

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2025

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING

С Новым
годом!





ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕЭС»,
КОРПОРАЦИЯ «ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС», НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,
НП «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС»

1

Январь
2025

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

- Бобряков А. А., Кошарная Ю. В.** Анализ методов расчета технического риска и вероятности отказа воздушных линий электропередач 2
- Разуваев А. В.** Анализ энергопотребления объектов и характеристик когенерационной установки 11
- Федин М. А., Калинин В. А., Негроров Я. С., Булатенко М. А., Гераскин А. Ю.** Разработка и экспериментальное исследование системы электрического обогрева с термоконтролем на основе пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры 16
- Шевырёв Ю. В., Крещановский П. С.** Исследование и разработка методики выбора параметров и регулятора напряжения активного фильтра гармоник 24

- Качанов А. Н., Миронов Е. А.** Использование бегущего электромагнитного поля для предварительного нагрева прокатных валков при их закалке 32

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

- Яковлев И. В., Авдокунин Н. В., Горелов М. В.** Экономия и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждаемых наружным воздухом 41

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Бушуев А. Н., Мажирина Р. Е.** Вариант энергоэффективной утилизации твердых отходов нефтеперерабатывающего предприятия (на примере ПАО «Орскнефтеоргсинтез») 50



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI: 10.71759/7tjd-4579

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Анализ методов расчета технического риска и вероятности отказа воздушных линий электропередач

Бобряков А. А., аспирант, **Кошарная Ю. В.**, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Проанализирована методика расчета технического риска отказа основного технологического оборудования (ОТО), утвержденная нормативными документами Минэнерго РФ. Показано, что значение технического риска отказа определяется в основном показателем вероятности отказа единицы оборудования. Рассмотрено применение действующей методики определения значений вероятности отказа на примере ВЛ. Выявлены недостатки действующей методики и сформулированы предложения по ее совершенствованию, эффективность которых показана на модельных примерах.

Ключевые слова: основное технологическое оборудование, воздушные линии электропередачи, технический риск отказа, вероятность отказа, техническое воздействие, структурные схемы надежности.

В настоящее время значимой тенденцией для электротехнических комплексов, обеспечивающих электроснабжение промышленных предприятий, населения и социально-бытового сектора экономики, становится не только увеличение нагрузки на распределительные сети, вызванной растущими объемами электропотребления у конечных потребителей, но и существенный рост требований к надежности электроснабжения и необходимость проведения широкого комплекса работ по поддержанию показателей надежности в требуемых пределах [1, 2]. Для электросетевых компаний, осуществляющих транспорт электрической энергии от систем генерации к конечным потребителям, присоединенным на различных классах напряжения, ключевым звеном в решении задач обеспечения бесперебойности работы электроснабжающих электротехнических комплексов является обеспечение надежной и безопасной эксплуатации основного электротехнического оборудования и корректная оценка рисков отказа и выхода из строя элементов электрических сетей, а также своевременное предотвращение таких ситуаций.

Для поддержания требуемых показателей надежности работы электротехнических ком-

плексов электросетевые компании планируют программы технического обслуживания и ремонта, технического перевооружения и реконструкции эксплуатируемого ими основного технологического оборудования (далее — ОТО), в состав которого входят различные электротехнические устройства: силовые трансформаторы, выключатели, линии электропередач (ЛЭП) и т.д. В силу ограниченности выделяемых финансовых средств на реализацию таких программ нужен адресный выбор конкретных единиц ОТО, наиболее критичного с точки зрения показателей надежности (вероятности отказа), для их первоочередного включения в программу технического обслуживания и ремонта, с дальнейшей реализацией необходимых мероприятий по техническому воздействию.

Определение оптимального вида, состава и стоимости технического воздействия на оборудование в соответствии с [3] проводится на основании карты возможных сценариев выбора вида технических воздействий, содержащей:

текущий индекс технического состояния (далее — ИТС) ОТО;
величину риска отказа ОТО;

возможные стратегии технического воздействия на жизненный цикл ОТО (например, обеспечение максимальной надежности оборудования, обеспечение максимальной прибыли или минимизация стоимости жизненного цикла оборудования);

прогноз изменения ИТС ОТО в зависимости от выбранной стратегии технического воздействия;

суммарную стоимость владения ОТО и (или) объектом электроэнергетики в зависимости от выбранной стратегии технического воздействия.

