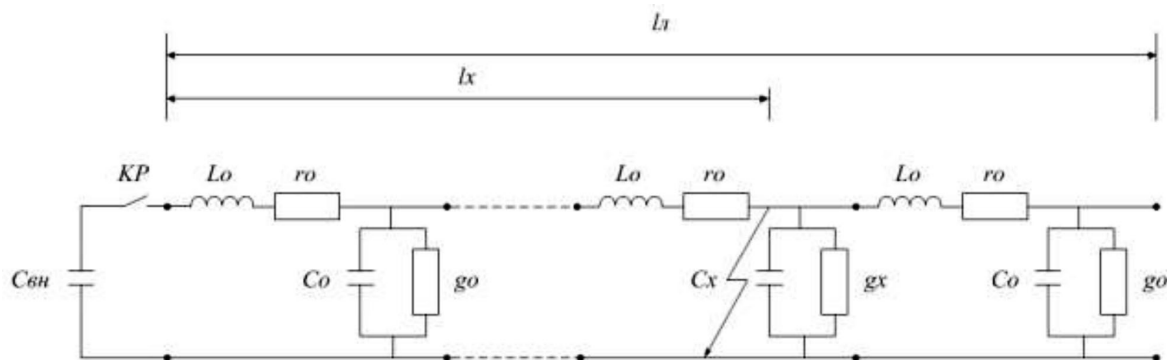


Рис. 1. Схема замещения контактной сети

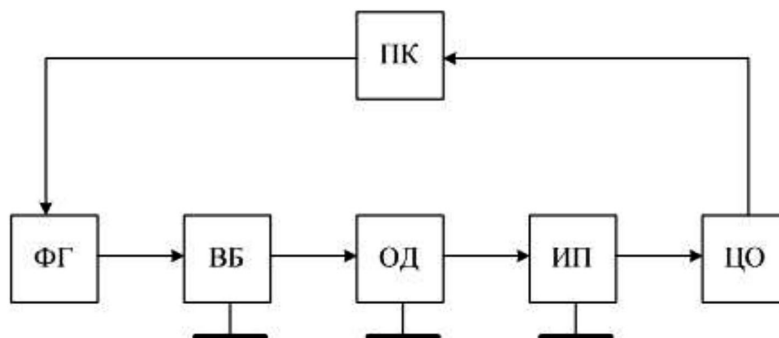


Рис. 2. Структурная схема измерительного комплекса:

ПК — персональный компьютер; ФГ — функциональный генератор; ВБ — высоковольтный блок; ОД — объект диагностирования; ИП — измерительный преобразователь; ЦО — цифровой осциллограф

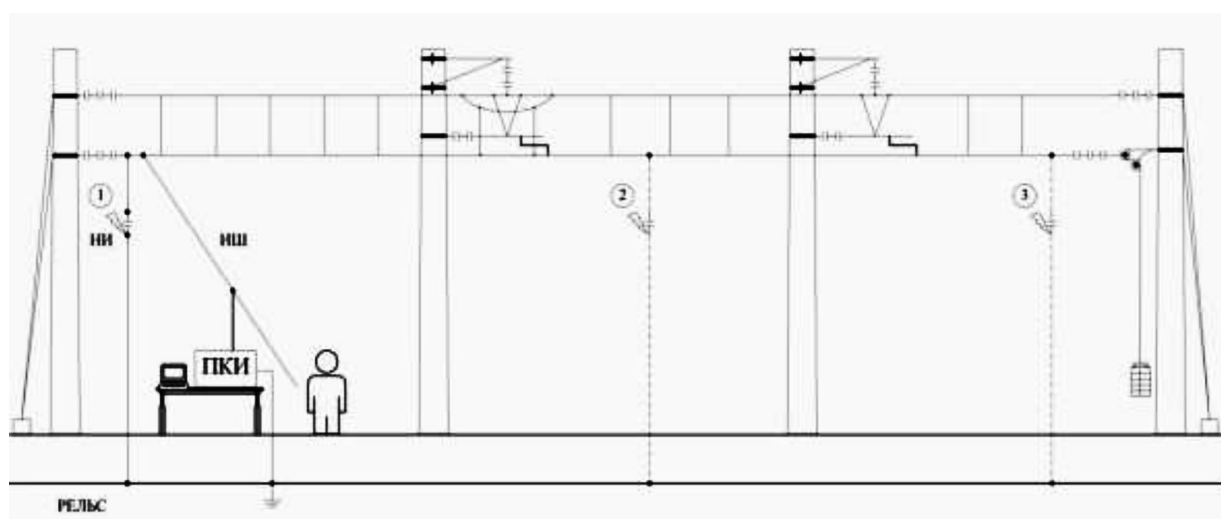


Рис. 3. Схема проведения эксперимента диагностирования изоляторов

Для эксперимента были выбраны подвесные фарфоровые тарельчатые изоляторы типа ПФ-70 [5].

При испытаниях изоляторов контактной сети постоянного тока высокочастотный сигнал с высокой амплитудой можно заменить последовательностью прямоугольных импульсов меньшей частоты, что упрощает реализацию аппаратной части испытательного оборудования.

Во время эксперимента была получена осциллограмма выходного сигнала исправного участка (рис. 4). Неисправный изолятор при этом не был

включен в линию (режим холостого хода). Также были получены осциллограммы диагностирующих импульсов, при расположении неисправного изолятора в положениях 1, 2, 3 участка контактной сети (рис. 5). Как видно из приведенных осциллограмм, на участке происходит разряд эквивалентной емкости на входные цепи измерительного делителя напряжения. Это видно по характерному спаду заднего фронта импульса.

При подключении неисправного изолятора в положения 1, 2, 3 также наблюдалась задержка спада

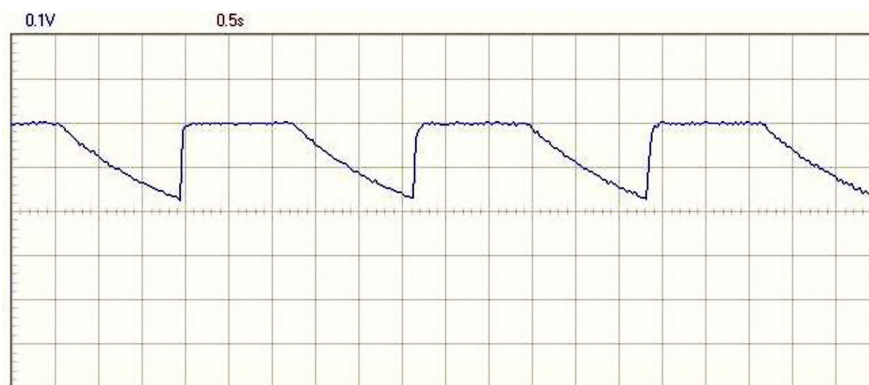


Рис. 4. Осциллограмма выходного сигнала исправного участка

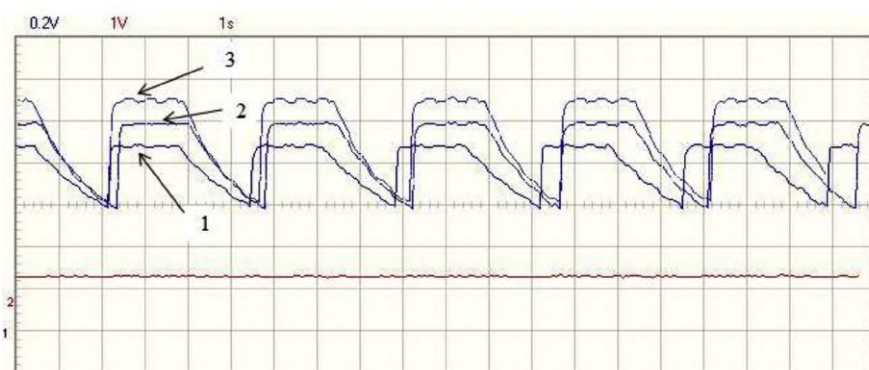


Рис. 5. Осциллограммы выходного сигнала в трех режимах

заднего фронта, которую можно объяснить изменением эквивалентного активного сопротивления участка. Как видно из осциллограммы, исправные изоляторы также будут разряжаться, но уже с большей интенсивностью. Также, при наличии на участке неисправного изолятора, появляются помехи и неровности в верхних точках импульсов. Кроме того, при размещении неисправного изолятора на близком расстоянии от начала линии наблюдалось уменьшение амплитуды прямоугольных импульсов, что объясняется шунтированием входной цепи измерителя внутренним сопротивлением неисправного изолятора ($R_{\text{ни}} = 500 \text{ кОм}$). По мере удаления от места проведения измерений амплитуда сигнала увеличивается.

Таким образом, наличие на участке неисправных изоляторов сопровождается изменением формы диагностирующих импульсов, а расстояние до неисправного изолятора определяется изменением амплитуды сигнала.

Данный метод диагностирования позволяет выявить наличие и местоположение дефектных изоляторов, поврежденных в результате механического воздействия на них (сколы, трещины, деформации). Один из способов определения типа неисправности осуществляется путем накопления и последующего сравнения образцовых и измеренных сигналов на участках контактной сети, содержащих различное число исправных и неисправных изоляторов.

Работы, выполняемые по предложенной технологии, позволяют сократить время на поиск и устранение неисправностей изоляции контактной сети железных дорог. Диагностирование состояния изоляции контактной сети можно будет проводить с по-

мощью дополнительного оборудования, установленного в вагоне-лаборатории контактной сети (ВИКС) или непосредственно на тяговых подстанциях.

Библиографический список

1. Анализ работы хозяйства электрификации и электро-снабжения в 2013 году. — М. : ОАО РЖД, 2014. — 100 с.
2. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропереда-чи : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. — М. : Маршрут, 2003. — 416 с.
3. Контактная сеть и воздушные линии: Нормативно-ме-тодическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий : справ. / Департамент электрификации и электроснабжения РФ. — М. : Транспорт, 2001. — 512 с.
4. Кузнецов, А. А. Разработка технических средств и мето-дики контроля состояния изоляторов контактной сети постоян-ного тока / А. А. Кузнецов, Е. А. Кротенко, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба. — 2012. — № 4. — С 110–116.
5. Каталог изоляторов для контактной сети и ВЛ электри-фицированных железных дорог. — М. : Трансиздат, 2000. — 112 с.

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор техниче-ских наук, профессор (Россия), профессор кафедры теоретической электротехники.

Адрес для переписки: kuznetsovaa@omgups.ru

КУЗЬМЕНКО Антон Юрьевич, инженер кафедры теоретической электротехники.

Адрес для переписки: KuZo17@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2014 г.

© А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПОНОВКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ДВУХРОТОРНОГО ПНЕВМОАГРЕГАТА С НЕЛИНЕЙНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ РОТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Представлена методика расчета рабочего процесса двухроторного пневмоагрегата с нелинейной синхронизацией роторов, отражающая специфику структуры зазоров и окон газораспределения в рабочей камере, а также конструкции плоских щелевых зазоров с лабиринтными канавками. По результатам расчетного параметрического анализа определено влияние интенсивности перетечек рабочего газа на эффективность рабочего процесса и представлены рекомендации по компоновке рабочей камеры.

Ключевые слова: пневмоагрегат, рабочий процесс, математическая модель, плоские зазоры, лабиринтные канавки.

Введение. Пневмоагрегаты получили широкое применение в тех отраслях промышленности, где к оборудованию предъявляются повышенные требования по обеспечению пожаровзрывобезопасности (химическая, горная и др.) и по этому критерию пневмопривод существенно превосходит электропривод и двигатели внутреннего сгорания. В настоящее время в качестве пневмопривода наиболее широко используются поршневые пневмоагрегаты, обеспечивающие помимо безопасности хорошие пусковые характеристики, допускающие нерасчётные перегрузки по крутящему моменту, имеющие эффективные контактные уплотнения в рабочей камере, обеспечивающие высокую экономичность по сравнению с пневмоагрегатами роторного типа. Исследования и разработки, выполненные в нашей стране, показали высокую эффективность поршневых расширительных машин, в том числе пневмоагрегатов, при различных вариантах конструкции и режимов работы [1 – 3 и др.]. Вместе с тем роторные пневмоагрегаты также имеют свои преимущества. Это хорошая уравновешенность и отсутствие вибраций, малые вес и габаритные размеры, высокие надёжность, ресурс и ремонтпригодность. Наиболее распространёнными типами роторных пневмоагрегатов являются шестерёнчатые, шибберные (роторно-пластинчатые), винтовые. Исследования рабочих процессов таких машин показали, что основным конструктивным недостатком агрегатов, относящихся к роторным машинам объёмного действия, является развитая сеть зазоров, в том числе бесконтактных, между взаимно подвижными дета-

лями, формирующими рабочую камеру, что определяет высокую интенсивность перетечек рабочего газа через зазоры и связанную с этим низкую экономичность рабочего процесса [4 – 8 и др.]. Этот недостаток может быть компенсирован путём минимизации суммарной длины зазоров в рабочей камере и увеличения их гидравлического сопротивления. Применительно к роторным пневмоагрегатам это может быть обеспечено в двухроторных пневмоагрегатах с нелинейной синхронизацией роторов (РПНС). Такой тип машин объёмного действия известен в компрессорной технике и двигателестроении [9 – 13 и др.], однако применение таких машин в качестве пневмоагрегатов и результаты исследований эффективности рабочего процесса таких пневмоагрегатов из доступных источников информации на сегодняшний день неизвестны.

Актуальность данной статьи состоит в оценке возможности повышения экономичности РПНС путём минимизации периметра зазоров в рабочей камере при различных вариантах её компоновки.

Основная часть. Расчётная схема ступени РПНС представляет собой совокупность рабочей камеры и связанных с ней через органы газораспределения и зазоры полостей (рис. 1, 2). Тепловые и массовые потоки, определяющие изменение параметров газа в контрольном объёме, условно изображены обобщёнными величинами, отражающими направление и физическое происхождение этих потоков. Применяемый тип математической модели с сосредоточенными параметрами состояния рабочего газа в каждый момент времени, основанной

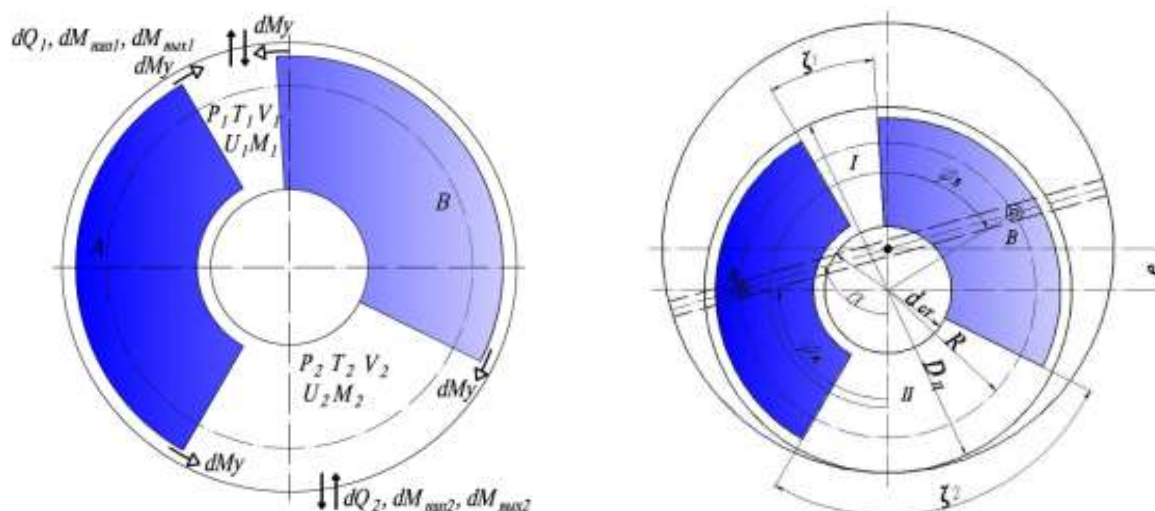


Рис. 1. Расчетная схема для математической модели ступени роторного агрегата с нелинейной синхронизацией роторов

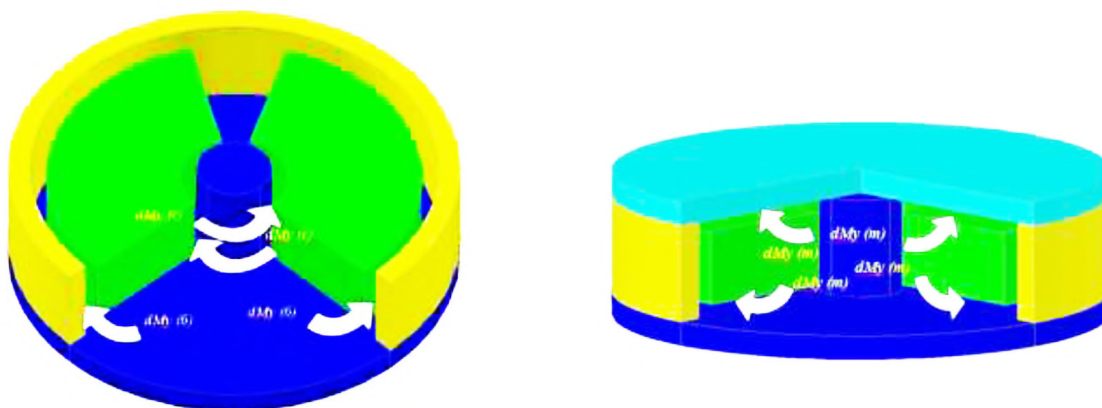


Рис. 2. Схема потоков газа через зазоры в рабочей камере РПНС

на квазистационарном подходе к решению системы основных уравнений, многократно апробирован и верифицирован различными авторами [2, 14, 15 и др.], что позволяет предполагать корректность применения такой модели для решения рассматриваемых задач. Соответственно, в рассматриваемом случае использованы и общепринятые упрощающие допущения: газовая среда непрерывна и гомогенна; моделируемые процессы обратимы, равновесны и квазистационарны; параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объёму рабочей камеры (ячейки); изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало; теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу; параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны; течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным; теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный и может быть описан формулой Ньютона – Рихмана.

В соответствии с расчётной схемой и принятыми упрощающими допущениями система основных расчётных уравнений включает в себя известные уравнение закона сохранения энергии для тела переменной массы, уравнение массового баланса, уравнение состояния, следствие закона Джоуля для внутренней энергии газа, уравнения расхода газа

через клапан и зазоры, уравнение конвективного теплообмена между газом и стенками рабочей камеры.

Кроме основных уравнений математическая модель включает в себя целый ряд дополнительных зависимостей и уравнений, которые замыкают систему уравнений в целом.

Для роторного пневмоагрегата с нелинейной синхронизацией роторов это теплообмен с внешней поверхностью цилиндра $dQ_{\text{ц}}$ с поверхностью ступицы $dQ_{\text{ст}}$, двумя торцевыми поверхностями dQ_T и двумя поверхностями роторов dQ_p :

$$dQ = dQ_{\text{ц}} + dQ_{\text{ст}} + 2dQ_T + 2dQ_p.$$

Для определения составляющих данного уравнения используется уравнение Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha F(T_g - T_{\text{ст}}),$$

где F — площадь поверхности теплообмена, рассчитывается на каждом расчетном шаге, α — коэффициент теплоотдачи между газом и стенками рабочей камеры, T_g — температура газа, $T_{\text{ст}}$ — температура стенок цилиндра.

Методика расчёта расхода газа через рассматриваемые зазоры, в том числе с лабиринтными канавками на одной из стенок, основана на уравнении для несжимаемой жидкости с введением коэффициента сжимаемости. В опубликованных

работах, посвящённых исследованию течения газа через плоские щелевые зазоры рассматриваемого типа [16–19 и др.], наличие лабиринтных канавок не учитывалось. В рассматриваемой методике коэффициент расхода μ определяется по эмпирическим уравнениям, полученным Гуровым А. А.:

— для гладких зазоров:

$$0 < Re < 1000 \quad \mu = 0,008756141 Re^{0,588} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,206}$$

$$1000 \leq Re \leq 2300 \quad \mu = 0,00694315 Re^{0,603} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,184}$$

$$Re > 2300 \quad \mu = 0,021237219 Re^{0,48} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,205}$$

— для лабиринтных зазоров:

$$1 \text{ канавка} \quad \mu = 0,0063376476 Re^{0,529} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,058}$$

$$3 \text{ канавки} \quad \mu = 0,023589243 Re^{0,548} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,226}$$

$$7 \text{ канавок} \quad \mu = 0,0558334 Re^{0,539} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,324}$$

$$16 \text{ канавок} \quad \mu = 0,013396643 Re^{0,541} \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,176}$$

Определение объёмов рабочих камер для ступени роторного агрегата с нелинейной синхронизацией роторов осуществляется следующими соотношениями, в соответствии с расчетной схемой (рис. 1):

— для первой (I) рабочей камеры:

$$V_{II} = 0,125(D_{II}^2 - d_{CT}^2)L_{II}\xi_I;$$

— для второй (II) рабочей камеры:

$$V_{III} = 0,125(D_{II}^2 - d_{CT}^2)L_{II}\xi_{II},$$

где D_{II} — диаметр цилиндра, d_{CT} — диаметр ступицы, L_{II} — длина цилиндра, ξ_I и ξ_{II} — текущие углы раствора рабочих ячеек определяются следующими соотношениями:

— для первой (I) рабочей ячейки:

$$\xi_I = 2\arcsin(\bar{e}) + \bar{\xi}_M 4\arcsin(\bar{e}) - 2\arcsin(\bar{e}\sin\alpha);$$

— для второй (II) рабочей ячейки:

$$\xi_{II} = 2\arcsin(\bar{e}) + \bar{\xi}_M 4\arcsin(\bar{e}) + 2\arcsin(\bar{e}\sin\alpha),$$

где α — угол поворота приводного вала; $\bar{e}$ — относительный эксцентриситет, равный отношению эксцентриситета e к радиусу R , $\bar{\xi}_M$ — минимальный угол раствора рабочих ячеек (мертвый объём).

Схема для расчета утечек рабочего тела через зазоры в рабочей камере РПНС представлена на рис. 2.

Высота зазоров принималась с учётом тепловой деформации деталей, формирующих рабочую камеру РПНС, оценка которой проводилась расчётным путём с применением пакета ANSYS (модули ANSYS Steady-State Thermal и ANSYS Static Structural (Samcef) (см. рис. 3).

Параметрический анализ проводился с целью определения влияния конструктивных и режимных параметров ступени РПНС на эффективность её рабочего процесса.

По результатам параметрического анализа определено, что в базовой компоновке (все зазоры не уплотнены) предпочтительное соотношение сторон рабочей камеры H/L ($H = (D_{II} - d_{CT})/2$ — высота; $L = L_{II}$ — длина вдоль оси роторов) должно быть больше 1,0 (рис. 4). При этом для большинства типовых размеров РПНС допустимо снижение соотношения H/L до 0,5.

Рассмотрена эффективность рабочего процесса РПНС при различных компоновках рабочей камеры. Очевидным фактом является то, что пневмоагрегат, в котором уплотнены все зазоры, будет иметь наилучшие рабочие характеристики, в сравнении с точно такими же конструкциями, с частичным уплотнением или без него. Уплотнение зазоров может быть обеспечено либо с использованием контактных уплотнений, либо с применением неподвижно закреплённых на одном из роторов деталей (например, торцевых дисков, вращающегося цилиндра). Однако, учитывая большое количество, суммарную площадь сопрягающихся элементов, между которыми возникают неплотности в рабочей камере пневмоагрегата с нелинейной синхронизацией роторов, и высокую относительную скорость движения элементов, применение контактных уплотнений может значительно увеличить выдаваемую (потребляемую) мощность, а также усложнить технологию изготовления и, соответственно, повысить его стоимость. Определено, что наиболее целесообразным является уплотнение только торцевых зазоров рабочей камеры пневмоагрегата, так как интегральные характеристики такого агрегата практически равны интегральным характери-

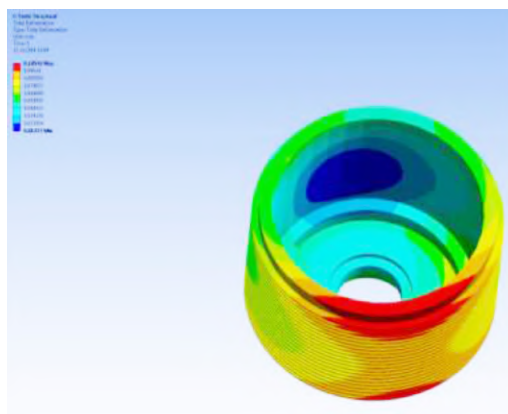


Рис. 3. Расчетная температурная деформация цилиндра

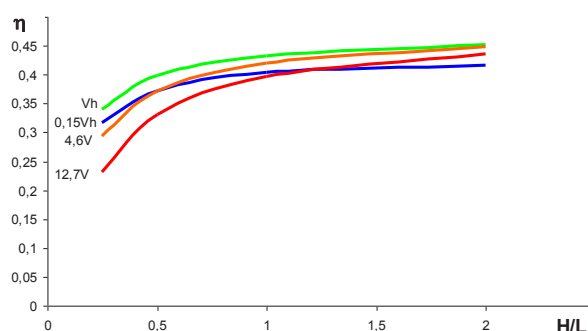
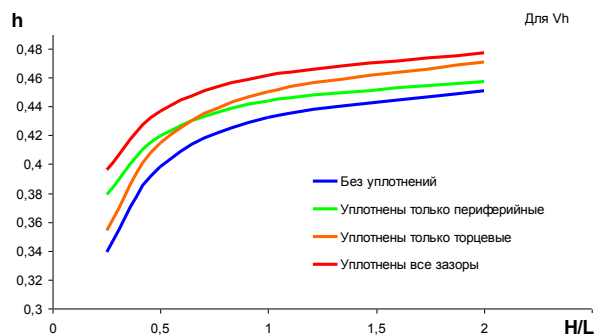
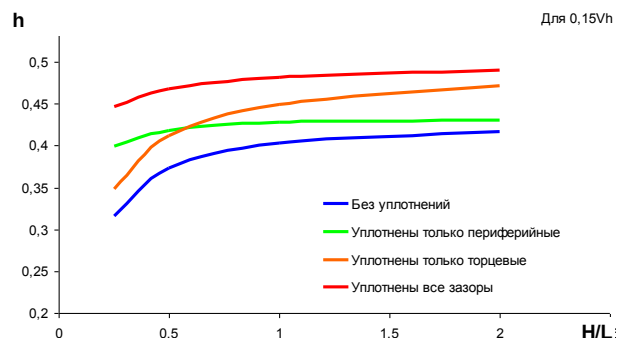
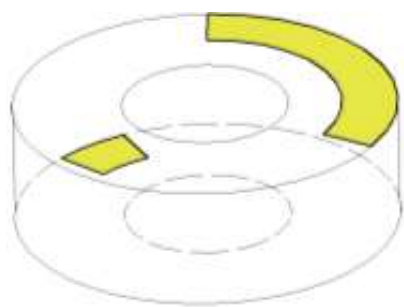
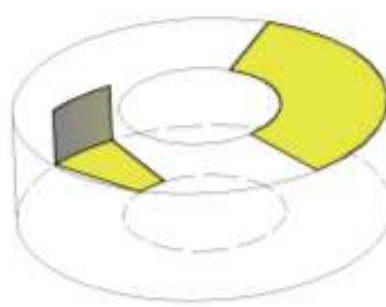


Рис. 4. Зависимости КПД от H/L для РПНС ($V_h = 1 \text{ м}^3/\text{с}$)

Рис. 5. Зависимости КПД от N/L для РПНСРис. 6. Зависимости КПД РПНС от N/L для малой (а) и большой (б) машин

а)



б)

Рис. 7. Варианты расположения окон газораспределения

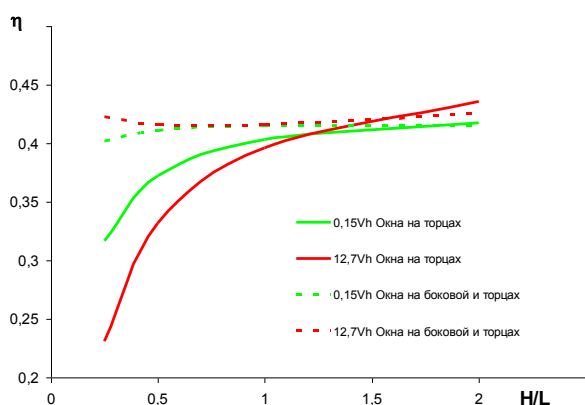
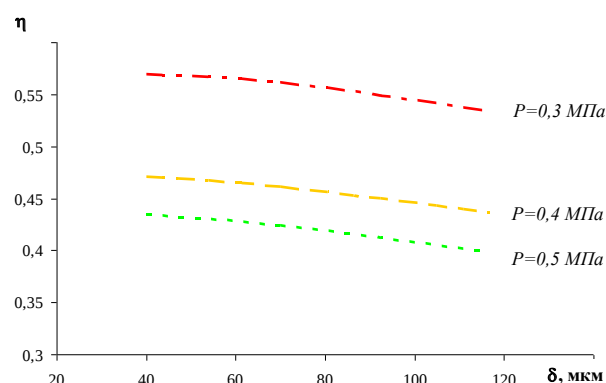
Рис. 8. Зависимости КПД от соотношения N/L для РПНС

Рис. 9. Зависимости КПД РПНС от высоты зазора

кам агрегата при полностью уплотненных зазорах (рис. 5). С увеличением размера пневмоагрегата влияние уплотнений уменьшается в связи с уменьшением влияния зазоров на рабочий процесс (рис. 6).

Влияние компоновки и, соответственно, площади окон газораспределения на рабочий процесс неоднозначно. С одной стороны, увеличение площади окна снижает гидравлические потери, с другой — увеличивает перетечки между рабочими камерами и полостями окон газораспределения, так как увеличение площади окон можно только за счет расположения их на нескольких поверхностях рабочей камеры. В базовом варианте окна газораспределения расположены на разных торцевых поверхностях, что исключает перетечки рабочего тела между ними. Увеличить площадь одного из окон можно, расположив его часть на цилиндрической поверхности. Располагать на одной торцевой поверхности окно наполнения и окно выпуска нецелесообразно,

т.к. они очень близко расположены и в этом случае между ними образуется короткий щелевой канал, через который будут существенные потери рабочего тела. Кроме того, при размещении части какого-либо окна на боковой поверхности приведет к тому, что зазор на боковой поверхности будет иметь переменную глубину, а следовательно, в какой-то момент времени глубина зазора весьма мала, что вызывает большие потери рабочего тела из рабочей камеры. В связи с этим, сравнение проводилось для двух конструкций: с расположением окон газораспределения на противоположных торцевых поверхностях (рис. 7а) и расположением окна наполнения (всасывания) на торцевой поверхности, окно выпуска (нагнетания) на противоположной торцевой и на боковой (рис. 7б). Дополнительная площадь окна выпуска дает существенное увеличение КПД (рис. 8). При увеличении значения соотношения N/L КПД пневмоагрегата практически не отличается, поэтому применять увеличение

площади окна газораспределения практически не требуется. Кроме того, при значении H/L , равном 2,0 КПД немного выше для машин, не имеющих дополнительную площадь окна выпуска. При оценке влияния высоты зазора на рабочий процесс получено, что увеличение высоты зазора снижает эффективность рабочего процесса пневмоагрегата (рис. 9): при увеличении высоты всех зазоров от 40 мкм до 117 мкм снижение КПД составит не более 10% для рабочего давления от 0,3 до 0,5 МПа. Относительно невысокое снижение КПД связано в том числе с большой глубиной зазоров.

Выводы. Таким образом, по результатам параметрического анализа определены основные геометрические и конструктивные параметры рабочей камеры РПНС, которые необходимо учитывать при его проектировании. Определяющим параметром является соотношение сторон рабочей камеры H/L , которое предпочтительно обеспечивать больше 1,0 практически для всех компоновок и размеров рабочей камеры. Несоблюдение этого условия может привести к существенному снижению эффективности рабочего процесса, например, при H/L меньше 0,5 приводит к снижению КПД в 1,5...2 раза. Существенное значение имеет также высота зазоров и расположение окон газораспределения.

Список сокращений и обозначений:

- λ — коэффициент теплопроводности, Вт/мК;
- μ — коэффициент динамической вязкости, Нс/м²;
- Re — число Рейнольдса;
- ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
- δ — высота зазора, м;
- B — глубина зазора, м.

Библиографический список

1. Кабаков, А. Н. Разработка научных основ совершенствования процессов выработки и снабжения подземных потребителей сжатым воздухом номинального и повышенного давления : дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Кабаков. — Омск. — 1984. — 484 с.
2. Прилуцкий, И. К. Разработка, исследование и создание компрессоров и детандеров для криогенной техники : дис. ... д-ра техн. наук / И. К. Прилуцкий. — Л., 1991. — 380 с.
3. Калекин, В. С. Рабочие процессы поршневых компрессорно-расширительных агрегатов с самодействующими клапанами : дис. ... д-ра техн. наук / В. С. Калекин. — Омск, 1999. — 344 с.
4. Пластилин, П. И. Сухие винтовые и прямозубые компрессоры / П. И. Пластилин // Насосостроение и компрессоростроение. Холодильное машиностроение (Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР). — 1986. — Т. 3. — С. 3–80.
5. Решкин, А. В. Малорасходные пластинчатые компрессоры без смазки / А. В. Решкин, В. Л. Трофимов, В. М. Копштейн // Исследование, расчет и конструирование холодильных и компрессорных машин : сб. тр. — М. : ОНТИ, 1980. — С. 163–170.
6. Ротационные компрессоры / А. Г. Головинцов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1964. — 315 с.
7. Сакун, И. А. Винтовые компрессоры / И. А. Сакун. — Л. : Машиностроение, 1970. — 400 с.
8. Хисамеев, И. Г. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчет и проектирование / И. Г. Хисамеев, В. А. Максимов. — Казань : Фэн, 2000. — 638 с.

9. Jungbluth, G. Rotation's kolbenmaschinen nach Wankel und andere Bekannte Bauarten / G. Jungbluth. — Maschinenmarkt, 1975. — 81. — № 35. — P. 626–628.

10. Сухомлинов, Р. М. Трохоидные роторные компрессоры / Р. М. Сухомлинов. — Харьков : Высш. школа, 1975. — 152 с.

11. Юша, В. Л. Анализ влияния основных геометрических соотношений рабочей камеры компрессора объемного действия с нелинейной синхронизацией роторов на эффективность его рабочего процесса / В. Л. Юша, С. Ю. Пахотин // Тепломассоперенос в системах холодильной техники : межвуз. сб. науч. тр. — Л. : ЛТИХП, 1990. — С. 60–65.

12. Юша, В. Л. Оценка применимости бесконтактных уплотнений в рабочих камерах объемных компрессоров / В. Л. Юша, А. А. Гуров, А. К. Беззатеев // Компрессорная техника и пневматика. — 2006. — № 2. — С. 48–51.

13. Юша, В. Л. Теоретический анализ влияния конфигурации рабочей камеры роторно-поршневого компрессора с нелинейной синхронизацией роторов на эффективность его рабочего процесса / В. Л. Юша, А. А. Гуров // Компрессорная техника и пневматика. — 2011. — № 7. — С. 38–40.

14. Пластилин, П. И. Расчет и исследование поршневых компрессоров с использованием ЭВМ / П. И. Пластилин. — М. : ВИНТИ, 1981. — 168 с.

15. Хрусталева, Б. С. Математическое моделирование рабочих процессов в объемных компрессорах для решения задач автоматизированного проектирования : дис. ... д-ра техн. наук / Б. С. Хрусталева. — Л. : СПбГПУ, 2000. — 269 с.

16. Алёшин, В. И. К вопросу о расчёте расхода газа через щели при малых числах Рейнольдса / В. И. Алёшин // Компрессорные машины и установки : тр. Краснодарского политех. ин-та. — Краснодар, 1979. — Вып. 93. — С. 77–81.

17. Беженцев, И. С. К определению расходных характеристик щелевых каналов / И. С. Беженцев, А. С. Приданцев, И. Г. Сафин // Повышение технического уровня, надёжности и долговечности компрессоров и компрессорных установок : тез. докл. VII Всесоюз. науч.-техн. конф. — Казань, 1985. — С. 141.

18. Захаренко, С. Е. Экспериментальное исследование протечек газа через щели / С. Е. Захаренко // Труды Ленингр. политех. ин-та. — 1953. — № 2. — С. 161–170.

19. Канищев, А. Т. Экспериментальное определение коэффициента расхода воздуха при лабиринтовых уплотнениях с гладкой втулкой / А. Т. Канищев // Труды Моск. ин-та инженеров ж.-д. транспорта. — 1958. — Вып. 109. — С. 74–86.

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры холодильной и компрессорной техники и технологии. Адрес для переписки: yusha@omgtu.ru

ГУРОВ Александр Александрович, аспирант кафедры холодильной и компрессорной техники и технологии.

Адрес для переписки: gurov1980@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ Владимир Константинович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры холодильной и компрессорной техники и технологии.

ЗИНОВЬЕВА Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры холодильной и компрессорной техники и технологии.

Адрес для переписки: zav55tok@mail.ru

ЛИХОБАБИНА Екатерина Александровна, инженер кафедры холодильной и компрессорной техники и технологии.

Адрес для переписки: katushalux@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.01.2015 г.

© В. Л. Юша, А. А. Гуров, В. К. Васильев, А. В. Зиновьева, Е. А. Лихобабина

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ РЕАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ИВЗУ

В данной статье сделан анализ и приведены результаты экспериментов по подбору геометрии для работы образца на промышленной станции. Целью статьи является поиск зависимости тех или иных геометрических элементов, у которых велико влияние для придания ИВЗУ высокоэффективного КПД. По окончании работы сделан вывод с готовыми зависимостями и поставлена задача для дальнейшей работы по усовершенствованию установки ИВЗУ.

Ключевые слова: золоулавливание, геометрия, моделирование, промышленный образец, зола.

ИВЗУ (инерционно-вакуумный золоуловитель) [1] принят в качестве образца для аппаратов золоулавливания либо в комплексе с электрофильтром или в качестве самостоятельного устройства для обеспечения экологически чистых выбросов из газоходов промышленных котлов для ИНТЕРАО ЕС России. Получив гарантию устойчивой и эффективной работы ИВЗУ, можно, в дальнейшем, избавиться от электрофильтров, что даст существенную экономию материальных средств, особенно в период эксплуатации золоулавливающих установок, т.к., с точки зрения ремонта, ИВЗУ не требует никаких материальных затрат, чего нельзя сказать об эксплуатации электрофильтров.

Предлагается установка данных аппаратов на предприятиях Омского филиала ТГК-11: ТЭЦ-5 и ТЭЦ-4.

На кафедре теплотехники ОмГТУ создана экспериментальная установка ИВЗУ, в которой определяется степень улавливания золы в зависимости от различных факторов [2].

В работе представлены результаты численного эксперимента при протекании запыленного потока через аппарат ИВЗУ. В математическую модель входят:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0;$$

уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial z} \right), \\ \rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right); \end{aligned}$$

уравнения k-ε модели:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial}{\partial x} (k) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (k) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (k) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t D - \rho \epsilon, \\ \rho u \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \mu_t \frac{\epsilon}{k} D - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}; \end{aligned}$$

уравнение для эффективной вязкости:

$$\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t, \quad \mu_{\Sigma} = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon};$$

уравнение для частиц

Силы, действующие на частицу, которые влияют на её ускорение за счет разницы скоростей между частицей и жидкостью, а также перемещение жидкости с помощью частицы. Уравнение движения для такой частицы было получено Бассетом, Бусси-неском и Озеевом для вращающейся системы отсчета:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_{BA}.$$

Физический смысл сил, находящихся по правую сторону уравнения:

F_D — сила сопротивления, действующая на частицу;

F_B — выталкивающая сила земного притяжения;

F_R — силы, возникающие за счет вращения потока (центробежная и сила Кориолиса).

Силами $F_{VM} - F_R - F_{BA}$ — в данной работе пренебрегают из-за очень малого вклада.