Часть данных, необходимых для формирования карты, определяется субъектом электроэнергетики в результате расчета, а именно:

результаты оценки технического состояния ОТО;

прогноз изменения ИТС ОТО;

величина риска отказа объекта оценки (функционального узла (далее — ФУ) или единицы ОТО), определенная на основании принятой методики расчета и рассчитанных вероятности и последствий отказа с учетом положений [4] или существующей статистики отказов оборудования одного вида, для оборудования, на которое не распространяется действие методических указаний;

оценка возможного ущерба из-за отказа ФУ или единицы ОТО.

Включение ОТО в программы технического обслуживания и ремонта, а также определение оптимального вида, состава и стоимости технического воздействия на него проводится по [4] на основе сравнительного анализа, вычисленного в стоимостном выражении значения технического риска отказа оборудования со значением затрат на реализацию выбранного оптимального технического воздействия на ОТО.

Таким образом, *технический риск отказа оборудования* — важнейший показатель, определяющий не только необходимость и целесообразность включения оборудования в программу технического обслуживания и ремонта, но и оптимальный вид и состав технического воздействия на него.

В связи с тем, что из общего числа всех элементов электросетевого комплекса именно воздушные линии электропередачи (далее — ВЛ) имеют наибольшее количество отказов среди других элементов [5]. Расчет вероятности отказа ВЛ рассмотрим более подробно.

Согласно **нормативному подходу** [4], показатель технического риска отказа оборудования ($R_{об}$) вычисляется субъектом электроэнергетики или Минэнерго России как мультипликативный показатель от вероятности отказа ($P_{ЕО}$) отдельного ФУ (или ОТО в целом) и стоимостной ($У_{отказа}$) оценки последствий отказа:

$$R_{об} = P_{ЕО} У_{отказа}. \quad (1)$$

При этом значение $P_{ЕО}$ отдельного ФУ (или ОТО в целом) используется во всех вариантах расчета, а вариативным показателем является стоимостная $У_{отказа}$, определяемая в зависимости от функции, выполняемой отказавшим оборудованием. Для этого выделяются следующие основные классы ОТО:

единица ОТО, не приводящая к нарушению функционирования объектов генерации или электросетевого хозяйства. В этом случае в расчет $У_{отказа}$ входят общие затраты, включающие: затраты на замену единицы ОТО, пусковые работы, компенсацию экологического ущерба, ущерб жизни и здоровью;

единица ОТО, нарушение или прекращение функционирования которой приводит к потере управляемости энергоустановки объекта генерации, прекращению ее функционирования, разрушению или снижению безопасности ее эксплуатации. В этом случае в расчет $У_{отказа}$, помимо общих затрат на устранение последствий отказа ОТО, входят убытки от неоплаты располагаемой мощности, от недовыработки тепловой и электрической энергии и стоимость прочих расходов;

единица ОТО, нарушение или прекращение функционирования которой приводит к потере управляемости объекта электросетевого хозяйства, объекта по передаче электрической энергии, прекращению его функционирования, разрушению или снижению безопасности его эксплуатации. В этом случае в расчет $У_{отказа}$, кроме общих затрат на устранение последствий отказа ОТО, входят убытки: от недопоставки электрической энергии потребителям, от выплаты компенсаций потребителям, от снижения тарифа, от компенсации за снижение качества, от снижения тарифа за нарушение качества;

единица ОТО, нарушение или прекращение функционирования которой приводит к потере управляемости энергоузла, к недопустимому изменению параметров электроэнергетического режима энергоузла. В этом случае

в расчет $У_{\text{отказа}}$ входят все описанные выше составляющие.

Проведенный анализ порядка расчета технического риска отказа ОТО, включая ВЛ, и оценки последствий такого отказа, изложенного в методических указаниях [4], показывает, что вероятность отказа ФУ и единицы ОТО является ключевым фактором, определяющим значение оценки технического риска, и, следовательно, существенно влияет на принятие решения о включении ОТО в программы технического обслуживания и ремонта и (или) технического перевооружения и реконструкции, определяя тем самым техническую и экономическую эффективность реализации названных программ.

Учитывая вышеизложенное, рассмотрим **методику расчета вероятности отказа ОТО** более подробно.