В итоге:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R.$$

В качестве газодинамической модели течения запыленных газов используется двухпараметрическая k-ε модель замыкания системы уравнений Навье — Стокса, алгоритм расчета которой реализован

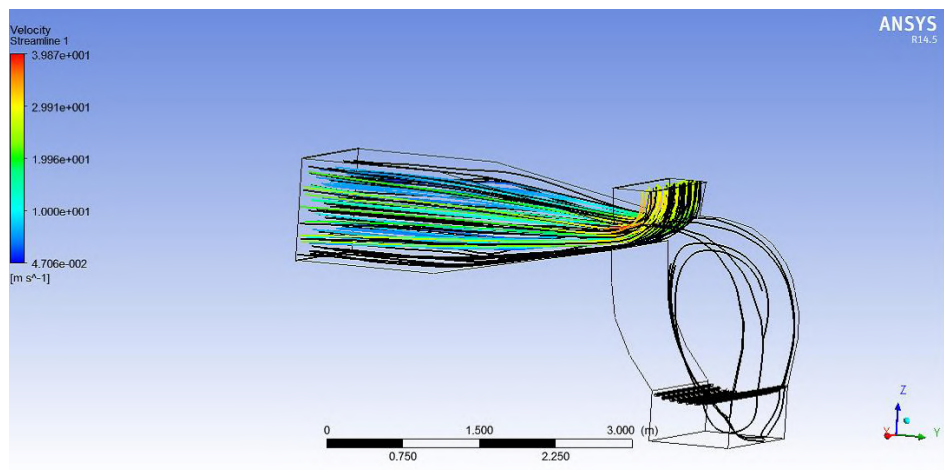


Рис. 1. Увеличенный продолговатый корпус, длинный вход ИВЗУ. КПД=47 %

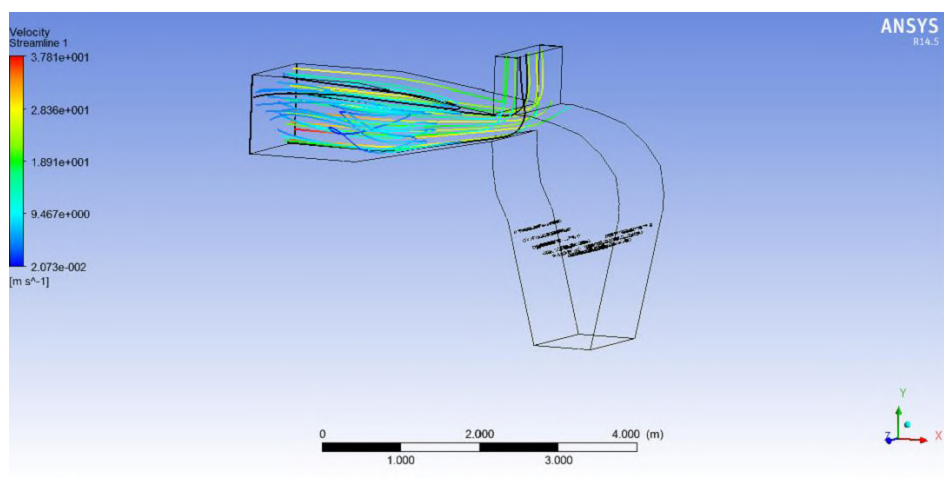


Рис. 2. Продолговатый выход и бункер для золы. КПД=50 %

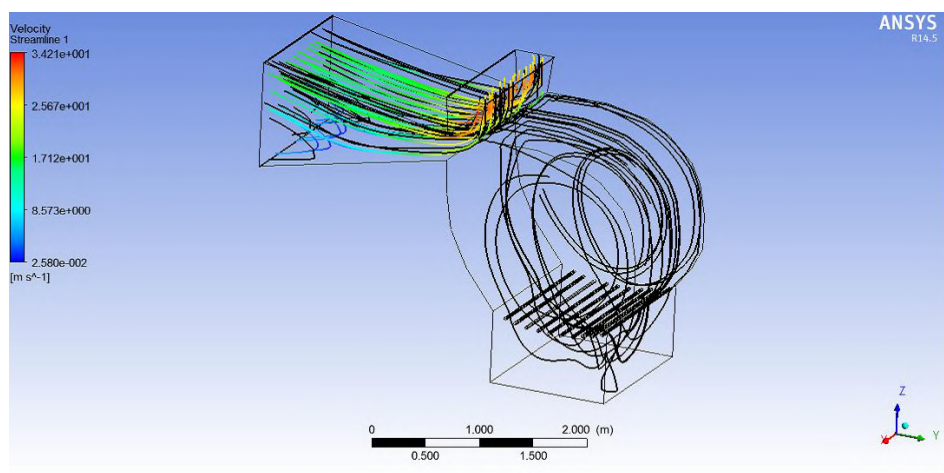


Рис. 3. Более широкий бункер для золы, короткий входной патрубок. КПД=70 %

на хорошо зарекомендовавшем себя программном модуле ANSYS CFX.

С помощью программного модуля ANSYS CFX ранее для расчета были использованы такие граничные условия, как расход уходящих газов с золой 0,0002 кг/с, давление на выходе было принято за атмосферное, рассматривалось поведение частиц диаметром от 5 – 30 мкм, скорость на входе в ИВЗУ равна 20 м/с, температура уходящих газов — 130°C.

Далее было необходимо провести моделирование реальной установки, которая смогла бы встать на котел с определенными параметрами расхода топлива. Целью нового эксперимента является достижение с помощью корректировки геометрических форм установки высоких значений КПД.

Для того чтобы сохранить полученный коэффициент улавливания (99,5 % [3]), были рассчитаны площади на входе в корпус и на выходе из него,

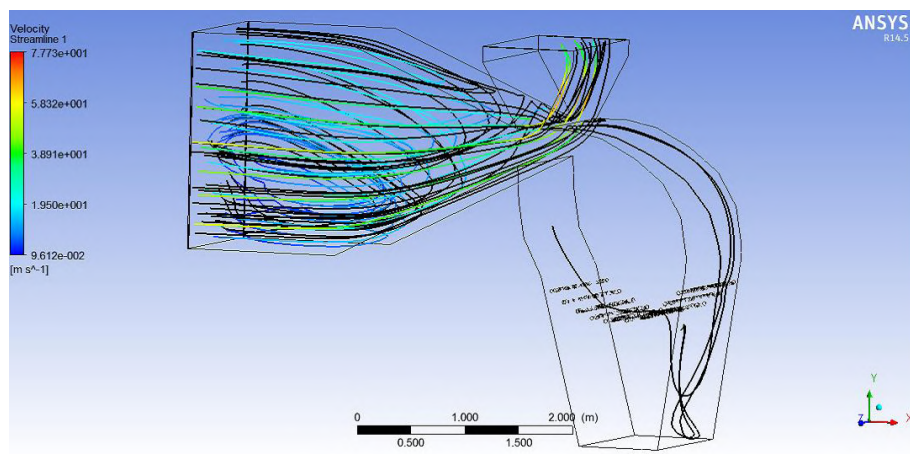


Рис. 4. Модель ИВЗУ, максимально похожая на модельную установку с самым эффективным КПД. КПД=78,7 %

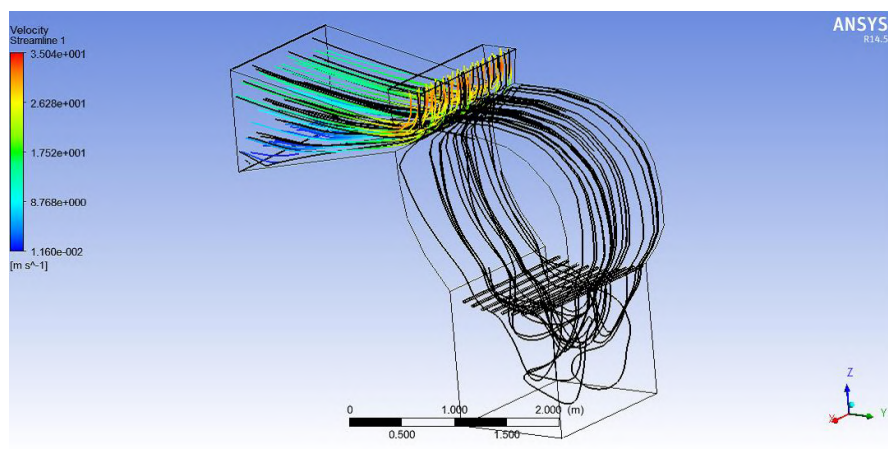


Рис. 5. Короткий входной патрубок. Большой корпус. Большой бункер. КПД=87,44 %

а следовательно, по теории подобия выстроилось отношение расходов (было — 0,0002 кг/с, стало — 130,2 кг/с) и площадей сечения. С помощью этой пропорции были получены размеры двух площадей, соответствующих реальной установке. Однако площади получились настолько большими, что масштабы установки не вписывались в отведенное для нее пространство. Возникла необходимость в адаптации установки под помещение с сохранением ее эффективной работы.

Далее было проведено несколько экспериментов, которые помогли понять, в каком направлении стоит двигаться для развития идеи по улучшению работы с новыми условиями.

На рис. 1 были увеличены входной патрубок по своей длине и корпус установки. Входной диффузор был увеличен для того, чтобы у потока было больше возможности перейти в ламинарное течение, и как раз это свойство, как было видно из предыдущих экспериментов, не раз помогало создать эффективный КПД. Корпус увеличен в высоту, чтобы частицы, залетающие туда под силой собственной тяжести, опускались достаточно низко и не смогли подняться по направлению к выходу. Этот вид установки дал КПД = 47 % (рис. 1).

На рис. 2 были еще больше увеличены корпус установки, бункер для оседания золы и удлинен выходной патрубок. По окончании расчета можно сделать вывод, что чем длиннее входной патрубок в ИВЗУ реального формата, тем больше вероят-

ность, что скорости в 20 м/с на входе не хватает для проталкивания потока между входными сечениями (рис. 2).

На рис. 3 входной патрубок был укорочен, корпус увеличен, а бункер из-за увеличения корпуса стал располагаться ниже и в высоту стал меньше. Уменьшение высоты бункера привело к появлению возвратных потоков на входе в установку. Частицы, которые влетали в корпус установки, не могут глубоко осесть в бункере и вылетают обратно либо и вовсе на выход (рис. 3).

На рис. 4 — прототип модельной установки, стоящей в данный момент на кафедре теплоэнергетики ОмГТУ. Установка была уменьшена до тех размеров, которые позволяли бы разместить ее на станции.

Самым удачным вариантом, который получился на сегодняшний день, была установка с КПД = 87,44 %. У нее короткий входной диффузор, на котором поток успевает ламинаризоваться, большой корпус и бункер для золы, который частицы под действием сил сопротивления, тяжести и закручивания не могут покинуть (рис. 5).

При этом сопротивление всего тракта ИВЗУ лежит в допустимых пределах и полностью сопоставимо с аэродинамическим сопротивлением циклонов соответствующей мощности порядка 500–700 Па.

Дальнейшие эксперименты сопряжены с резко увеличившимся аэродинамическим сопротивлением, что требует нетривиального подхода

к геометрической конструкции ИВЗУ, а это является дальнейшей исследовательской работой.

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что когда расчеты касаются экспериментальной установки малых размеров, которую необходимо реализовать на промышленных станциях, возникает расхождение с результатами, полученными на модельной установке. Такие отклонения и погрешности появляются за счет эффекта большой модели. Для того чтобы ИВЗУ мог показывать более эффективную работу, необходимо для начала реализовать его в виде промышленного образца, а далее производить доведение результатов до тех, что будут устраивать нормы по очистке газов.

Библиографический список

1. Пат. 93298 РФ, МПК⁷ В 01 D 45/06. Инерционно-вакуумный пылеуловитель / Белоглазов В. П. ; заявитель и патентообладатель ООО «Вихрь». — № 2009144229/22 ; заявл. 30.11.09 ; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12. — 6 с.
2. Белоглазов, В. П. Влияние скорости дисперсного потока в конфузормом сечении инерционно-вакуумного пылеуловителя на степень улавливания частиц / В. П. Белоглазов,

М. В. Комаров, А. С. Мозжегоров, А. А. Петрищев, И. В. Рафальский ; под ред. В. В. Шалай, А. С. Ненишева, А. Г. Михайлова, Т. В. Новиковой // Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10 июня 2011 г. — Омск : ОмГТУ, 2011. — С. 92—95.

3. Белоглазов, В. П. Влияние входной скорости в инерционно-вакуумном золоуловителе на степень улавливания золы экибастузского угля / В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 3 (133). — С. 183—197.

БЕЛОГЛАЗОВ Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vpbn@mail.ru

БЕЛОГЛАЗОВА Любовь Владимировна, магистр гр. ТПЭ-613, факультет элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: teplblv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2014 г.

© В. П. Белоглазов, Л. В. Белоглазова

УДК 621.184.82

**В. П. БЕЛОГЛАЗОВ
Л. В. БЕЛОГЛАЗОВА**

Омский государственный
технический университет

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОТОКА ГАЗА НА КАЧЕСТВО УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ЗОЛЫ ИВЗУ

Целью этой статьи является проведение численных экспериментов для определения интервала температур, в котором ИВЗУ мог сохранять КПД, равное 99 % и выше. Для этого была разработана геометрическая модель в SolidWorks и просчитано поведение потока в программе ANSYS CFX. В статье приведены проблема актуальности, граничные условия; визуально видно краевые и математические условия. Выводы прилагаются в конце статьи в виде результатов исследования.

Ключевые слова: инерционно-вакуумный золоуловитель, зола, скорость, высокий КПД.

ИВЗУ (инерционно-вакуумный золоуловитель) [1] принят в качестве образца для аппаратов золоулавливания либо в комплексе с электрофильтром или (в случае достижения устойчивой работы и КПД не ниже 99,5 %) в качестве самостоятельного устройства для обеспечения экологически чистых выбросов из газоходов промышленных котлов для ИНТЕРАО ЕС России.

Получив гарантию устойчивой и эффективной работы ИВЗУ, можно в дальнейшем избавиться от электрофильтров, что даст существенную экономию материальных средств, особенно в период эксплуатации золоулавливающих установок, т.к., с точки зрения ремонта, ИВЗУ не требуют никаких материальных затрат, чего нельзя сказать об эксплуатации электрофильтров.

Предлагается установка данных аппаратов на предприятиях Омского филиала ТГК-11: ТЭЦ-5 и ТЭЦ-4.

На кафедре теплоэнергетики ОмГТУ создана экспериментальная установка ИВЗУ, в которой определяется степень улавливания золы в зависимости от различных факторов. Получены результаты по степени улавливания золы экибастузского угля в ряде случаев не менее 99,5 % [2].

В работе представлены результаты численного эксперимента при протекании запыленного потока через аппарат ИВЗУ. В математическую модель входят:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0;$$

уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial z}), \\ \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial z}), \\ \rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial z}); \end{aligned}$$

уравнения k-ε модели:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial}{\partial x} (k) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (k) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (k) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_t \frac{\partial k}{\partial y}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\mu_t \frac{\partial k}{\partial z}) + \mu_t D - \rho \epsilon, \\ \rho u \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial y}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial z}) + C_{1\epsilon} \mu_t \frac{\epsilon}{k} D - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}; \end{aligned}$$

уравнение для эффективной вязкости:

$$\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t, \mu_{\Sigma} = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon};$$

уравнение для частиц

Силы, действующие на частицу, которые влияют на её ускорение за счет разницы скоростей между частицей и жидкостью, а также перемещение жидкости с помощью частицы. Уравнение движения для такой частицы было получено Бассетом, Буссинеском и Озееном для вращающейся системы отсчета:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_{BA}$$

Физический смысл сил, находящихся по правую сторону уравнения.

F_D — сила сопротивления, действующая на частицу.

F_B — выталкивающая сила земного притяжения.

F_R — силы, возникающие за счет вращения потока (центростремительная и сила Кориолиса).

Силами F_{VM} , F_R , F_{BA} — в данной работе пренебрегают из-за очень малого вклада.

В итоге:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R.$$

В качестве газодинамической модели течения запыленных газов используется двухпараметрическая k-ε модель замыкания системы уравнений Навье — Стокса, алгоритм расчета которой реализован на хорошо зарекомендовавшем себя программном модуле ANSYS-FLUX.

Особенностью данного расчета, в отличие от ранее опубликованных статей по этой тематике, является исследование влияния температуры на качество улавливания золы в ИВЗУ.

Для этого в программном модуле ANSYS-FLUX, были использованы такие граничные условия: расход уходящих газов с золой 0,0002 кг/с, давление на выходе было принято за атмосферное, рассматривалось поведение частиц диаметром от 5–30 мкм, скорость на входе в ИВЗУ равна 20 м/с, температура уходящих газов — 130°C. При этих данных удалось добиться коэффициента улавливания золы, равного 99,8 %.

Ранее процесс рассматривался адиабатным. В этом эксперименте рассчитывается как теплообмен, так и влияние повышения температуры уходящих газов на результаты исследования. Для того, чтобы результаты соответствовали действительности, были введены дополнительные условия, такие как коэффициент теплопередачи — 20 Вт/(м·К), локальная температура (в окружающем золоуловителе помещении) — 30°C.

Уравнение, которое было использовано в программном модуле ANSYS-FLUX, позволяет рассчитать спектральную интенсивность излучения непрозрачного тела

$$I_{\nu}(r_w) I_b(\nu, T) + \frac{\rho_w(r_w)}{\pi} \int_{n \cdot s' > 0} I_{\nu}(r_w s') |n \cdot s'| d\Omega,$$

ν — частота;

r — радиус-вектор,

s — вектор направления;

Таблица 1

Температура потока, °C	Вход частиц	Выход частиц	КПД, %
100	4,29881E-07	2,1348E-10	99,9503
130	4,28616E-07	2,11305E-10	99,9507
200	4,26102E-07	2,07145E-10	99,9514
250	4,24632E-07	2,04813E-10	99,9518
300	4,23327E-07	2,02796E-10	99,9521
350	4,222E-07	2,01109E-10	99,9524
360	4,22E-007	2,0078E-10	99,9524
370	4,21299E-07	2,00423E-10	99,9524
371	4,21748E-07	1,49172E-08	96,4630
373	4,21721E-07	1,48826E-08	96,4710
375	4,21679E-07	1,49302E-08	96,4593
380	4,2159E-07	1,49402E-08	96,4562
390	4,2138E-07	1,50E-008	96,4504
400	4,21186E-07	1,49493E-08	96,4507

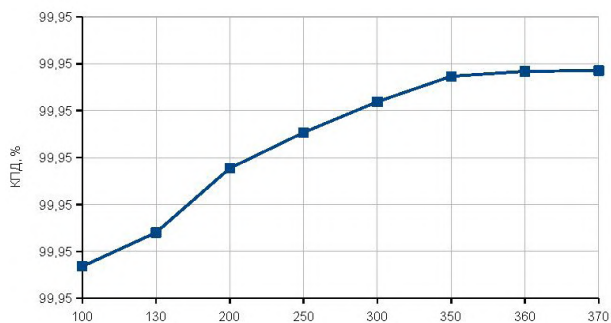


Рис. 1. Влияние повышения температуры уходящих газов на качество улавливания в интервале от 100–370 °C

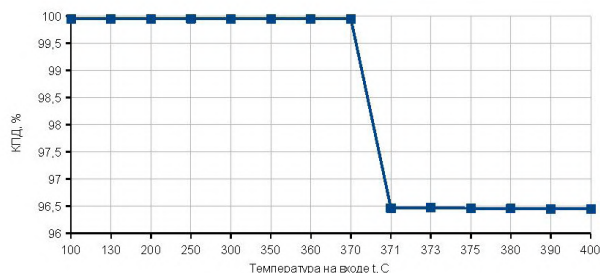


Рис. 2. Влияние повышения температуры уходящих газов на качество улавливания в интервале от 100–400 °C

I_v — спектральная интенсивность излучения;

I_b — интенсивность излучения черного тела;

T — локальная температура;

Ω — телесный угол.

Уравнение энергии, которое было использовано в программном модуле ANSYS CFX, позволяет рассчитывать конвективный тепломассообмен:

$$\rho U C_p \frac{\partial t}{\partial x} + \rho v C_p \frac{\partial t}{\partial y} + \rho w C_p \frac{\partial t}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \lambda_{\Sigma} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_{\Sigma} \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{\Sigma} \frac{\partial t}{\partial z} + d.$$

С использованием этих граничных условий были проведены несколько экспериментов, результаты

которые приведены ниже в табл. 1.

Из рис. 1 видно, что в интервале температур между 100 и 370 °C наблюдается незначительное, но повышение КПД (рис. 1).

Далее наблюдается интересная тенденция резкого падения КПД. Она начинается с отметки в 371 °C (рис. 2).

Гипотетически возможна вероятность того, что падение КПД на 4 % происходит из-за достижения некоего критического значения, при котором псевдо-плотность комплекса (частица золы плюс оболочка адсорбированного газа) становится достаточной для уноса некоторой части очень мелких частиц.

При использовании ИВЗУ для работы на котлах ТЭЦ, сжигающих твердое топливо, нет ограничений по температуре, так как температура уходящих газов на них не превышает 200 °C.

Библиографический список

1. Пат. 93298 РФ, МПК⁷ В 01 D 45/06. Инерционно-вакуумный пылеуловитель / Белоглазов В. П. ; заявитель и патентообладатель ООО «Вихрь». — № 2009144229/22 ; заявл. 30.11.09 ; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12. — 6 с.

2. Белоглазов, В. П. Влияние скорости дисперсного потока в конфузоре сечения инерционно-вакуумного пылеуловителя на степень улавливания частиц / В. П. Белоглазов, М. В. Комаров, А. С. Мозжегоров, А. А. Петрищев, И. В. Рафальский ; под ред. В. В. Шалая, А. С. Ненишева, А. Г. Михайлова, Т. В. Новиковой // Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса : матер. Междунар. науч.-практ. конф., 10 июня 2011 г. — Омск : ОмГТУ, 2011. — С. 92–95.

БЕЛОГЛАЗОВ Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: vpb@mail.ru

БЕЛОГЛАЗОВА Любовь Владимировна, магистр гр. ТПЭ-613, факультет элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: teploblv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2014 г.

© В. П. Белоглазов, А. В. Белоглазова

Книжная полка

621.32/Т23

Татевосян, А. С. Исследование магнитных и электрических характеристик электротехнических устройств с применением программного обеспечения LabView : учеб. пособие для вузов по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» модуль «Электротехника» / А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, В. И. Горбунков. — Омск : ОмГТУ, 2014. — ISBN 978-5-8149-1859-8.