Вероятность отказа ОТО и (или) ее ФУ принимает значение в диапазоне от 1 (наихудшее значение) до 0 (наилучшее значение).

Расчет данной величины [4] осуществляется поэтапно на основе последовательного определения прогнозов:

- 1) изменения ИТС ФУ единицы ОТО;
- 2) вероятности отказа ФУ единицы ОТО;
- 3) вероятности отказа единицы ОТО.

Рассмотрим эти этапы расчета.

Этап 1. Прогноз изменения (ИТС) ФУ единицы ОТО.

Индекс технического состояния представляет собой численную величину, находящуюся в диапазоне от 0 до 100, которая рассчитывается на основании методик [3]. Такие методики разрабатываются для каждого типа объектов электроэнергетики (электрические сети, электрические подстанции, объекты генерации) и содержат алгоритмы определения индексов технического состояния.

Прогнозное значение ИТС $y(t)$ определяет для ФУ оборудования и сегмента ВЛ разными способами.

Для ФУ оборудования:

$$y(t) = (1 - |\operatorname{tg}\alpha_{\text{ФУ}i}|t) \text{ИТСУ}/100, \quad (2)$$

где ИТСУ — значение индекса технического состояния ФУ единицы ОТО, рассчитанное на момент проведения расчета вероятности отказа в соответствии с методикой оценки технического состояния; t — продолжительность прогнозирования (с момента расчета и на прогнозный период 5 лет), лет; $\operatorname{tg}\alpha_{\text{ФУ}i}$ — модуль тангенса наклона функции прогноза измене-

ния индекса технического состояния ФУ единицы ОТО, значение которого составляет: для ресурсопределяющих ФУ единицы ОТО, указанных в [3], — 0,03; для остальных ФУ — 0,1.

Значение модуля тангенса наклона функции прогноза изменения индекса технического состояния может уточняться субъектом электроэнергетики в сторону снижения на основании методики расчета, определенной локальным нормативным актом.

Для сегмента ЛЭП прогнозное значение находится по формуле:

$$y_{\text{л}}(t) = (1 - 0,03t) \Sigma(\text{ОГП}_i k_{\text{в}i})/4, \quad (3)$$

где ОГП_i — балльная оценка i -й группы параметров технического состояния, определенная на момент расчета вероятности отказа в соответствии с методикой оценки технического состояния как минимальная балльная оценка входящих в группу параметров среди всех элементов (опор и пролетов) сегмента ВЛ; $k_{\text{в}i}$ — значение весового коэффициента для i -й группы параметров.

Этап 2. Прогноз вероятности отказа ФУ единицы ОТО или сегмента ВЛ на прогнозный период до 5 лет рассчитывается по формуле:

$$p_{\text{ф}}(t) = (1 - y(t))k_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $y(t)$ — функция изменения ИТС ФУ единицы ОТО (сегмента ЛЭП); $k_{\text{п}}$ — коэффициент отношения величины индекса технического состояния ФУ единицы ОТО или сегмента ЛЭП до и после последнего технического воздействия или в предыдущем и текущем календарном году, определяемый по формуле:

$$k_{\text{п}} = \frac{\text{ИТС}_1}{\text{ИТС}_2}. \quad (5)$$

В случае непроведения технического воздействия на единицу ОТО или сегмент ЛЭП за весь период эксплуатации или отсутствия рассчитанного ИТС состояния ФУ единицы ОТО (сегмента ЛЭП) до и (или) после проведения технического воздействия значение $k_{\text{п}}$ принимается равным 1.

Этап 3. Прогноз вероятности отказа единицы ОТО.

Прогноз вероятности отказа ОТО $p(t)$ описывается формулой

$$p(t) = \max p_{\text{ф}i}(t), \quad (6)$$

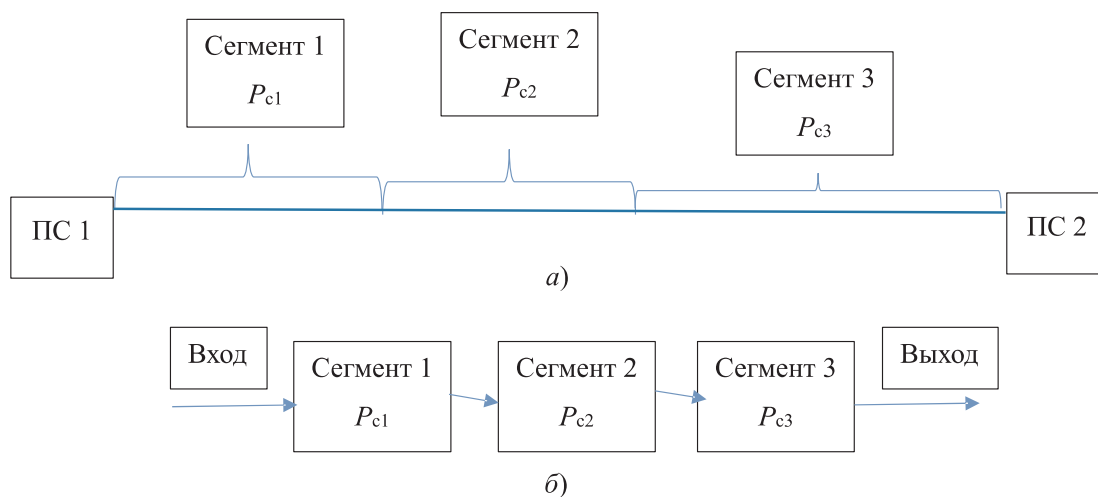


Рис. 1. Схематичное изображение ВЛ, состоящей из трех сегментов:

a — общая схема ВЛ; *б* — структурная схема надежности ВЛ

где $p_{\phi i}$ — функция изменения вероятности отказа i -го ФУ единицы ОТО (для ВЛ — сегмента ВЛ).

Однако проведенный анализ научной литературы [6–9] показывает, что методика не в полной мере учитывает основные положения общей теории надежности энергетических систем.

В соответствии с положениями теории надежности и нормативным документом [10] любая единица ОТО может быть представлена в виде структурной схемы надежности (RBD (Reliability block diagrams)). Элементами структурной схемы надежности единицы ОТО являются ФУ, входящие в состав рассматриваемой единицы.

Согласно [3] единица оборудования класса «ЛЭП» (ВЛ) состоит из ФУ «Сегмент», каждый из которых характеризуется определенным значением ИТС, формирование которого подробно рассмотрено в работе [5], и вычисленным на основе формулы (4) значением вероятности отказа сегмента.

Так как отказ любого сегмента ВЛ приведет к отказу ВЛ в целом (как объекта ОТО), то структурная схема надежности ВЛ будет представлять собой схему с последовательным соединением отдельных сегментов. На рис. 1, *a* приведено схематичное изображение ВЛ, состоящей из трех сегментов (каждый из которых имеет вероятность отказа P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} соответственно), на рис. 1, *б* — соответствующая ей структурная схема надежности.

Вероятность отказа ВЛ (как единичного объекта ОТО), рассчитанная по структурной схеме надежности, приведенной на рис. 1, *б*,

определяется вероятностью отказа функциональных узлов (отдельных сегментов) по формуле:

$$P_{\text{ВЛ}} = 1 - \prod_1^3 (1 - P_{ci}). \quad (7)$$

Вероятность отказа ВЛ (как единичного объекта ОТО), рассчитанная в соответствии с методическими указаниями Минэнерго РФ [4], по формуле (6) определяется вероятностью отказа функциональных узлов (отдельных сегментов) по выражению:

$$P_{\text{ВЛ}} = \max(P_{ci}). \quad (8)$$

Найдем **вероятность отказа единицы основного технологического оборудования (ВЛ)**, состоящей из трех сегментов, по методическим указаниям Минэнерго РФ [4] и с использованием основных положений теории надежности (структурной схемы надежности ВЛ).

Для проведения расчета и сравнительного анализа произвольно зададим вероятности отказа каждого из сегментов. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Рассмотренный модельный пример показывает, что вероятность отказа ВЛ, рассчитанная с использованием структурной схемы надежности ЛЭП, гораздо выше (в 1,2 раза), чем вероятность отказа, рассчитанная по методике Минэнерго РФ и, очевидно, что эта разница будет возрастать с увеличением числа сегментов ВЛ, принимающих участие в расчете.