Представлены примеры применения программного пакета LabView для исследования магнитных свойств ферромагнетиков, а также параметров плазмы в газоразрядных ртутных лампах низкого давления. Изложены краткие сведения о магнитных материалах, процессах перемагничивания этих материалов в переменных магнитных полях, экспериментальных методах и технических исследованиях магнитных свойств ферромагнетиков. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 130302 (140400) «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплины «Теоретические основы электротехники», «Комплексы и системы электромеханических и электронных аппаратов» и др. Может быть использовано в программах бакалавриата, магистратуры и элитного образования.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье приведен экспресс-метод определения неэффективных источников и систем теплоснабжения коммунальной энергетики и алгоритм принятия решений по модернизации котельных и тепловых сетей. Также внесено предложение о формировании базы данных ключевых показателей функционирования систем теплоснабжения. Представлены примеры применения экспресс-метода с последующим формированием направления реконструкции для ряда конкретных теплоисточников Омской области.

Ключевые слова: коммунальная теплоэнергетика, технико-экономические показатели, тепловые сети, энергосбережение.

В настоящее время большинство теплоисточников, обеспечивающих тепловой энергией население и социальную сферу, находится на балансе муниципалитетов и эксплуатируется муниципальными предприятиями и частными компаниями по краткосрочным договорам аренды. Ограниченность муниципального и регионального бюджета, тарифная политика государства и незаинтересованность компаний-арендаторов в значительных капиталовложениях привели в последние 3–5 лет к уменьшению качества и объемов ремонтных программ котельных и тепловых сетей и, как следствие, нарастающему износу основных фондов [1].

Начиная с 2009 года по настоящее время был принят ряд основообразующих федеральных законов, направленных на модернизацию энергетической отрасли, в частности: № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении...», № 190-ФЗ от 27 июля 2010 года «О теплоснабжении», постановление Правительства РФ №1075 от 22 октября 2012 года, а также несколько десятков подзаконных актов. Эти нормативные документы предусматривают проведение обязательного энергетического аудита теплоснабжающих организаций, разработку перспективных схем теплоснабжения поселений и городских округов, а также модернизацию теплоснабжающих предприятий путем реализации инвестиционных программ, финансирование которых заложено в долгосрочный тариф (в частности, по методу обеспечения инвестированного капитала). Также предполагается использование энергосервисных контрактов при модернизации оборудования источников и систем теплоснабжения. Однако средняя окупаемость предлагаемых мероприятий с учетом возврата кредитных средств находится на уровне 5–8 лет, потому энергосервис в теплоэнергетике не получил широкого распространения.

Таким образом, основной задачей региональных и муниципальных органов власти является привлечение инвестиций в отрасль. В Омской области курируют вопросы, связанные с теплоснабжением населения и социальной сферы, большое количество ведомств, в том числе министерства строительства и ЖКХ, экономики, финансов, природных ресурсов и экологии, Региональная энергетическая комиссия, администрации муниципальных районов и прочие профильные министерства. В 2014 году начала свое функционирование некоммерческая организация «Фонд энергосбережения Омской области», нацеленная на повышение энергоэффективности потребителей бюджетной сферы. В то же время единый орган, занимающийся обработкой статистических данных, тарифной политикой, программой ремонтов и модернизации объектов теплоэнергетических систем, привлечением частных инвесторов в отрасль, отсутствует.

Исходными данными для вновь образованной структуры могут служить энергетические паспорта теплоснабжающих организаций, схемы теплоснабжения поселений, информация, соответствующая стандартам раскрытия для организаций коммунального комплекса.

Например, в табл. 1 предлагается минимально необходимый перечень исходных данных по каждому теплоисточнику, обеспечивающему тепловой энергией население и социальную сферу, необходимый для комплексной оценки эффективности работы на территории муниципального района или области в целом.

Табл. 1 предлагается дополнить следующими материалами:

1) схема расположения котельных и тепловых сетей на топологической основе муниципального образования;

Перечень исходных данных

1. Установленная тепловая мощность, Гкал/ч;
2. Подключенная тепловая нагрузка, Гкал/ч, в т.ч.:
2.1 потребителей первой категории;
2.2 собственных нужд;
2.3 потерь в тепловых сетях.
3. Наличие приборов учета на теплоисточнике, в т.ч.:
3.1 электроэнергии
3.2 исходной воды
3.3 отпущенной тепловой энергии
3.4 топлива
4. Параметры, полученные по результатам режимно-наладочных испытаний, в т. ч.:
4.1 УРУТ котельной
4.2 ...
5. Марка и год ввода в эксплуатацию основного оборудования
6. Степень износа здания котельной, %
7. Величина годовой выработки тепловой энергии, Гкал/год, в т. ч.:
7.1 полезный отпуск
7.2 ...
8. Протяженность трубопроводов теплосетей, год и способ прокладки, в т. ч.:
8.1 Ду 32
8.2 ...
9. Удельные показатели потребления энергоресурсов, в т. ч.:
9.1 топлива, кг у. т./Гкал
9.2 электроэнергии, кВт·ч/Гкал
9.3 воды, м ³ /Гкал
10. Техничко-экономические показатели работы котельной, в т. ч.:
10.1 ...
11. Величина расчетной тепловой нагрузки потребителей (в т.ч. перспективных), находящихся в радиусе действия теплоисточника и имеющих индивидуальное теплоснабжение, Гкал/ч, в т. ч.:
11.1 Планируемый к размещению детский сад по адресу...
11.2...

2) данные о наличии местных возобновляемых источников (объемы, стоимость, характеристика);

3) данные по возможной газификации (точка подключения, укрупненная сметная стоимость и прочее);

4) предполагаемые индексы изменения цен на энергоресурсы, материалы, оборудование и оплаты труда персонала.

На основе табл. 1 предлагается создать базу данных по всем котельным области (муниципального района), позволяющую выявить теплоисточники (их группу), имеющие наибольший энергетический и экономический потенциал по модернизации. Результатом обработки исходных данных должен стать рейтинг котельных с предварительно введенными и рассчитанными значениями базовых величин, характеризующих эффективность источников теплоснабжения. Рейтинг предлагается разделить на группы по видам используемого топлива: твердое (уголь, дрова), жидкое-газообразное (природный газ, мазут, дизельное топливо), биотопливо (щепы, пеллеты, топливные брикеты). Ранжирование по каждому показателю предполагается проводить от наиболее эффективного (первое место) к наименее эффективному (последнее место) с присвоением баллов согласно сумме мест в рейтинге по каждому критерию сравнения. Наиболее эффективному источнику теплоснабжения соответствует минимальный балл.

В качестве базовых показателей для сравнения предлагается использовать следующие [2]:

1) удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии (УРУТ), кг у. т./Гкал;

2) удельный расход электроэнергии на выработку тепловой энергии (УРЭЭ), кВт·ч/Гкал;

3) удельный расход воды на выработку тепловой энергии (УРВ), м³/Гкал;

4) коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), характеризующий степень загрузки котельной;

5) штатный коэффициент (ШК), чел/МВт, характеризующий степень технологичности процесса производства тепловой энергии;

6) относительные тепловые потери, % от выработанной тепловой энергии;

7) удельная материальная характеристика тепловых сетей (УМХТС), м²/(Гкал/ч), характеризующая загрузженность тепловых сетей;

8) себестоимость полезного отпуска тепловой энергии, р./Гкал.

В табл. 2 приведены базовые показатели сравнения для теплоисточников Муромцевского и Черлакского муниципальных районов и проведено их ранжирование по двум группам в зависимости от типа используемого топлива.

По результатам проведенного сравнения выделены наиболее неэффективные котельные, в частности:

1) котельные ст. Черлак, п. Затон, д. Дурново, с. Кокшенево, характеризующиеся малой степенью загрузки и завышенными диаметрами трубопроводов, что связано с переходом части потребителей на индивидуальное теплоснабжение;

Таблица 2.

Обработка показателей работы котельных Черлакского и Муромцевского районов Омской области

	УРПТ, кг у. т./Гкал	Вал	УРСЭ, кВт·ч/ Гкал	Вал	УРВ, м³/Гкал	Вал	КИУМ	Вал	ШК, чев./МВт	Вал	Относительные потери, % от выработки	Вал	УМХТС, м²/ (Гкал/ч)	Вал	Себестоимость отпуска, руб./ Гкал	Вал	Сумма баланов	Итоговый ранг
Котельные, работающие на твердом топливе (уголь)																		
Квартальная котельная №1 р.п. Муромцево	183,38	4	23,59	6	0,26	8	0,74	3	1,50	3	22,29	6	169,11	10	1361,79	1	41	1
Квартальная котельная №2 р.п. Муромцево	181,88	1	23,17	5	0,27	10	0,88	2	1,80	5	25,20	9	168,44	9	1386,15	2	43	2
Квартальная котельная №3 р.п. Муромцево	182,75	3	30,71	12	0,27	9	0,71	6	1,45	2	29,03	11	187,87	12	1622,86	4	59	5
Котельная ЦРБ р.п. Муромцево	203,63	6	35,69	16	0,14	4	0,46	14	1,23	1	14,68	5	63,41	5	1496,66	3	54	3
Котельная спецшколы р.п. Муромцево	266,52	13	29,47	10	0,38	13	0,66	7	1,93	6	28,94	10	168,36	8	2257,76	6	73	8
Котельная пристани р.п. Муромцево	182,00	2	23,83	7	0,20	5	1,81	1	5,84	19	45,95	14	255,43	14	2420,33	8	70	7
Котельная Артынского детского дома	281,53	15	27,04	8	0,13	3	0,65	9	3,74	16	0,96	3	54,34	3	1979,01	5	62	6
Котельная дома престарелых р. п. Муромцево	191,30	5	6,55	1	0	1	0,50	13	18,43	20	5,33	4	40,71	2	2934,07	12	58	4
Котельная с. Кокшенево	332,15	19	22,66	4	0,83	18	0,05	20	2,83	13	0	1	60,80	4	5930,70	19	98	16
Котельная ЖКХ р. п. Муромцево	206,67	8	17,84	3	0,62	17	0,32	15	3,74	16	23,55	8	132,73	7	3287,75	13	87	12
Котельная с. Мыс	242,97	11	33,68	14	0,22	6	0,58	11	3,31	15	30,78	12	184,18	11	2561,14	10	90	13
Котельная Артынской СУБ	427,50	20	9,32	2	0,05	2	0,25	17	4,96	18	0,00	1	19,94	1	4626,32	18	79	9
Котельная А. Дурново	325,39	18	35,45	15	0,22	7	0,23	18	2,22	9	23,46	7	121,49	6	3854,13	14	94	15
Котельная п. Затон	269,50	14	40,27	18	0,56	15	0,22	19	2,05	8	56,01	18	232,09	13	4533,97	16	121	17
Котельная с. Южно-Подольск	207,50	9	29,33	9	0,31	11	0,73	5	2,00	7	47,82	15	282,39	15	2491,66	9	80	10
Котельная с. Николаевка	207,90	10	32,32	13	0,38	14	0,73	4	1,50	3	48,61	16	301,15	16	2350,44	7	83	11
Котельная с. Татарка	204,12	7	29,83	11	0,34	12	0,59	10	2,50	10	45,01	13	307,09	17	2806,90	11	91	14
Котельная с. Привольное	293,36	16	54,37	20	1,86	20	0,56	12	2,50	10	55,63	17	361,86	18	4006,67	15	128	19
Котельная с. Суворовка	256,50	12	38,34	17	1,22	19	0,66	8	2,50	10	65,71	19	439,30	20	4601,77	17	122	18
Котельная ст. Черлак	307,75	17	52,99	19	0,59	16	0,25	16	2,94	14	67,30	20	408,98	19	9833,26	20	141	20
Котельные, работающие на жидком и газообразном топливе (газ и мазут)																		
Котельная с. Большой Атмас	168,20	3	66,94	4	0,18	1	0,29	2	1,91	4	23,41	1	170,62	1	3012,32	3	19	2
Котельная с. Соляное	156,21	1	34,76	2	1,20	4	0,37	4	0,86	3	60,80	4	398,20	4	2864,02	2	24	4
Котельная с. Красный Октябрь (мазут)	158,91	2	33,21	1	0,43	3	0,30	3	0,67	2	46,59	3	298,66	3	3205,65	4	21	3
Котельная с. Елизаветинка	214,86	4	58,87	3	0,29	2	0,11	1	0,43	1	37,46	2	281,32	2	2496,15	1	16	1

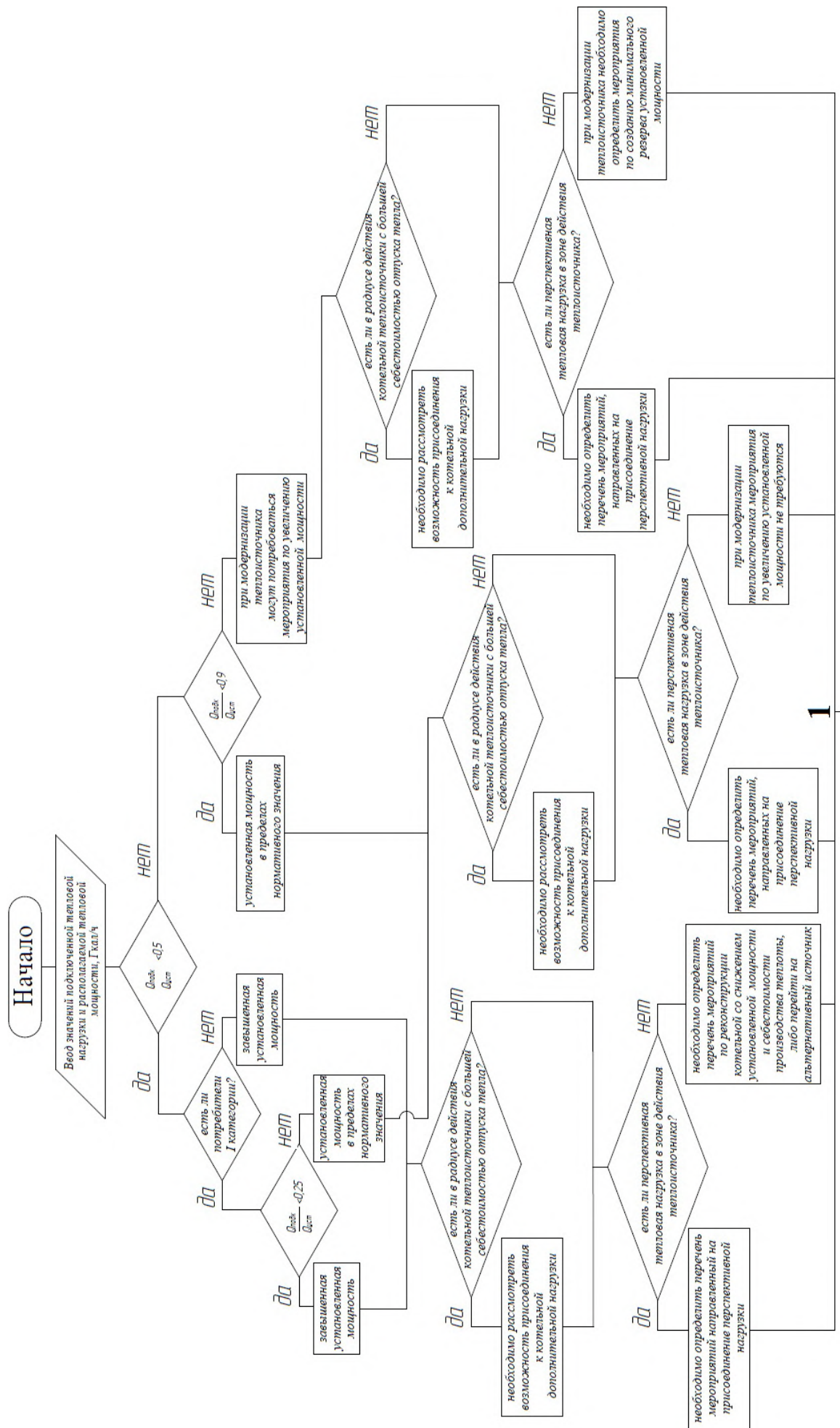


Рис. 1. Алгоритм принятия решения по реконструкции источника теплоснабжения (начало)

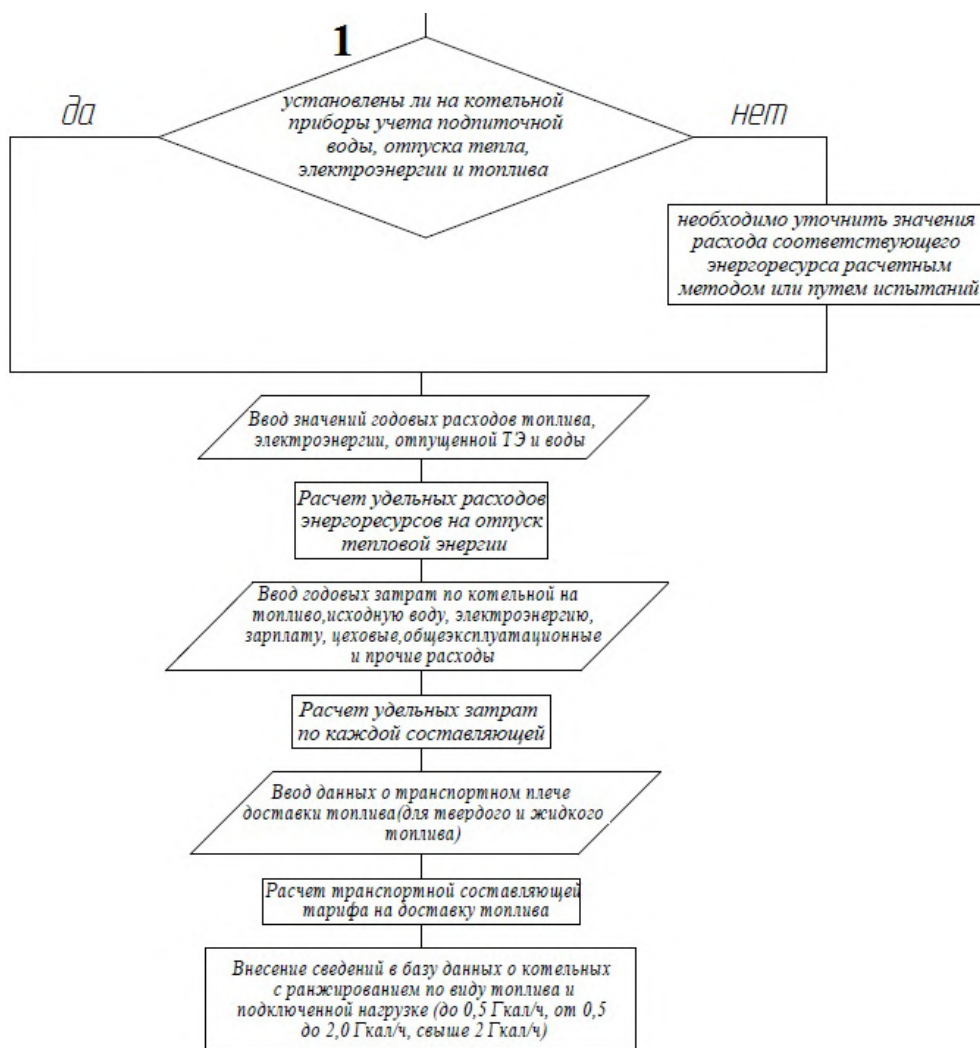


Рис. 1. Алгоритм принятия решения по реконструкции источника теплоснабжения (окончание)

2) котельные с. Суворовка, с. Привольное, Артынской СУБ, спецшколы, характеризующиеся низкой эффективностью сжигания топлива;

3) котельные дома престарелых, пристани и ЖКХ рп Муромцево, характеризующиеся неоправданно высокими затратами на обслуживающий персонал.

С помощью алгоритма (рис. 1) предоставляется возможность принятия одного из следующих решений по модернизации котельных:

1) о возможности присоединения к котельной дополнительной тепловой нагрузки, в т.ч. перспективной, — рекомендуется для котельных ЦРБ и ЖКХ рп Муромцево;

2) о снижении установленной мощности котельной с целью повышения среднегодовой загрузки котлов — рекомендуется для котельных с. Большой Атмас, с. Елизаветинка, с. Кокшенево;

3) о закрытии теплоисточника с целью передачи тепловой мощности более экономичному источнику, в т.ч. на другом виде топлива — рекомендуется для котельной пристани и квартальной котельной № 3, т.к. обе находятся в зонах действия более эффективных источников теплоснабжения;

4) о выдаче рекомендаций по уточнению исходных данных при отсутствии коммерческого учета тепловой энергии и энергоресурсов — рекомендуется для котельных дома престарелых, Артынской СУБ и Артынского детского дома.