Разницу результатов, полученных в рассматриваемых методиках (приведены в табл. 2

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов вероятности отказа ВЛ

Номер функционального узла (сегмента ВЛ)	Вероятность отказа функционального узла (сегмента ВЛ)	Вероятность отказа ВЛ по методике Минэнерго (максимальное значение вероятности отказа функционального узла)	Вероятность отказа ВЛ, рассчитанная с использованием структурной схемы надежности
1	0,75	0,75	0,895
2	0,4		
3	0,3		

Таблица 2

Результаты расчета значения вероятности отказа ВЛ, состоящей из двух сегментов, по методике Минэнерго РФ

Вероятность отказа ВЛ	Вероятность отказа сегмента 1											
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
Вероятность отказа сегмента 2	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1
	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1
	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

и 3), во всем диапазоне возможных изменений вероятности отказа ФУ, удобно представить графически. Для этого **рассмотрим модельный пример на базе ВЛ, состоящей из двух сегментов.**

По координатным осям X и Y отложим диапазон возможных изменений вероятности отказа функциональных узлов (X — диапазон возможных изменений вероятности отказа для сегмента 1; Y — диапазон возможных изменений вероятности отказа для сегмента 2); по оси Z — поверхность, отображающая рассчитанные значения вероятности отказа ВЛ, как единицы ОТО (рис. 2).

Анализ абсолютной и относительной ошибки (расхождения результатов) расчетов, при помощи полученных таблиц и диаграмм, показывает, что:

наибольшего значения абсолютная ошибка достигает в точке, в которой вероятности отказа функциональных узлов (сегментов) одинаковы и равны 0,5 (сегменты имеют одинаковое техническое состояние);

наибольшего значения относительная ошибка достигает в точке, в которой вероятности отказа функциональных узлов (сегментов) одинаковы и равны 0,1 (сегменты имеют одинаковое техническое состояние).

Таблица 3

Результаты расчета значения вероятности отказа ВЛ, состоящей из двух сегментов, с использованием структурной схемы надежности ВЛ

Вероятность отказа ВЛ		Вероятность отказа сегмента 1										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Вероятность отказа сегмента 2	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	0,1	0,1	0,19	0,28	0,37	0,46	0,55	0,64	0,73	0,82	0,91	1
	0,2	0,2	0,28	0,36	0,44	0,52	0,6	0,68	0,76	0,84	0,92	1
	0,3	0,3	0,37	0,44	0,51	0,58	0,65	0,72	0,79	0,86	0,93	1
	0,4	0,4	0,46	0,52	0,58	0,64	0,7	0,76	0,82	0,88	0,94	1
	0,5	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
	0,6	0,6	0,64	0,68	0,72	0,76	0,8	0,84	0,88	0,92	0,96	1
	0,7	0,7	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1
	0,8	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1
	0,9	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

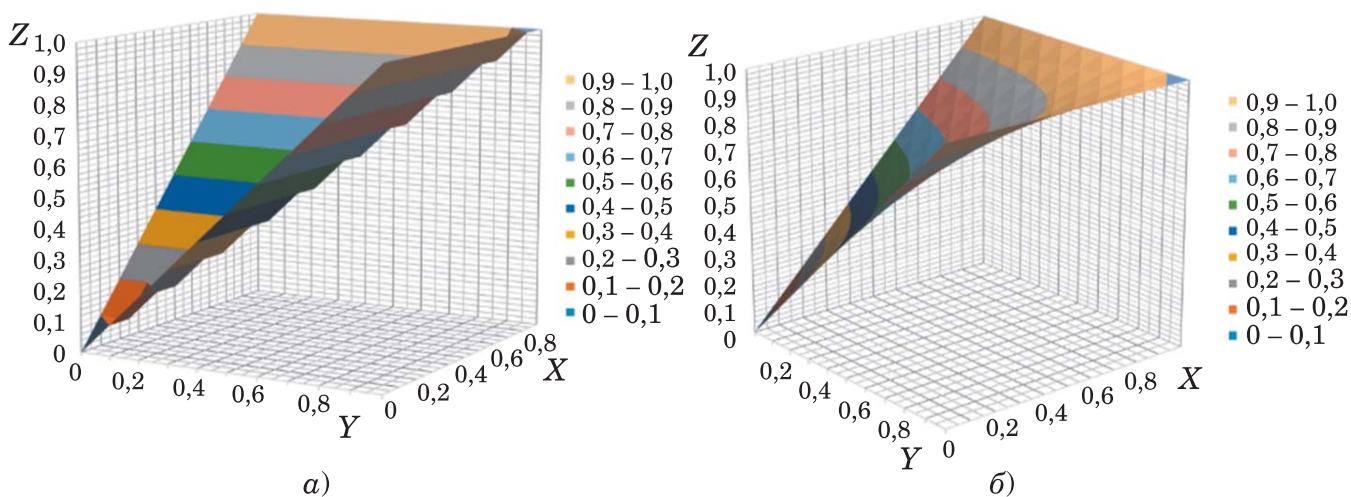


Рис. 2. Графические изображения поверхностей, отображающих рассчитанные значения вероятности отказа ВЛ:

а — результаты расчета значения вероятности отказа ВЛ, состоящей из двух сегментов, по методике Минэнерго РФ; *б* — результаты расчета значения вероятности отказа ВЛ, состоящей из двух сегментов, с использованием структурной схемы надежности ВЛ

Таким образом, наибольшего значения абсолютная ошибка достигает для оборудования, имеющего ИТС значение которого примерно равно 50, при этом относительная ошибка достигает 50 %. Согласно [3] удовлетворительному техническому состоянию оборудования

соответствует диапазон ИТС $50 < i \leq 70$, а неудовлетворительному $25 < i \leq 50$. Более точный расчет вероятности отказа ВЛ, в первую очередь, позволит более обоснованно принимать решения по ВЛ, техническое состояние которых является неудовлетворительным или

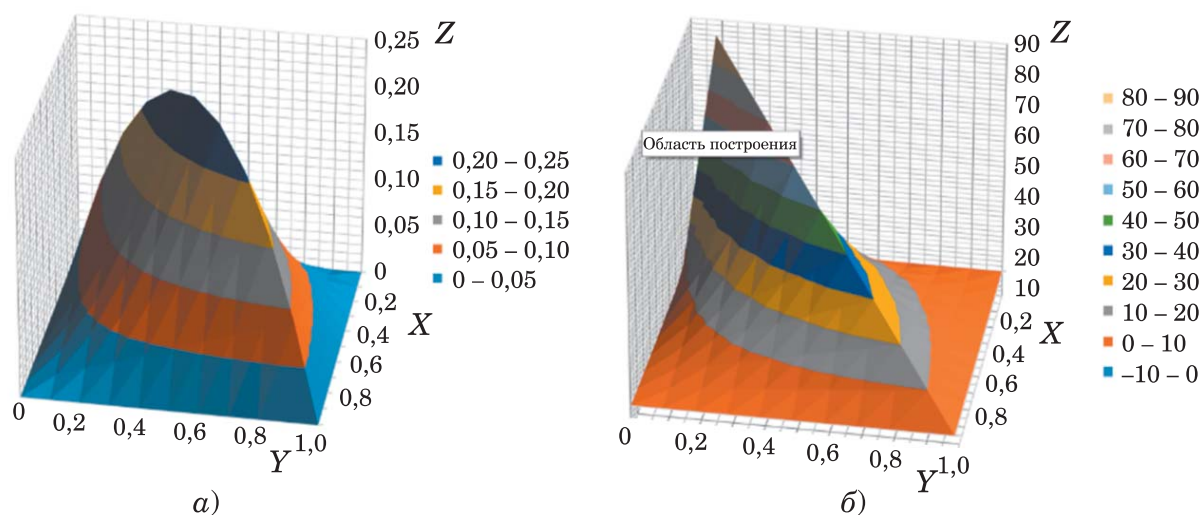


Рис. 3. Поверхность абсолютной (а) и относительной (б) ошибки (расхождения результатов) расчетов, полученных по рассмотренным методикам

близким к неудовлетворительному, что особенно важно для повышения эффективности ремонтных программ.