Следуя алгоритму (рис. 2), формируется следующий перечень возможных к принятию решений:

1) об оптимизации трассировки тепловых сетей — рекомендуется для тепловых сетей котельных ст. Черлак, с. Суворовка и с. Привольное;

2) о перекладке трубопроводов с подбором оптимальных диаметров — рекомендуется для тепловых сетей квартальной котельной № 3, спецшколы рп Муромцево, с. Соляное и с. Затон;

3) о реконструкции тепловой изоляции трубопроводов — рекомендуется для котельных с. Мыс, с. Южно-Подольск, с. Николаевка;

4) о разработке комплекса мероприятий, направленных на снижение аварийности тепловых сетей.

Выводы:

1. Результаты проведенного исследования хорошо согласуются с результатами энергетических обследований предприятий — МУП Муромцевского района «Теплосеть-1» и МУП Черлакского района «Теплокомунэнерго», проведенных в 2013 году. Это показывает, что предложенный экспресс-метод позволяет выделить наименее эффективные теплоисточники с целью их модернизации, а также предложить мероприятия модернизации. При этом затраты материальных, трудовых и временных ресурсов будут существенно ниже в сравнении с проведением энергоаудита или разработкой перспективной схемы теплоснабжения поселения.

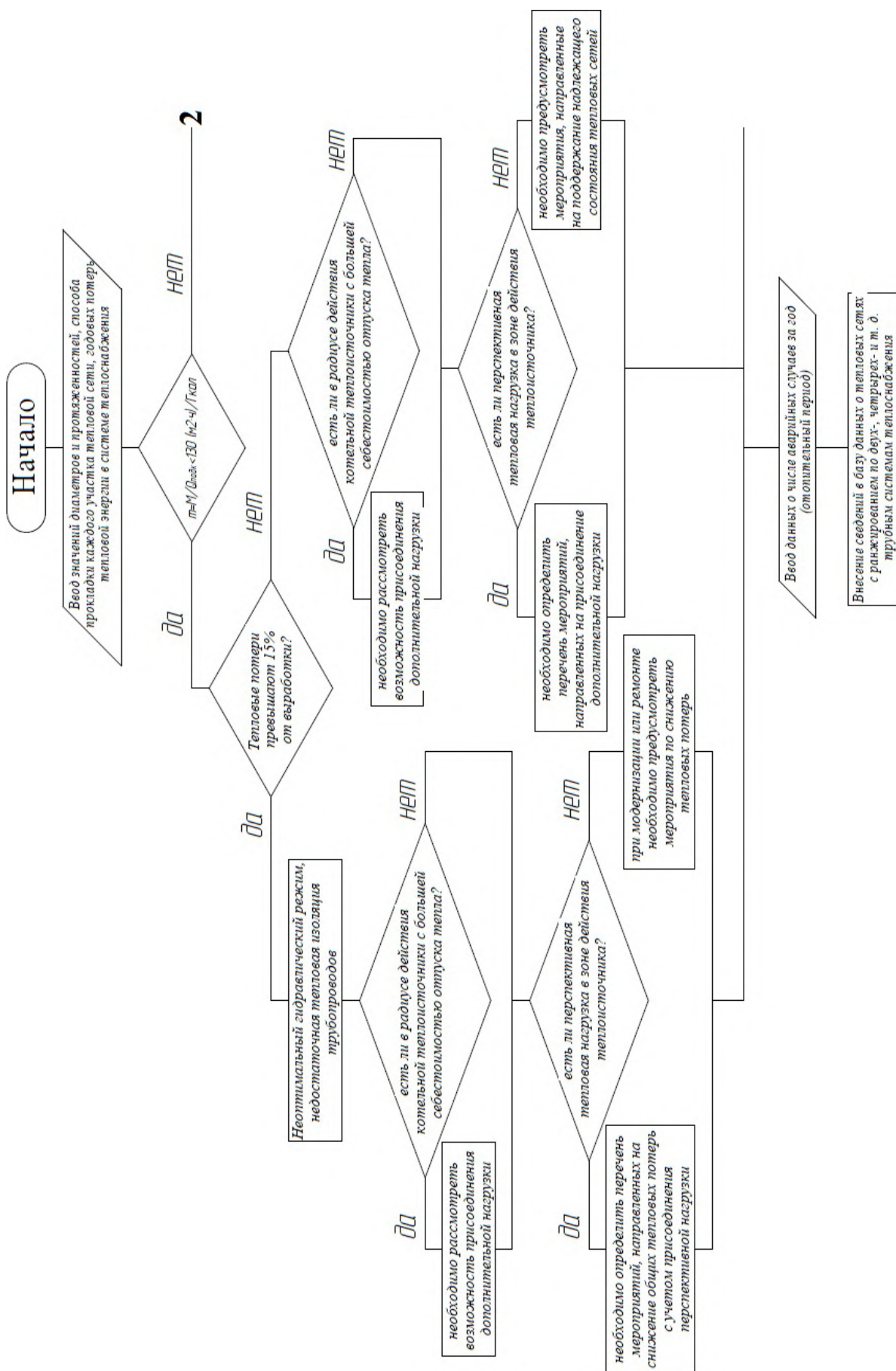


Рис. 2. Алгоритм принятия решения по реконструкции тепловых сетей (начало)

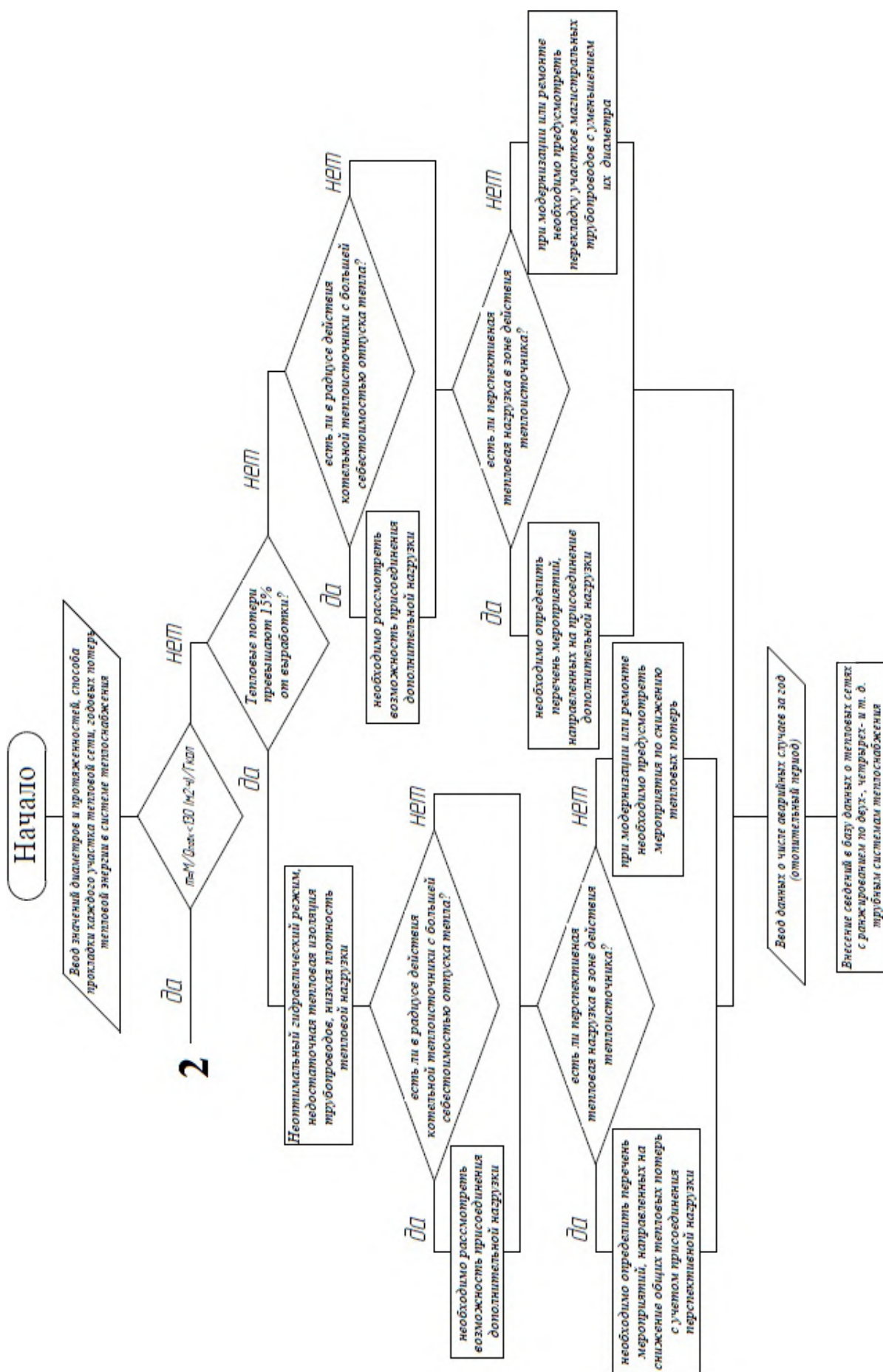


Рис. 2. Алгоритм принятия решения по реконструкции тепловых сетей (окончание)

2. Программное обеспечение, реализованное на основе предложенной экспресс-методики, может быть внедрено в профильных комитетах государственных органов власти на уровне как муниципального района, так и области.

3. Исходные данные, сведенные в базу данных, требуют корректировки после модернизации соответствующих систем теплоснабжения.

Библиографический список

1. Ведрученко, В. Р. Актуальные задачи коммунальной теплоэнергетики Омского региона / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, М. В. Кокшаров, С. С. Рудюк // Омский научный вестник. — 2006. — № 4 (38). — С. 104–108.

2. Об утверждении методических рекомендаций по разработке схем теплоснабжения : приказ Минэнерго Рос-

сии № 565, Минрегиона России № 667 [от 29 декабря 2012 г.]. — URL: http://minenergo.gov.ru/documents/fold13/index.php?ELEMENT_ID=14376 (дата обращения: 19.02.2013).

ГЛУХОВ Сергей Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: svgluk@mail.ru

КОВАЛЕНКО Александр Валентинович, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: direktor@omep.ru

ЧУРИКОВ Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры теплоэнергетики.

Адрес для переписки: mitya.churikov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12.12.2014 г.

© С. В. Глухов, А. В. Коваленко, Д. А. Чуриков

УДК 621.318

**Д. В. РЫСЕВ
П. В. РЫСЕВ
В. К. ФЕДОРОВ
Д. В. ФЕДОРОВ
С. Н. ШЕЛЕСТ
Е. Е. ШМУЛЕНКОВА
А. И. ЗАБУДСКИЙ**

Омский государственный
технический университет
Омский государственный аграрный
университет им. П. А. Столыпина

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС ТУРБОГЕНЕРАТОРА КАК СЛЕДСТВИЕ РЕЖИМА ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проводится сравнение режима детерминированного хаоса в электроэнергетической системе с режимом электромеханического резонанса в системе турбогенератор — компенсированная линия электропередачи. Рассмотрены математические модели различных энергосистем. Полученные результаты позволяют уточнить критерии динамической устойчивости энергосистем в условиях хаотических режимов.

Ключевые слова: электромеханический резонанс, детерминированный хаос, энергосистема.

Для исследования хаотичности некоторой системы рассматривают устойчивость траектории в фазовой плоскости. Если траектория неустойчива, то может присутствовать хаотический режим. Причем неустойчивость обязана быть экспоненциальной. Это означает, что малое возмущение режима $D(0)$ должно во времени увеличиваться по экспоненте [1]

$$D(t) = D(0) e^{\lambda t}, \quad \lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{D(t)}{D(0)}, \quad (1)$$

где λ — показатель Ляпунова.

Если установлено, что исследуемый режим имеет положительный показатель Ляпунова $\lambda > 0$, то следствием будут неперериодичность в зависимости от времени любой из координат состояния, сплошной спектр мощности (в спектре колебаний присутствуют все частоты из некоторого интервала) и спадающая во времени автокорреляционная функция. До недавнего времени с таким поведением указанных характеристик однозначно связывали представления о случайном процессе. Теперь мы

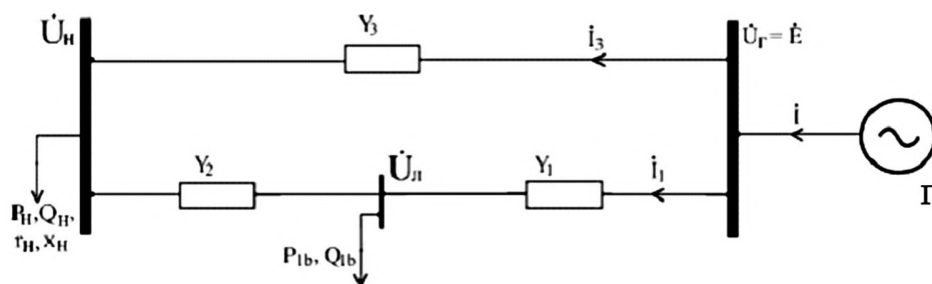


Рис. 1. Изолированная электроэнергетическая система

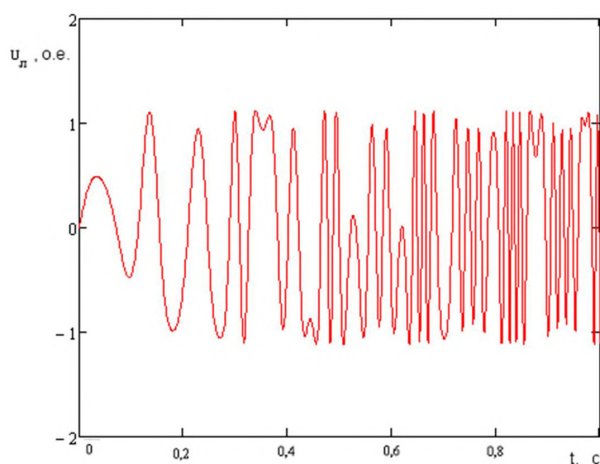


Рис. 2. Хаотические колебания напряжения на шинах нагрузки

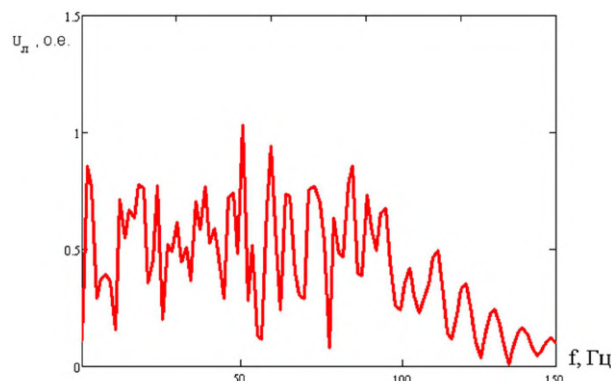


Рис. 3. Спектр хаотических колебаний напряжения на шинах нагрузки

знаем, что подобными свойствами может обладать процесс, порождаемый детерминированными законами. Это обстоятельство и послужило основанием называть такие процессы детерминированным хаосом.

Рассмотрим одноступенчатую электроэнергетическую систему (ЭЭС), показанную на рис. 1. В нее входит генератор, снабжающий энергией динамически изменяющуюся во времени нагрузку и стационарную во времени нагрузку, линия электропередачи.

Математическая модель такой ЭЭС может быть представлена системой дифференциальных уравнений (2) – (10) [2].

$$\dot{\delta} = \omega, \quad (2)$$

$$T_j \frac{\dot{\omega}}{\omega_0} = M_{\text{мех}} - (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d). \quad (3)$$

$$\dot{\Psi}_d + \omega \Psi_q + r \cdot I_d = -U_d = E_d, \quad (4)$$

$$-\dot{\Psi}_q + \omega \Psi_d - r I_q = U_q = -E_q. \quad (5)$$

$$U_f = \Psi_f - i_f \cdot r_f. \quad (6)$$

$$\frac{1}{\omega_0} x_H \dot{I}_d + \frac{\omega}{\omega_0} I_q x_H + I_d r_H = U_d, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\omega_0} x_H \dot{I}_q - \frac{\omega}{\omega_0} I_d x_H + I_q r_H = U_q. \quad (8)$$

$$P_{1b} = \frac{E'_q \cdot U}{x'_d} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_q \cdot x'_d} \sin 2\delta, \quad (9)$$

$$Q_{1b} = \frac{E'_q \cdot U}{x'_d} \cos \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_q + x'_d}{x_q \cdot x'_d} - \frac{U^2}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_q \cdot x'_d} \cos 2\delta. \quad (10)$$

На основании системы дифференциальных уравнений (2) – (10), заданных значений параметров и начальных условий получена оценка наибольшего показателя Ляпунова $\lambda^1[N \cdot \Delta t = 1c] = 0,084$. Ввиду положительного знака величина λ^1 , мы приходим к заключению, что напряжения и отклонения напряжения являются хаотическими колебаниями.

Численное интегрирование (2) – (10) обнаруживает, что напряжение U_λ линии электропередачи колеблется вполне хаотично, как показано на рис. 2. Спектр частот непрерывный широкополосный (рис. 3) [3].

Проведем исследование возникновения режима электромеханического резонанса в системе, представленной на рис. 4. Механическая система (турбина) состоит из: ступени высокого (СВД), ступени низкого (СНД) давления, связей между ступенями (СВН и СНГ) и генератора (Ген). Математическая модель, описывающая электромеханические процессы, происходящие в турбогенераторе, представлена уравнениями (11) – (26) [4].

$$a_{11} \frac{di_d}{dt} + a_{13} \frac{di_f}{dt} = \left[(R_l + R_a) i_d - X_l i_q + e_{cd} + v_0 \sin \delta_r + \omega_r \Psi_q \right] \omega_b, \quad (11)$$

$$a_{22} \frac{di_q}{dt} + a_{24} \frac{di_Q}{dt} = \left[(R_l + R_a) i_q + X_l i_d + e_{cq} + v_0 \cos \delta_r - \omega_r \Psi_d \right] \omega_b, \quad (12)$$

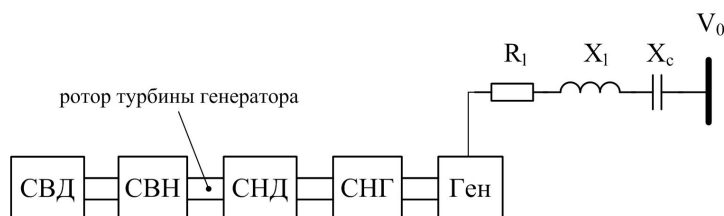
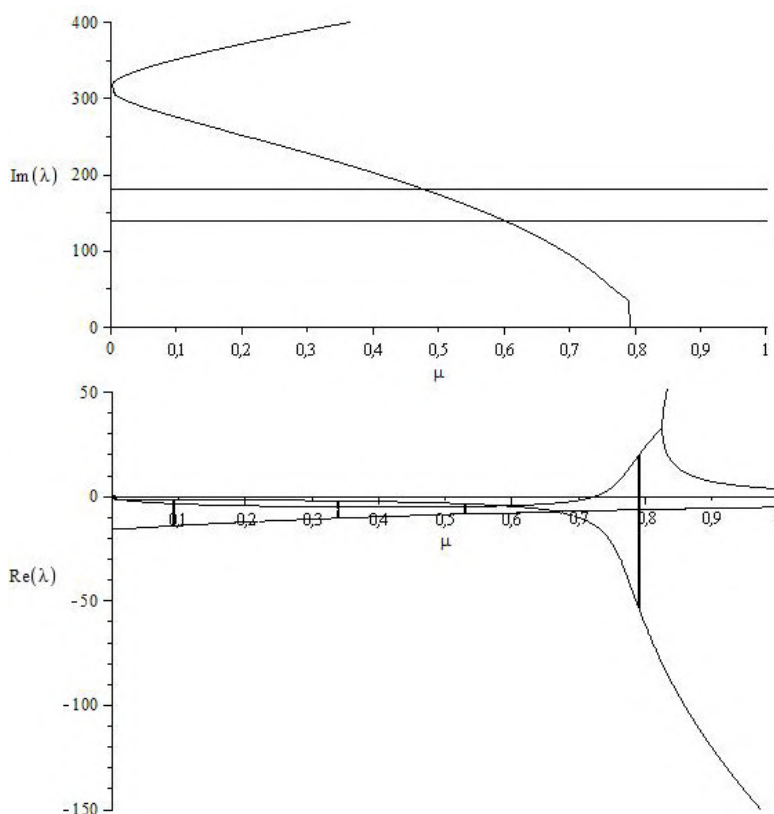
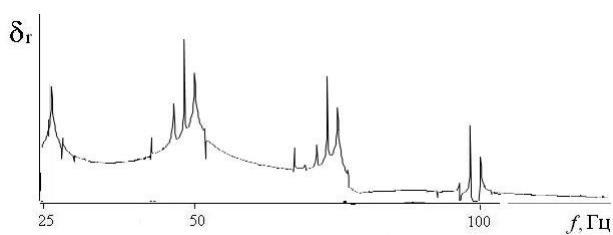


Рис. 4. Схема энергосистемы «турбина — генератор — компенсированная нагрузка»

Рис. 5. Зависимость действительных и мнимых частей собственных значений от μ Рис. 6. Спектр частот разности углов СНГ и Ген при $\mu = 0,852$

$$a_{31} \frac{di_d}{dt} + a_{33} \frac{di_f}{dt} = (v_f - R_f i_f) \omega_b, \quad (13)$$

$$a_{42} \frac{di_q}{dt} + a_{44} \frac{di_Q}{dt} = -R_Q i_Q \omega_b, \quad (14)$$

$$\frac{de_{cd}}{dt} = (\mu X_l i_d + e_{cd} \omega_r) \omega_b, \quad (15)$$

$$\frac{de_{cq}}{dt} = (\mu X_l i_q - e_{cd} \omega_r) \omega_b, \quad (16)$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{M_1} [-D_1(\omega_1 - 1) - K_{12}(\theta_1 - \theta_2)], \quad (17)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = (\omega_1 - 1) \omega_b, \quad (18)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{M_2} \left[-D_2(\omega_2 - 1) + K_{12}(\theta_1 - \theta_2) - K_{23}(\theta_2 - \theta_3) \right], \quad (19)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = (\omega_2 - 1) \omega_b, \quad (20)$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \frac{1}{M_3} \left[-D_3(\omega_3 - 1) + K_{23}(\theta_2 - \theta_3) - K_{34}(\theta_3 - \theta_4) \right], \quad (21)$$

$$\frac{d\theta_3}{dt} = (\omega_3 - 1)\omega_b, \quad (22)$$

$$\frac{d\omega_4}{dt} = \frac{1}{M_4} \left[-D_4(\omega_4 - 1) + K_{34}(\theta_3 - \theta_4) - K_{45}(\theta_4 - \delta_r) \right], \quad (23)$$

$$\frac{d\theta_4}{dt} = (\omega_4 - 1)\omega_b, \quad (24)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{M_5} \left[-D_5(\omega_r - 1) + K_{45}(\theta_4 - \delta_r) + T_m - T_e \right], \quad (25)$$

$$\frac{d\delta_r}{dt} = (\omega_r - 1)\omega_b, \quad (26)$$

где $\mu = X_c / X_r$, $Te = i_q \Psi_d - i_d \Psi_q$, $a_{11} = -\zeta_1 - X_l - X_{le'}$, $a_{22} = -\zeta_2 - X_l - X_{le'}$, $a_{33} = -\zeta_1 + X_{le'}$, $a_{44} = -\zeta_2 + X_{le'}$, $a_{13} = -a_{31} = \zeta_1$, $a_{24} = -a_{42} = \zeta_2$, где $\zeta_1 = d_1 + 2d_2(i_r - i_d) + 3d_3(i_r - i_d)^2$, $\zeta_2 = q_1 + 2q_2(i_q - i_d) + 3d_3(i_q - i_d)^2$, здесь $X_{le'}$, X_{lr} и X_{lo} — реактивности утечки.

Изменяя уровень продольной компенсации μ , можно получить зависимость собственных значений матрицы Якоби, как аналога показателей Ляпунова (рис. 5) [5]. Если действительная часть собственных значений матрицы Якоби положительна, то в системе возможно возникновение электромеханического резонанса. Спектральный анализ разности углов поворота ступеней, представленный на рис. 6, широкополосный и непрерывный, что может свидетельствовать о наличии хаотических режимов в данной системе.

Библиографический список

1. Режимы детерминированного хаоса в нелинейных электроэнергетических системах / В. К. Федоров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2008. — № 9–10. — С. 36–44.
2. Моделирование режимов детерминированного хаоса в электроэнергетических системах / В. К. Федоров [и др.] // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. Спец. вып. — С. 245–247.

3. Федоров, В. К. Спектральный анализ переменных состояния режимов детерминированного хаоса электроэнергетических систем : науч. изд. / В. К. Федоров, П. В. Рысев, Д. В. Рысев, С. И. Смирнов [и др.]. — Омск : Полиграфич. центр Кан, 2014. — 152 с.

4. Федоров, В. К. Современные проблемы нелинейной динамики энергосистем: электромеханический резонанс, энтропия, детерминированный хаос : науч. изд. / В. К. Федоров, П. В. Рысев, С. Ю. Прусс, Д. В. Рысев [и др.]. — Омск : Полиграфич. центр Кан, 2012. — 327 с.

5. Рысев, Д. В. Устойчивость энергосистемы турбина — генератор — нагрузка при возникновении электромеханического резонанса / Д. В. Рысев, В. К. Федоров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (103). — С. 194–198.

РЫСЕВ Дмитрий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

РЫСЕВ Павел Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ОмГТУ.

ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий ОмГТУ.

ФЕДОРОВ Дмитрий Владимирович, магистрант гр. РЗА-613 энергетического института ОмГТУ.

ШЕЛЕСТ Сергей Николаевич, младший научный сотрудник кафедры технологии электронной аппаратуры ОмГТУ.

ШМУЛЕНКОВА Елена Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П. А. Столыпина (ОмГАУ).

ЗАБУДСКИЙ Андрей Иванович, ассистент кафедры технического сервиса, механики и электротехники ОмГАУ.

Адрес для переписки: rysev_dmitry@list.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2014 г.

© Д. В. Рысев, П. В. Рысев, В. К. Федоров, Д. В. Федоров, С. Н. Шелест, Е. Е. Шмуленкова, А. И. Забудский

Книжная полка

Цуканов, В. Волоконно-оптическая техника : практ. рук. / В. Цуканов, М. Яковлев. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2015. — 340 с. — ISBN 978-5-9729-0078-7.

Рассмотрена отечественная волоконно-оптическая компонентная база, предназначенная для жестких условий эксплуатации. Приведены основные технические характеристики, а также методы их измерения, оптических волокон, волоконно-оптических кабелей, оптических соединителей, объединителей, разветвителей, переключателей, пассивных и активных волоконно-оптических линий задержки, дискретных передающих и приемных оптоэлектронных модулей, оптических трансиверов и ретрансляторов. Предложены методы контроля параметров безотказности волоконно-оптических компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронных компонентов. Книга содержит практические рекомендации по построению традиционных и оригинальных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), оптических концентраторов, коммутаторов, медиаконверторов, автономных источников питания узлов подводных ВОСП, волоконно-оптических систем распределения СВЧ сигналов, волоконно-оптических фазовращателей, активных волоконно-оптических линий задержки, оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона, оптоэлектронных АЦП и ЦАП.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией волоконно-оптической техники.

К ВОПРОСУ О СТАНДАРТАХ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Описаны этапы развития в России стандартизации качества электроэнергии. Дается краткое сравнение ГОСТ 13109-97 с введенным в действие стандартом ГОСТ 32144-2013.

Ключевые слова: качество электрической энергии, отклонение напряжения, отклонение частоты.

В июле 2013 года Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта) было принято решение о введении в действие с 2014 года ряда новых стандартов, регламентирующих требования к контролю качества электроэнергии [1].

Так, с января 2014 года начали действовать стандарты, определяющие требования к средствам измерения и методам измерений показателей качества электроэнергии.

В июле 2014 года начал действовать стандарт ГОСТ 32144-2013 [2], определяющий нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения.

С этого момента данный стандарт остался единственным нормативным документом, требованиям которого должна будет соответствовать электрическая энергия, передаваемая потребителям.

Нормативная база в области качества электрической энергии действует в нашей стране уже более 40 лет (рис. 1).

Начало нормированию требований к измерению и контролю качества электроэнергии положил введенный в действие в 1970 году первый отечественный стандарт — ГОСТ 13109-67 «Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения».

В 1987 году была принята, а в 1989 году введена в действие обновленная редакция стандарта ГОСТ 13109-87 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения».

Следующим этапом в эволюции требований к контролю качества электроэнергии стал принятый в 1997 году Международным советом по стандартизации, метрологии и сертификации ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», который действует и в настоящее время. ГОСТ 13109-97 определил основные показатели качества электрической энергии, их нормативные значения, установил интервалы усреднения и отчетный период [3].

В начале 2000-х годов были приняты два руководящих документа, которые установили процедуры выполнения измерений, обработки и представления результатов и стали основой контроля качества электроэнергии в России и СНГ. Это РД 153-34.0-15.501-00 и РД 153-34.0-15.502-2002 — «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Именно эти документы явились базой для разработки и производства многих современных приборов анализа качества электрической энергии.

Необходимо отметить, что зарубежная нормативная база в области контроля качества электроэнергии ранее находилась на более высоком уровне, чем отечественная.

Так, с развитием элементной базы в мире был принят стандарт IEC 61000-4-30, с новыми требованиями на алгоритмы и методики измерения показателей качества электроэнергии.

В Европе была создана необходимая база стандартов для контроля качества электроэнергии после принятия стандарта EN 50160:2010, который определяет основные показатели качества электроэнергии, а также их нормативные значения.

Однако только IEC 61000-4-30 фактически стал основным международным стандартом, который упорядочил методику измерений, требуемые точности, интервалы усреднения и алгоритмы вычисления параметров, а также стал ориентиром для многих производителей анализаторов качества электрической энергии в мире.

С целью сократить отставание отечественной нормативной базы от европейской в 2008 году приняты и с января 2010 года вступили в силу два стандарта по методам измерений показателей качества электроэнергии, основанные на базе международного стандарта IEC 61000-4-30:

— ГОСТ Р 51317.4.30-2008 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии»;

— ГОСТ Р 51317.4.7-2008 «Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям

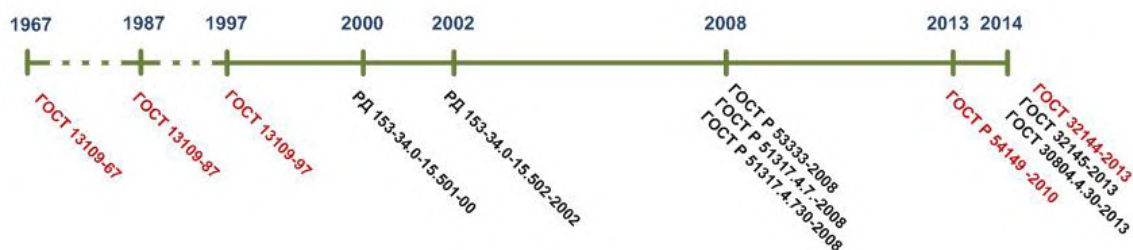


Рис. 1. Этапы развития нормативной базы контроля качества электрической энергии

гармоник и интергармоник для систем электропитания и подключаемых к ним технических средств».

В 2008 году на смену утратившим силу с июля 2007 года РД 153-34.0-15.501-00 и РД 153-34.0-15.502-2002 появился ГОСТ Р 53333-2008, устанавливающий основные положения по организации и проведению контроля качества электроэнергии, который в том числе включал рекомендуемые формы протоколов измерений.

Таким образом, в России появился комплект стандартов, который должен был стать базой для формирования и развития системы контроля качества электрической энергии.

Однако часть положений ранее принятого ГОСТ 13109-97 не согласовывалась с ГОСТ Р 51317.4.30-2008.

Возникла необходимость разработки нового стандарта качества электрической энергии и новых форм отчета, согласованных с принятыми ГОСТ Р 51317.4.30-2008 и ГОСТ Р 51317.4.7-2008.

Новый стандарт качества электрической энергии ГОСТ Р 54149-2010 был введен в действие с января 2013 года.

Данный ГОСТ был разработан с учетом положений принятых стандартов ГОСТ Р 51317.4.30-2008, ГОСТ Р 51317.4.7-2008 и европейского стандарта EN50160, а также специфических требований к электрическим сетям в России.

Однако ввиду отсутствия приборного парка, позволяющего проводить измерения на соответствие вышеуказанному, Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), было принято решение о продлении действия на территории Российской Федерации ГОСТ 13109-97 до 1 июля 2014 года [4].

Таким образом, было установлено, что до 1 июля 2014 года решение о применении ГОСТ Р 54149-2010 или ГОСТ 13109-97 принималось организацией, обеспечивающей поставку электрической энергии.

В связи с вступлением в 2012 году России во Всемирную торговую организацию все требования ГОСТ 54149-2010 должны были приведены к требованиям международных стандартов.

Приказом Росстандарта от 22 июля 2013 г. № 400-ст с 1 июля 2014 года ГОСТ Р 54149-2010 отменяется, и вводится в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

ГОСТ 32144-2013 разработан на основе применения ГОСТ Р 54149-2010 и соответствует европейскому стандарту EN 50160:2010 «Характери-

стики напряжения электричества, поставляемого общественными распределительными сетями». Поэтому постараемся сравнить и выделить некоторые из основных отличий между старым ГОСТ 13109-97 и введенным стандартом ГОСТ 32144-2013 [2, 3].

1. Согласно ГОСТ 32144-2013 все измерения должны быть проведены в соответствии с ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000 4 30:2008) и ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000 4 7:2009). Это принципиальное отличие от ГОСТ 13109-97, позволяющее определить единые требования к построению системы контроля качества электрической энергии.

2. В ГОСТ 32144-2013 есть отличия по интервалам усреднения показателей качества электроэнергии, которые согласованы с ГОСТ 30804.4.30-2013 и для следующих показателей составляют:

- отклонения частоты — интервал усреднения 10 секунд вместо 20 секунд в ГОСТ 13109-97;
- медленные изменения напряжения (ранее «установившиеся отклонения напряжения») — интервал усреднения 10 минут вместо 1-й минуты в ГОСТ 13109-97;
- фликер — изменений по интервалам усреднения нет, 10 минут для кратковременного и 2 часа для длительного фликера;
- несимметрия напряжений — интервал усреднения составляет 10 минут вместо 3-х секунд в ГОСТ 13109-97;
- гармонические составляющие напряжения — интервал усреднения 10 минут вместо 3-х секунд в ГОСТ 13109-97.

Интервал периода измерений по вышеуказанным параметрам установлен в одну неделю вместо одних суток в ГОСТ 13109-97.

3. В ГОСТ 32144-2013 введены новые категории событий:

- прерывания напряжения, определяемые как падение напряжения ниже 5 % опорного напряжения во всех фазах (кратковременные — до 3-х минут, длительные — более 3-х минут);
- интергармонические составляющие напряжения.

4. В ГОСТ 32144-2013 добавлены таблицы классификации провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности и классификации кратковременных прерываний напряжения по длительности. Длительность провалов напряжения определена до 1-й мин.

5. Гармонические составляющие напряжения должны измеряться в соответствии с ГОСТ 30804.4.7-2013, который был разработан на основе международного стандарта IEC 61000-4-7 (включая использование при измерении гармонических подгрупп).

6. В ГОСТ 32144-2013 введен термин, применяемый для обозначения результатов измерений показателей качества электрической энергии и результатов их усреднения на временных интервалах, в пределах которых имели место прерывания, провалы напряжения или перенапряжения — «маркированные данные».

Это понятие применяется для следующих категорий событий:

- отклонение частоты;
- медленные изменения напряжения;
- колебания напряжения;
- гармонические составляющие напряжения;
- несимметрия напряжений.

Маркирование данных позволяет не фиксировать одно и то же событие в нескольких категориях одновременно и учитывать их при подготовке протоколов измерений.

7. В ГОСТ 32144-2013 для медленных изменений напряжения исключены режимы наименьших и наибольших нагрузок.

В ГОСТ 13109-97 для данного показателя качества электрической энергии были установлены нормально допустимые и предельно допустимые величины: $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$, и выход за данные пределы фиксировался соответственно показателями T1 и T2.

Теперь в протоколе указываются только предельно допустимые значения и время выхода за эти пределы — T2. А нормы положительных и отрицательных отклонений напряжений в точке передачи электрической энергии не должны превышать $\pm 10\%$ от номинального или согласованного значения напряжения.

Нельзя забывать, что нормы качества электрической энергии, установленные выбранным энергоснабжающей организацией стандартом, подлежат включению в технические условия на присоединение потребителей электрической энергии и в договоры между электроснабжающими организациями и потребителями электрической энергии.

Контроль и обеспечение качества электроэнергии является сложной технической задачей, по-

этому введение в действие ГОСТ 32144-2013 дает возможность обеспечения условий, при которых отклонения показателей качества электрической энергии не будут превышать установленных для них допустимых значений в точке передачи электрической энергии.

Библиографический список

1. О введении в действие межгосударственного стандарта : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 22 июля 2013 г. № 400-ст.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014.07.01. — М. : Стандартинформ, 2013. — 10 с.
3. ГОСТ 13109—97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 1999.01.01. — М. : Изд-во стандартов, 1998. — 32 с.
4. О продлении действия на территории Российской Федерации ГОСТ 13109-97 : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [от 25 октября 2012 года № 565-ст.]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902377181> (дата обращения: 30.09.2014).

ДЕД Александр Викторович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики.

ПАРШУКОВА Александра Витальевна, магистр гр. ЭЭМ-514 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2014 г.

© А. В. Дед, С. В. Бирюков, А. В. Паршукова

Книжная полка

621.31/T23

Татевосян, А. А. Моделирование электротехнических комплексов и систем : учеб. пособие для вузов по профилю «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / А. А. Татевосян. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 114 с. — ISBN 978-5-8149-1854-3.

Рассмотрены общие вопросы моделирования электрооборудования промышленности. Представлено математическое описание электромагнитных и электромеханических процессов, протекающих в электротехнических комплексах и системах. Указаны подходы к решению задачи моделирования сложных электротехнических комплексов, приведены примеры схмотехнических моделей силового трансформатора и асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, выполнен расчет установившегося режима системы электроснабжения. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 130302 (140400) «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплину «Компьютерные методы расчета установившихся и переходных процессов».

О ПОКАЗАТЕЛЯХ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. НОРМЫ ГОСТ 32144-2013

Рассмотрены актуальные вопросы нормативной документации, характеризующей нормы показателей качества электрической энергии.

Ключевые слова: качество электрической энергии, отклонение напряжения, отклонение частоты.

Электрическая энергия является одним из основных компонентов, необходимых для процесса производства. Качество электроэнергии оказывает значительное влияние на технико-экономические характеристики и надежность работы электрооборудования. Показатели, характеризующие качество электрической энергии, выходя за допустимые пределы в совокупности с другими факторами приводят к экономическим потерям из-за неоптимальной работы электроприемников и увеличению брака продукции.

Качество электроэнергии характеризуется таким понятием, как показатели качества электроэнергии, для каждого из которых установлены свои соответствующие нормы.

Начиная с 1967 года и в последующих редакциях 1987 г. и 1997 г. единственным нормативным документом, устанавливающим в России номенклатуру и нормы показателей качества электрической энергии, и основополагающие требования к контролю, методам и средствам измерений показателей качества электроэнергии, был стандарт ГОСТ 13109 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1].

С 1 января 2013 года в действие вступил в силу, утвержденный еще в конце 2010 года, новый стандарт — ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Тем не менее ввиду объективных трудностей по выполнению требований ГОСТ Р 54149-2010, в том числе и необходимости модернизации приборного парка, позволяющего проводить измерения на соответствие вышеуказанному ГОСТу, Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), в соответствии с Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», приказом от 25 октября 2012 года № 565-ст было принято решение о продлении действия на территории Российской Федерации ГОСТ 13109-97 до 1 июля 2014 г. [2].

Тем же приказом было определено, что до 1 июля 2014 года решение о применении ГОСТ Р 54149-2010 или ГОСТ 13109-97 должна была принимать организация, обеспечивающая поставку

электрической энергии. В связи с вступлением России во Всемирную торговую организацию (ВТО) все требования ГОСТ 54149-2010 должны были соответствовать требованиям международных стандартов.

Однако уже в предисловии к ГОСТ 54149-2010 указано, что в нем лишь учтены основные нормативные положения европейского стандарта EN 50160:2010 и, несмотря на идентичность структуры этих двух стандартов, нормы по отдельным показателям качества электроэнергии значительно отличаются [3].

Это вызвано тем, что в ГОСТ 54149-2010 оставлена часть прежних показателей из ГОСТ 13109-97.

В результате приказом Росстандарта от 22 июля 2013 г. № 400-ст с 1 июля 2014 года ГОСТ Р 54149-2010 был отменен, в связи с принятием и введением в действие с 1 июля 2014 года межгосударственного стандарта ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [4].

ГОСТ 32144-2013 разработан на основе применения ГОСТ Р 54149-2010 и соответствует региональному европейскому стандарту EN 50160:2010 «Характеристики напряжения электричества, поставляемого общественными распределительными сетями» [3, 5].

ГОСТ 32144-2013 устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии в точках передачи электрической энергии пользователем электрической энергии сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц [5]. Оценка соответствия нормам проводится в течение расчетного интервала в одну неделю.

Понятие качества электрической энергии отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных условиях и параметрах электрической энергии: номинальном напряжении, частоте, токе и т.д., поэтому для его нормальной работы должно быть обеспечено энергоснабжение с требуемым качеством электрической энергии [6].

Если показатели качества электрической энергии в точке её передачи не соответствуют требованиям ГОСТ, то потребитель вправе предъявить претензии к электросетевой организации. С другой

стороны, в электрической сети потребителя также должны быть обеспечены условия для выполнения требований ГОСТ при электроснабжении собственных электроприемников.

В целом же показатели качества электрической энергии определяют степень искажения напряжения электрической сети из-за изменения нагрузки, влияния кондуктивных помех (распределяющихся по элементам электрической сети), создаваемых отдельными видами оборудования и возникновения неисправностей, вызываемых, главным образом, внешними событиями.

Снижение качества электроэнергии обуславливает [7–10]:

- увеличение потерь в элементах электрической сети;
- ускоренное сокращение срока службы изоляции;
- рост потребления электроэнергии и требуемой мощности электрооборудования;
- нарушение работы и ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики;
- перегрев вращающихся машин;
- сбои в работе электронных систем управления,
- сбои в работе вычислительной техники;
- вероятность возникновения замыканий из-за ускоренного старения изоляции машин и кабелей;
- появление опасных уровней наведенных напряжений на проводах и тросах высоковольтных линий электропередачи, находящихся вблизи действующих;
- помехи в теле- и радиоаппаратуре;
- некорректная работа счетчиков электрической энергии.

Одна часть показателей качества электрической энергии характеризует помехи, продолжительно изменяющие характеристики напряжения, вносимые установившимся режимом работы электрооборудования энергоснабжающей организации и потребителей, т.е. вызванные особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

К ним относятся отклонения частоты, медленные изменения напряжения, искажения синусоидальности формы кривой напряжения, несимметрия и колебания напряжения.

Для их нормирования в ГОСТ 32144-2013 установлены показатели и нормы качества электрической энергии.

Другая часть показателей качества электрической энергии характеризует кратковременные помехи, возникающие в электрической сети в результате коммутационных процессов, грозовых и атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики, запланированных работ в электрических сетях, послеаварийных режимов. К ним относятся провалы напряжения и перенапряжения, импульсные напряжения, кратковременные прерывания напряжения.

Для этих показателей допустимых численных значений ГОСТ 32144-2013 не устанавливает, а приводит лишь справочные данные. Однако такие параметры, как амплитуда, длительность, частота, должны измеряться и составлять статистические массивы данных, характеризующие конкретную электрическую сеть в отношении вероятности появления случайных событий (кратковременных помех). Как уже отмечалось выше, требования ГОСТ 32144-2013 характеризуют качество электроэнергии

параметрами (частоты и напряжения) в точках передачи электрической энергии.

Под отклонением частоты понимают изменение опорной частоты электрической системы от его определенной номинальной величины. Значение частоты напряжения является общесистемным параметром и определяется балансом активной мощности в системе.

Жесткие требования ГОСТ 32144-2013 к отклонениям частоты питающего напряжения обусловлены возможным влиянием частоты на режимы работы электрооборудования и ход технологических процессов производства.

Напряжение в узле электроэнергетической системы определяется балансом реактивной мощности по системе в целом и балансом реактивной мощности в узле электрической сети. Медленные изменения напряжения (под этим термином понимается отклонение напряжения, как правило, продолжительностью более 1 мин) ГОСТ 32144-2013 нормируются только для электрических сетей низкого напряжения 380/220 В.

В электрических сетях среднего и высокого напряжения ГОСТ 32144-2013 рекомендует принимать в качестве номинального согласованное для конкретного пользователя электрической сети напряжение при технологическом подключении в качестве напряжения питания.

Несинусоидальность напряжения, обусловленная, как правило, нелинейными нагрузками потребителей электрической энергии, в ГОСТ 32144-2013 характеризуется гармоническими составляющими напряжения, и определяется значениями коэффициентов гармонических составляющих напряжения вплоть до гармоники 40-го порядка.

В связи с ростом применения в электроустановках частотных преобразователей актуальным является вопрос о нормировании уровня интергармонических составляющих напряжения. Однако вплоть до настоящего времени допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания, в том числе и в ГОСТ 32144-2013, не определены и находятся на рассмотрении.

Несимметрия напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети. Наиболее часто несимметрия напряжений возникает из-за неравенства нагрузок фаз. Несимметричные токи нагрузки, протекающие по элементам системы электроснабжения, вызывают в них несимметричные падения напряжения. Вследствие этого на выводах электроприемников появляется несимметричная система напряжений [11, 12].

Показателями качества электрической энергии, относящимся к несимметрии напряжений являются коэффициенты несимметрии напряжений по обратной или нулевой последовательности соответственно.

Для провалов напряжения ГОСТ 32144-2013 установлена лишь их длительность (от 10 мс до 1 мин) и представлены статистические данные об относительной дозе провалов разной глубины в общем числе провалов, но не приведены статистические данные о числе провалов за единицу времени (неделю, месяц и т. п.).

По перенапряжениям и импульсным напряжениям ГОСТ 32144-2013 нормы не устанавливает, но предоставляет справочную информацию по их оценке и определению, а также сведения о возмож-

ных их значениях в сетях низкого, среднего и высокого напряжения.

Показатели качества электрической энергии, численные значения норм на которые есть в ГОСТ 32144-2013, должны быть отражены в договорах на электроснабжение. В том числе необходимо при заключении вышеуказанных договоров указывать величину допустимого вклада в значение рассматриваемого показателя качества электрической энергии в точке ее передачи.

Несмотря на введение с 1 июля 2014 года ГОСТ 32144-2013, реализация его требований вызывает определенную обеспокоенность. Неблагоприятная обстановка в области нормативной базы по контролю, анализу и средствам измерения качества электроэнергии привела к потере интереса к контролю качества электроэнергии не только в промышленности, но и в других отраслях нашей экономики.

Тем не менее нельзя не учитывать тот факт, что с введением ГОСТ 32144-2013 вопрос о поддержании качества электрической энергии, в условиях нынешнего состояния энергосистем, становится актуальным не только для энергоснабжающих организаций, но также и для потребителей.

Теперь обеим сторонам систем электроснабжения необходимо учитывать, что экономические характеристики работы электрооборудования, безопасность и бесперебойность электроснабжения и, в большинстве случаев, количество и качество выпускаемой продукции существенно зависят от качества электроэнергии, передаваемой в распределительных сетях.

Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 1999.01.01. — М.: Изд-во стандартов, 1998. — 32 с.
2. О продлении действия на территории Российской Федерации ГОСТ 13109-97: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [от 25 октября 2012 года № 565-ст]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902377181> (дата обращения: 30.09.2014).
3. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. — URL: <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030240038> (дата обращения: 30.09.2014).
4. О введении в действие межгосударственного стандарта: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 22 июля 2013 г. № 400-ст.

5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014.07.01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 10 с.

6. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. — Введ. 2012.08.01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 62 с.

7. Горюнов, В. Н. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник / В. Н. Горюнов, Д. С. Осипов, А. Г. Лютаевич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. — С. 268–273.

8. Горюнов, В. Н. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник / В. Н. Горюнов, А. Г. Лютаевич, Д. С. Осипов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2009. — № 6. — С. 20–24

9. Схематические решения активной фильтрации кривой тока в четырехпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии / С. Ю. Долингер, В. Н. Горюнов, А. А. Планков, О. А. Сидоров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (103). — С. 214–217.

10. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / А. Г. Лютаевич, В. Н. Горюнов, С. Ю. Долингер, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 168–173.

11. Дед, А. В. Экспериментальное исследование влияния несимметричной нагрузки на систему электроснабжения / А. В. Дед, Е. Н. Еремин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 1 (77). — С. 133–138.

12. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке / А. В. Дед, А. И. Волынкин, М. Ю. Денисенко, Н. В. Кириченко, Е. С. Сухов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 157–158.

ДЕД Александр Викторович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

ПАРШУКОВА Александра Витальевна, магистрант гр. ЭЭМ-514 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: ded_av@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2014 г.

© А. В. Дед, А. В. Паршукова

ИСТОЧНИКИ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ДОБЫЧИ НЕФТИ ИЗ ГЛУБИННЫХ СКВАЖИН

Проведено исследование типовой скважины № 118 механизированной добычи нефти Ермаковского месторождения, состоящая из комплекса наземного и подземного электрооборудования. На скважине источником гармонических составляющих является узел нагрузки сети (0,4–2) кВ СУ «Электон-05». Для осциллографирования несинусоидальных токов и напряжений разработана поисковая система измерений с использованием анализатора качества электрической энергии серии АКЭ-823 на основе Windows CE. Анализ полученного комплекса данных позволило выявить повышенные коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения на стороне 0,4 кВ (ввод) промышленного трансформатора. Приведен гармонический состав тока и напряжения в исследуемых точках.

Ключевые слова: электрическая сеть, промышленный трансформатор, коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, несинусоидальность напряжения, система измерений, эксперимент.

Значительная часть месторождения нефти в России имеет низкие пластовые давления вследствие истощенности из-за многолетней эксплуатации нефтяных пластов, а также большую глубину залегания последних, превышающую во многих случаях 3500 м и требующую использования механизированной добычи нефти [1]. Погружные установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) обеспечивают эффективную механизированную добычу нефти из глубинных скважин благодаря отсутствию длинной движущейся механической связи (штанги) между электроприводом и насосом. УЭЦН также эффективны на месторождениях с большим содержанием свободного газа и механических примесей в отключаемой пластовой жидкости, с отложением солей на элементах погружного оборудования.

Областью исследования является действующая типовая скважина № 118 механизированной добычи нефти (куст 32) Ермаковского месторождения. Электрооборудование, сети систем электроснабжения, связи и автоматики этой скважины представляют электротехнический комплекс, который содержит наземное и погружное электрооборудование.

К наземным электроустановкам относятся комплектная трансформаторная подстанция наружной установки (КТПН), станция управления (СУ) серии «Электон-05» и промышленный трансформатор типа ТМПНГ 250/3. Электроснабжение глубинной

скважины осуществляется по воздушной линии (ВЛ) электропередачи напряжением 6 кВ. Погружное электрооборудование УЭЦН состоит из многоступенчатого электроцентробежного насоса типа ЭЦН-5-125-1700 с электродвигателем типа ПЭД-57-117. Дебит насоса составляет 125 м³/сутки, допустимый напор — 1700 метров водяного столба.

Источником высших гармонических составляющих напряжения в узле нагрузки сети (0,4–2) кВ является СУ «Электон-05», силовой канал которой представляет двухступенчатый преобразователь энергии, обеспечивающий частотное регулирование вращением погружного электродвигателя. Для осциллографирования несинусоидальных токов и напряжений разработана поисковая система измерений, основной задачей которой является регистрация событий в характерных точках сети (рис. 1). Применяются только сертифицированное электрооборудование и средства измерений. Используется анализатор качества электрической энергии серии АКЭ-823, который разработан на основе Windows CE в соответствии с директивой Международной электротехнической комиссии (МЭК 61010). Анализатор имеет математическое обеспечение для первичной обработки результатов измерений.

Математическая обработка осциллограмм трехфазных токов и напряжений, полученных с помощью 1-й системы измерений на входе 0,4 кВ СУ «Электон-05», показала присутствие в сети 61-й

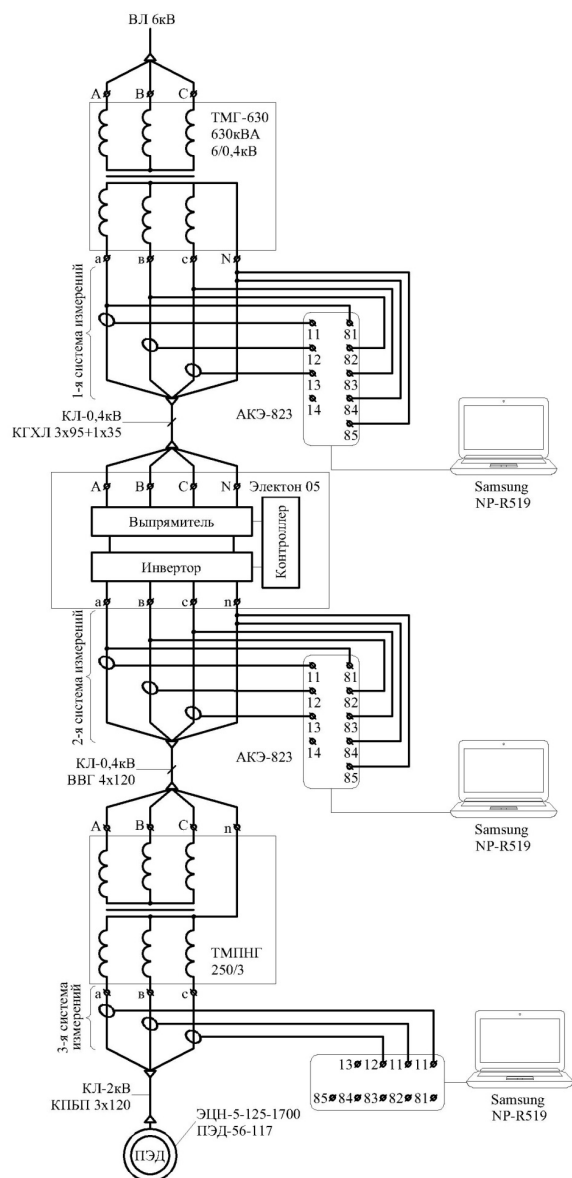


Рис. 1. Электрическая схема подключения систем измерения параметров электромагнитной обстановки в сети (0,4–2) кВ механизированной добычи нефти

гармоники тока и напряжения. Наглядное представление о соотношениях в фазе А высших гармоник (до 15-й включительно) напряжения и тока дает рис. 2.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U в исследуемой точке сети 0,4 кВ составляет в фазе А 3,59 %, В — 3,85 % и С — 3,59 %. Значения K_U не превышают нормально допустимого значения (8 %) [2]. Поэтому кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха (ЭМП) по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения не обнаружена.

Наибольшие коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ наблюдаются у нечетных гармоник, не кратных трем. Однако все они меньше нормально допустимых значений. Например, $K_{U(5)} = 2,56$ % меньше нормально допустимого значения (6 %) в 2,34 раза и т.д. В связи с этим кондуктивные низкочастотные ЭМП по коэффициентам n -х гармонических составляющих напряжения также отсутствуют.

Коэффициент гармоник тока K составляет в фазе А 46, В — 46,3 %, С — 47,26 %. Этот коэффициент превышает суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в фазе А в 12,8 раза, В — 12 раз, С — 13,2 раза. Хотя коэффициент K_I в электрической сети 0,4 кВ не нормируется, но очевидно, что такой гармонический состав тока нагрузки снижает качество функционирования электрической сети [3].

Гармонический анализ искажений синусоидальных токов и напряжений на входе 0,4 кВ промышленного трансформатора типа ТМПНГ 250/3, полученных 2-й системой измерения, выделяет 64 гармоники напряжения и только 17 гармоник тока. Наглядное представление о соотношениях действующих значений высших гармоник напряжения и тока (до 15-й гармоники включительно) дает рис. 3.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на стороне 0,4 кВ (ввод) промышленного трансформатора типа ТМПНГ 250/3 составляет в фазе А 71,45 %, В — 70,95 %, С — 72,06 %. Значение K_U в фазе А превышает нормально допустимое (8 %) в 8,9 раз, В — 8,8 раз, С — 9 раз [2].

Значит, во всех фазах электрической сети действуют кондуктивные низкочастотные ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических

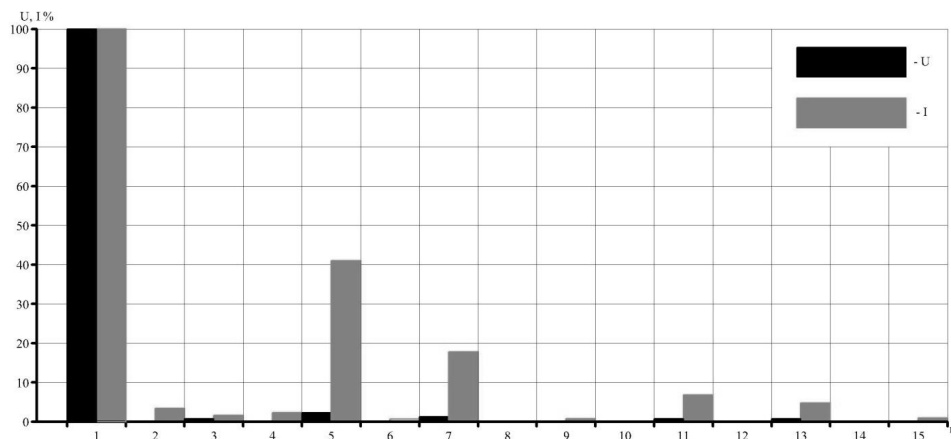


Рис. 2. Гармонический состав тока и напряжения фазы А сети 0,4 кВ на входе станции управления «Электрон-0,5» (1-я система измерений)

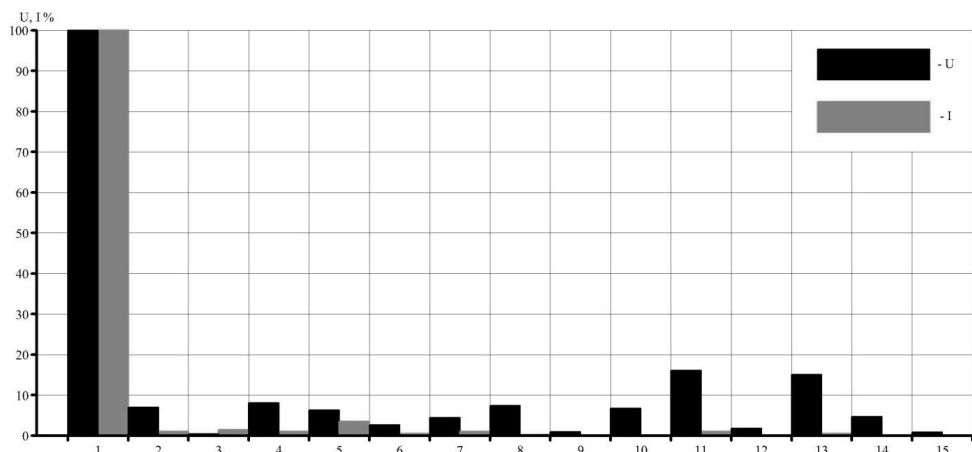


Рис. 3. Гармонический состав тока и напряжения фазы А сети 0,4 кВ на выходе станции управления «Электрон-0,5» (2-я система измерений)

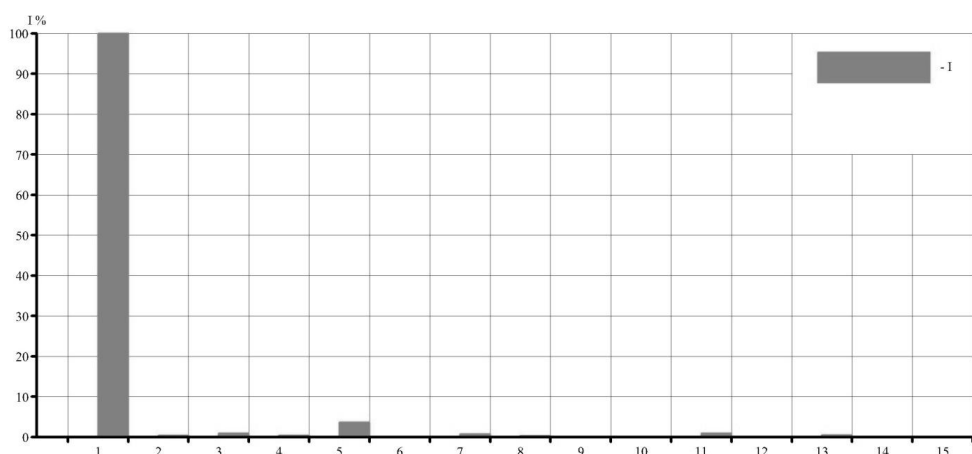


Рис. 4. Гармонический состав тока фазы А сети 2 кВ питания погружного электродвигателя (3-я система измерений)

составляющих напряжения. Изоляция первичной обмотки промышленного трансформатора работает в сложной электромагнитной обстановке, обусловленной гармоническим воздействием.

Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения, кроме 3-й гармоники, превышают свои нормально допустимые значения [2]. Наибольший коэффициент 11-й гармоники (16,67 %) превышает допустимое значение (3,5 %) в 4,76 раза, а наименьший коэффициент 34-й гармоники (0,35 %) превышает допустимое значение (0,2 %) в 1,75 раза. В этой части электрической сети 0,4 кВ действуют кондуктивные низкочастотные ЭМП по коэффициентам n -х гармонических составляющих напряжения [3].

Коэффициент гармоник тока K_I нагрузки промышленного трансформатора составляет в фазе А 6,46 %, В — 6,26 %, С — 5,99 %. Этот коэффициент меньше суммарного коэффициента гармоник напряжения в фазе А в 11,06 раза, В — 11,33 раза, С — 11,72 раза.

Третья система измерений осциллографировала и обрабатывала осциллограммы тока нагрузки погружного электродвигателя типа ПЭД 56-117. Осциллографирование напряжений в сети 2 кВ не осуществлялось. Высшие гармонические составляющие напряжения в этой точке сети с доста-

точной точностью представления можно оценить по результатам измерения 2-й системы. На рис. 4 представлен спектр высших гармоник тока до 15-й включительно. Коэффициент гармоник тока K_I в сети 2 кВ составляет в фазе А 6,06 %, В — 6,13 %, С — 6,15 %.

Таким образом, натурный пассивный эксперимент, поставленный в производственных условиях, позволяет оценить гармоническое воздействие на изоляцию сетей и электрооборудования узла нагрузки глубинной скважины по добыче нефти:

— суммарные коэффициенты высших гармонических составляющих напряжения по фазам сети 0,4 и 2 кВ с вероятностью 0,95 превышают нормально допустимое значение (8 %) в 8,8–9 раз;

— наибольший коэффициент 11-й гармоники напряжения с вероятностью 0,95 превышает допустимое значение (3,5 %) в 4,76 раза, а наименьший коэффициент 34-й гармоники напряжения превышает с вероятностью 0,95 допустимое значение (0,2 %) в 1,75 раза.

В связи с этим, для повышения надежности и экономичности работы установки механизированной добычи нефти из глубинных скважин рекомендуется подавить гармоническое воздействие на сеть и электрооборудование с помощью специальных технических средств [3].

1. Ковалев, А. Ю. Опции станций управления погружными установками электроцентробежных насосов для добычи нефти / А. Ю. Ковалев, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин. — Омск : ОмГТУ, 2012. — 48 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ). — Введ. 2014.07.01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 16 с.
3. Данилов, Г. А. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г. А. Данилов, Ю. М. Денчик, М. Н. Иванов, Г. В. Ситников ; под ред. В. П. Горелова и В. Г. Сальникова. — Новосибирск : НГАВТ, 2013. — 559 с.

КОВАЛЕВА Наталья Александровна, преподаватель кафедры электрической техники Нижневартовского филиала Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

ДЕНЧИК Юлия Михайловна, кандидат технических наук, докторант кафедры электроэнергетических систем и сетей Новосибирской государственной академии водного транспорта.

АНИКИН Василий Владимирович, старший преподаватель кафедры электрической техники Нижневартовского филиала ОмГТУ.

Адрес для переписки: elteh.omgtu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.12.2014 г.

© Н. А. Ковалева, Ю. М. Денчик, В. В. Аникин

УДК 621.311.001.57

В. В. ЭРБЕС

Омский государственный
университет путей сообщения

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В статье разработан алгоритм расчета экономии электрической энергии за счет внедрения энергосберегающих устройств и технологий в сетях электроснабжения железных дорог. Алгоритм включает в себя методы корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа и непараметрические методы математической статистики.

Ключевые слова: энергосберегающие устройства и технологии, влияющий фактор, алгоритм, F-критерий, критерий Крамера—Уэлча, критерий Вилкоксона.

В настоящее время по инвестиционному проекту «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» на объектах тяговых и нетяговых железнодорожных потребителей ОАО «РЖД» ежегодно внедряется несколько тысяч энергосберегающих технических средств и технологий на сумму 2,0–3,0 млрд рублей.

Исследования последнего времени показали, что большинство применяемых способов оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий имеют существенные недостатки. Как правило, экономия электроэнергии рассчитывается как разность потребляемой электрической энергии до и после внедрения энергосберегающего устройства и технологии без учета производственных и других сопутствующих факторов [1].

В данной статье решается задача разработки алгоритма расчета экономии электрической энергии за счет внедрения энергосберегающих устройств или технологий с учетом влияющих факторов. Для решения поставленной задачи использовались методы корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа и непараметрические методы

математической статистики. На рис. 1 представлена структурная схема обработки данных и расчета экономии электрической энергии от внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

Алгоритм состоит из семи этапов:

1. Сбор данных, полученных до внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

На данном этапе производится анализ всего перечня электрооборудования и деление его на две группы с постоянной и переменной электрической нагрузкой [2]. Это требуется для формирования перечня исходных данных. В группу с постоянной нагрузкой входит электрооборудование, которое работает постоянно и потребляет одинаковый уровень электроэнергии (системы железнодорожной автоматики, телемеханики и связи и т.д.). Ко второй группе относится электрооборудование, работающее в различных режимах (освещение, электроотопление, электродвигатели и т.д.). Как правило, режим работы оборудования зависит от производственных и климатических факторов.

Для каждого объекта исследования формируется свой набор исходных данных за установленный

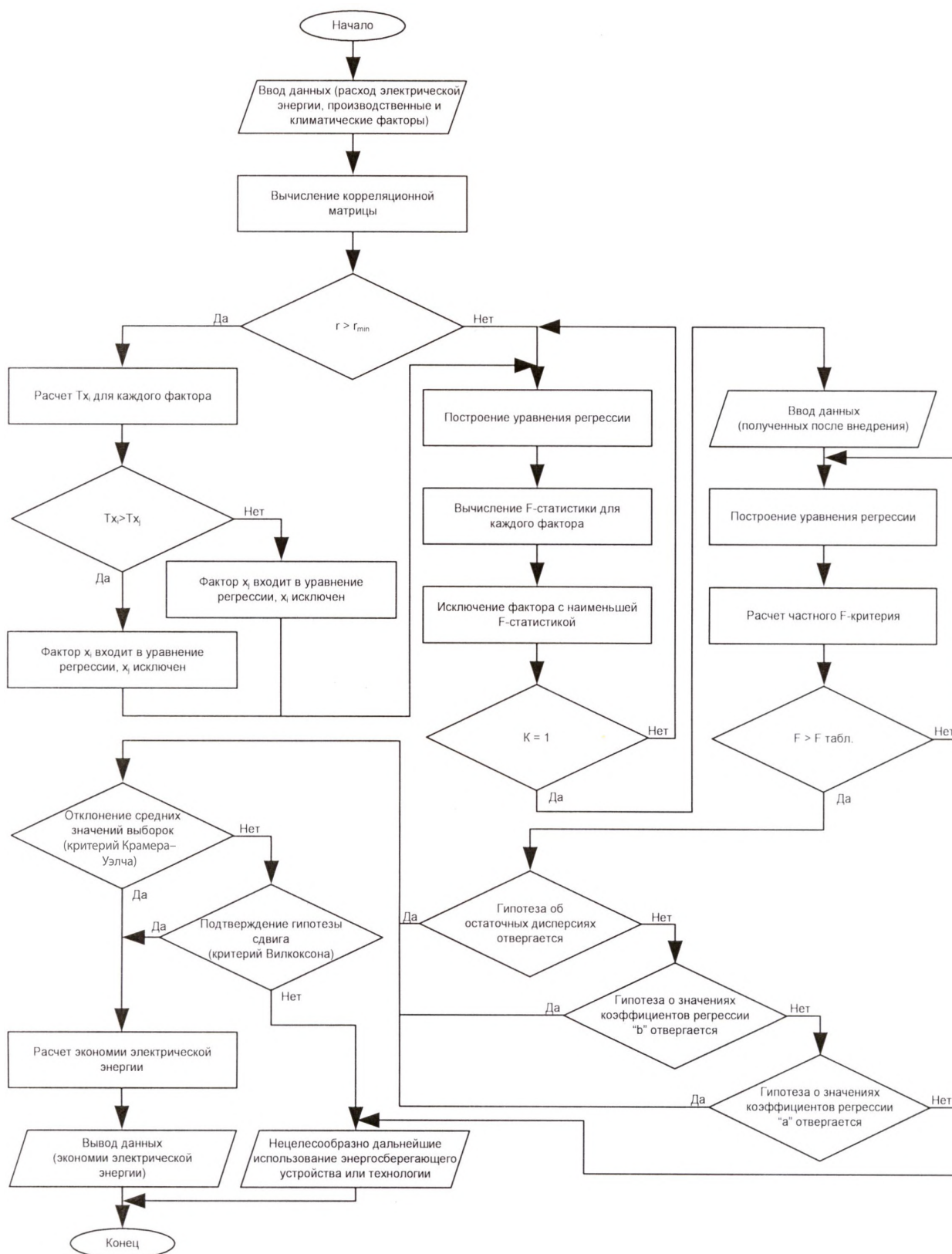


Рис. 1. Структурная схема расчета экономии электрической энергии

период до внедрения энергосберегающего устройства или технологии [3]. Стандартный перечень исходных данных:

- расход электроэнергии;
- объем производственной деятельности;
- температура воздуха;
- продолжительность светового дня и т.д.;

2. Обработка данных.

В первую очередь проверяются выбранные факторы на мультиколлинеарность. Исключение одного из факторов с высокой степенью коррелированности повысит качество модели. Для этого вычисляем корреляционную матрицу коэффициентов корреляции факторов [4, с. 46 – 47]:

$$Q_k = \begin{pmatrix} 1 & r_{yx_1} & r_{yx_2} & \dots & r_{yx_k} \\ r_{x_1y} & 1 & r_{x_1x_2} & \dots & r_{x_1x_k} \\ r_{x_2y} & r_{x_2x_1} & 1 & \dots & r_{x_2x_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{x_ky} & r_{x_kx_1} & r_{x_kx_2} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $r_{yx_1, x_1x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}$ — выборочный частный коэффициент корреляции между y и x_i без учета влияния $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k$, который определяется по формуле:

$$r_{yx_1, x_1x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k} = \frac{-Q_{yx_i}}{\sqrt{Q_{yy} \cdot Q_{ii}}}, \quad (2)$$

где Q_{yx_i}, Q_{yy}, Q_{ii} — алгебраические дополнения элементов $r_{yx_i}, r_{yy}, r_{ii} = 1$ матрицы Q_k .

Корреляционная матрица позволяет оценить связь какого-либо одного из факторов с электропотреблением после удаления влияния других факторов и влияние факторов друг на друга. Все полученные значения $r_{yx_1, x_1x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}$ сравниваем с $r_{\min}$, которое определяется по формуле:

$$r_{\min} = \frac{T(n-2, \alpha)}{\sqrt{(T(n-2, \alpha))^2 + n-2}}, \quad (3)$$

где $T(n-2, \alpha)$ — критическое значение t -критерия Стьюдента с числом степеней свободы $n-2$ при уровне значимости α ;

n — объем выборки до внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

Если присутствует мультиколлинеарность, то рассчитываем критерий независимости признаков T_{x_iy} [5, с. 198–199] для каждого из этих факторов x_i по формуле:

$$T_{x_iy} = \frac{r_{x_iy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{x_iy}^2}}. \quad (4)$$

По значению T_{x_iy} определяется, какая из переменных оказывает наибольшее влияние на процесс электропотребления. Для этого сравниваем значения T_{x_iy} и исключаем из перечня фактор с наименьшим критерием независимости признаков. Далее переходим к процедуре шаговой регрессии. При отсутствии мультиколлинеарности факторов сразу переходим к процедуре шаговой регрессии.

В данном алгоритме используется процедура шаговой регрессии с исключением факторов из модели [4, с. 47–48]. Метод исключения начинается с построения уравнения регрессии со всеми имеющимися факторами. Затем для каждого фактора вычисляется частная F -статистика по формуле:

$$F_{x_i} = \frac{R_{yx_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}^2 - R_{yx_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}^2}{1 - R_{yx_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}^2} \cdot \frac{n-k-1}{1}, \quad (5)$$

где $R_{yx_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}^2 - R_{yx_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}^2$ — доля вариации y , объясненная регрессия за счет фактора x_i ; $1 - R_{yx_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_k}^2$ — доля остаточной вариации модели, включающей полный набор факторов; k — количество факторов.

Фактор, имеющий наименьшую F -статистику, исключается из регрессионной модели. Процедура заканчивается, как только будет получена регрессионная модель с одной переменной имеющей максимальное влияние на процесс электропотребления.

3. Сбор данных, полученных после внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

Сбор данных производится по фактору, включенному в уравнение регрессии, и расходу электри-

ческой энергии за установленный период времени после внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

4. Обработка данных, полученных после внедрения.

По данным о расходе электрической энергии и выбранному фактору строится второе уравнение регрессии [6], которое оценивается с помощью частного F -критерия и рассчитывается по формуле 5. Полученное значение сравнивается с табличным $F_{\text{табл}}$ при определенном уровне значимости α и числами степеней свободы 1 и $n-1$. Если наблюдаемый $F > F_{\text{табл}}$, то уровень достоверности уравнения регрессии считается высоким. При $F < F_{\text{табл}}$ уравнение регрессии считается с низким уровнем достоверности. Значение $F_{\text{табл}}$ определяется по таблице из [5, с. 338–343] или вычисляется с помощью встроенной функции Microsoft Excel ФРАСПОБР.

5. Сравнение данных до и после внедрения энергосберегающего устройства или технологии с помощью дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа.

На данном этапе производится сравнение двух уравнений регрессии построенных по двум выборкам данных до и после внедрения энергосберегающего устройства или технологии:

$$\begin{aligned} y &= a_1 + b_1x \\ y' &= a_2 + b_2x' \end{aligned} \quad (6)$$

Данная часть алгоритма позволяет оценить наличие экономии электрической энергии [7]. Сравнение проводится в три шага [5, с. 210–213]:

а) проверка гипотезы об остаточных дисперсиях.

По остаточным дисперсиям s_1^2 и s_2^2 судят о равенстве дисперсий генеральных совокупностей σ_1^2 и σ_2^2 . Гипотеза $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ проверяется по F -критерию, описанному в [5, с. 176–178]. Значение F определяется по формуле:

$$\hat{F} = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \quad (7)$$

где s_1^2 — большая из двух дисперсий, так что всегда имеет место $\hat{F} \geq 1$.

При $F > F_{\text{табл}}$ гипотеза об остаточных дисперсиях отвергается, что свидетельствует об изменении процесса электропотребления, и в дальнейшем используются непараметрические методы математической статистики. Если $F < F_{\text{табл}}$, то гипотеза подтверждается, и переходят к следующему шагу. Значение $F_{\text{табл}}$ определяется по таблице VII из [5, с. 338–343].

б) проверка гипотезы о значениях коэффициентов регрессии b .

Вторая гипотеза $b_1 = b_2$ проверяется значением критерия:

$$\hat{t}_b = \frac{b_1 - b_2}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{(n_1 - 1)s_x^2} + \frac{1}{(n_2 - 1)s_{x'}^2}}}, \quad (8)$$

где

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 4}}.$$

Здесь $s_{x'}^2$ — дисперсия, вычисленная по x' -значениям выборки после внедрения. Если $|\hat{t}_b| \geq t_{\text{табл}}$, то гипотеза опровергается и считается, что линии регрессии непараллельны и присутствует изменение в процессе электропотребления. Далее переходим к непараметрическим методам математической статистики. Если $|\hat{t}_b| < t_{\text{табл}}$ гипотеза подтверждается, переходим к последнему шагу. Значение $t_{\text{табл}}$ определяется по таблице VI из [5, с. 336].

в) проверка гипотезы о значениях коэффициентов регрессии a .

Для проверки гипотезы $a_1 = a_2$ по данным до и после внедрения рассчитывается величина критерия:

$$\hat{t}_a = \frac{\bar{b} - b'}{s_{b-b'}}, \quad (9)$$

$$\text{где } \bar{b} = \frac{(n_1-1)s_x^2 b_1 + (n_2-1)s_x^2 b_2}{(n_1-1)s_x^2 + (n_2-1)s_x^2},$$

$$b' = \frac{y - y'}{x - x'}$$

и $s_{b-b'}$ =

$$= s \cdot \sqrt{\frac{1}{(n_1-1)s_x^2 + (n_2-1)s_x^2} + \frac{1}{(x-x')^2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}.$$

Гипотеза о различии значений коэффициентов регрессии a позволяет определить параллельное смещение линий регрессии. В случае, если $|\hat{t}_a| \geq t_{\text{табл}}$, гипотеза опровергается и можно утверждать о существенном изменении процесса электропотребления. Значение $t_{\text{табл}}$ определяется по таблице VI из [5, с. 336]. Если все три гипотезы подтверждены, то нет необходимости проводить дальнейшие расчеты и можно сделать вывод о том, что нецелесообразно дальнейшее использование энергосберегающего устройства или технологии.

6. Сравнение данных до и после внедрения энергосберегающего устройства или технологии с помощью непараметрических методов математической статистики.

В первую очередь используется критерий Крамера–Уэлча, позволяющий проверить гипотезу о равенстве средних значений [8, с. 94]:

$$T' = \frac{\sqrt{mn}(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)}{\sqrt{ns_{y_1}^2 + ms_{y_2}^2}}. \quad (10)$$

Если $|T'| < T_{\text{крит}}$, где $T_{\text{крит}}$ является решением уравнения $\Phi(T_{\text{крит}}) = 1 - \frac{\alpha}{2}$, Φ — функция Лапласа [8, с. 42], то различие средних значений до и после внедрения не является статистически значимым и выборки требуется проверить с помощью критерия Вилкоксона. При $|T'| \geq T_{\text{крит}}$ можно считать, что различие средних значений до и после внедрения является статистически значимым и следует переходить к расчету экономии электрической энергии.

Критерий Вилкоксона позволяет проверить гипотезу сдвига [9]. Для проверки гипотезы объединением выборки по энергопотреблению до и после внедрения энергосберегающих устройств или технологий. Упорядочиваем их в порядке возрастания и ранжируем. Пусть элементы выборки до внедрения занимают места с номерами $R_1, R_2, \dots, R_m$, обозначим $U = R_1 + R_2 + \dots + R_m$. Тогда статистика Вилкоксона определяется по формуле:

$$W = \frac{R - \frac{n(n+m+1)}{2}}{\sqrt{\frac{nm(n+m+1)}{12}}}, \quad (11)$$

$$\text{где } R = mn + \frac{n(n+1)}{2} - U.$$

Если $|W| \geq W_{\text{крит}}$, где $W_{\text{крит}}$ является решением уравнения $\Phi(W_{\text{крит}}) = 1 - \frac{\alpha}{2}$, Φ — функция Лапласа, то считается, что произошло статистически значимое изменение в процессе электропотребления после внедрения энергосберегающего устройства или технологии. При $|W| < W_{\text{крит}}$ будем считать, что

процесс электропотребления не изменился.

7. Расчет экономии электрической энергии.

Процент экономии электрической энергии рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{экон}} = \frac{S_{y_1} - S_{y_2}}{S_{y_2}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где S_{y_1} — расход электрической энергии, полученный по уравнению регрессии до внедрения энергосберегающего устройства или технологии при подстановке значения фактора после внедрения;

S_{y_2} — фактический расход электрической энергии после внедрения энергосберегающего устройства или технологии.

Данный алгоритм рекомендован для оценки энергосберегающих устройств или технологий в условиях, когда модель с одним влияющим фактором позволяет достаточно точно оценить процесс электропотребления. В разработанном алгоритме учтены недостатки предыдущих моделей и включены методы, позволяющие повысить достоверность результатов.

Библиографический список

1. Комяков, А. А. О подходах к оценке фактической экономии энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров [Текст] / А. А. Комяков, М. М. Никифоров, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. — Омск, 2014. — № 2 (18). — С. 106–104.
2. Комяков, А. А. Подход к оценке эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях электроснабжения железнодорожных узлов с учетом производственных и климатических факторов [Текст] / А. А. Комяков [и др.] // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. — Омск, 2013. — С. 257–263.
3. Cheremisin, V. T. Nonparametric statistical approach to evaluating the effectiveness of energy-saving devices / V. T. Cheremisin, A. A. Komyakov, V. V. Erbes // 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering. — Krakow, 2014. — P. 58–60.
4. Яновский, Л. П. Введение в эконометрику : учеб. пособие [Текст] / Л. П. Яновский, А. Г. Буховец ; под ред. Л. П. Яновского. — 2-е изд., доп. — М. : КНОРУС, 2007. — 256 с.
5. Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества : пособие для инженеров [Текст] / Р. Шторм ; под ред. Н. С. Райбмана. — М. : Мир, 1970. — 368 с.
6. Эрбес В. В. Способ оценки эффективности работы энергосберегающих устройств в системе тягового электроснабжения [Текст] / В. В. Эрбес // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте. — Омск, 2014. — С. 253–258.
7. Гателюк, О. В. Оценка эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях железнодорожных узлов со стабильной нагрузкой [Текст] / В. В. Эрбес, О. В. Гателюк, А. А. Комяков // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2013 г. : материалы науч.-практ. интернет-конф. — Одесса, 2013. — С. 24–31.
8. Орлов, А. И. Эконометрика : учеб. пособие для вузов [Текст] / А. И. Орлов. — М. : Экзамен, 2002. — 576 с.
9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 816 с.

ЭРБЕС Виктор Владимирович, аспирант кафедры теоретической электротехники.

Адрес для переписки: erbes-viktor@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.10.2014 г.

© В. В. Эрбес