Следует отметить, что относительная ошибка увеличивается относительно рассмотренной выше точки в сторону снижения вероятности отказа сегментов и достигает максимального значения (равного 90 %) при равенстве значений отказов сегментов между собой (каждый из которых равен 0,1). Эта точка соответствует очень хорошему состоянию оборудования и может не оказывать значительного влияния на решения по включению объектов в ремонтную программу. Например, можно рассмотреть две ЛЭП, состоящие из некоторого одинакового количества сегментов (более 1), наибольшая вероятность отказа которых одинакова для каждой из ЛЭП, а остальные вероятности различаются. При расчете технического риска отказа ВЛ, утвержденной нормативными документами Минэнерго РФ [4], он будет одинаковый, и для определения выбора ремонтируемой ВЛ необходимо будет проводить дополнительный анализ, в то время как расчет с использованием основных положений теории надежности выявит ВЛ с большей вероятностью отказа.

Выводы

1. На модельных примерах показано, что расчет с использованием структурной схемы надежности ВЛ во всем диапазоне возможных изменений вероятности отказа отдельных ФУ дает более высокие значения вероятности от-

каза ВЛ по сравнению с расчетом по методикам Минэнерго. При этом для расчета вероятности отказа ВЛ (как единицы ОТО) по предложенной авторами методике не требуется сбор и обработка какой-либо дополнительной информации (необходима только информация о вероятностях отказа отдельных сегментов, имеющаяся в информационных системах Минэнерго РФ, осуществляющих расчеты ИТС энергетического оборудования).

2. Более точный расчет вероятности отказа ВЛ (как единицы ОТО) позволит более обоснованно принимать решения о включении ВЛ в программы технического обслуживания и ремонта и (или) технического перевооружения и реконструкции, повышая тем самым техническую и экономическую эффективность реализации названных программ.

Также следует отметить, что методика Минэнерго РФ [4] требует совершенствования и в части расчета значений индекса технического состояния ВЛ, что отмечается в многочисленных научных публикациях, например в [5, 11, 12].

3. Предлагаемая методика может быть успешно распространена на другие виды основного технологического оборудования для расчетов вероятности отказов единицы оборудования соответствующего класса, имеющих по 5–7 ФУ (автотрансформатор, выключатель). Однако для ее применения требуется разработка соответствующих структурных схем надежности, что может являться самостоятельным направлением исследований, который позволит уточнить значения абсолютной и отно-

сительной ошибок (расхождения результатов) расчетов, полученных по рассматриваемым методикам, и выработать рекомендации по практическому применению новых расчетных схем.

Список литературы

1. Приказ Министерства энергетики РФ от 12 июля 2018 г. № 548 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок».
2. Распоряжение Правительства РФ от 28.10.2020 № 2801-р «О паспорте пилотного проекта Улучшение надежности и качества электроснабжения потребителей электрической энергии за счет внедрения новых технологий и оптимизации деятельности территориальных сетевых организаций».
3. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» (с изменениями и дополнениями от 17.03.20).
4. Приказ Минэнерго России от 19 февраля 2019 г. № 123 «Об утверждении методических указаний по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа» (зарегистрирован Минюстом России 4 апреля 2019 г., регистрационный № 54277).
5. Бобряков, А. А. Подходы к расчету индекса технического состояния воздушных линий электропередач / А. А. Бобряков, Ю. В. Кошарная // Промышленная энергетика. — 2024. — № 1. — С. 8 – 16.
6. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие / В. Г. Китушин. — Новосибирск: Изд-во НГТУ. — 2003. — 256 с.
7. Анищенко, В. А. Основы надежности систем электроснабжения: Пособие для студентов по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий» / В. А. Анищенко, И. В. Колосова. — Минск: БНТУ. — 2007. — 151 с.
8. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учебн. пособие для ВУЗов / Ю. Б. Гук. — Л.: Энергоатомиздат. — 1990. — 208 с.
9. Коровин, Ю. В. Основы теории надежности электроэнергетических систем / Ю. В. Коровин. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. — 2015. — 72 с.
10. ГОСТ Р МЭК 61078-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Структурная схема надежности. Dependability in technics. Reliability block diagrams.

11. Назарычев, А. Н. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования / А. Н. Назарычев, Д. А. Андреев / 91-е заседание международного научного семинара им. Ю. Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» Ташкент, 23 — 27 сентября 2019 года.
12. Мезин, С. В. Разработка нового подхода к оценке технического состояния оборудования для целей создания экспертных систем / С. В. Мезин, А. В. Благочиннов, Ш. М. Милитоян, С. А. Агринская // Вестник МЭИ. — 2023. — № 4. — С. 146 – 154.

References

1. *Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 12 iyulya 2018 g. No. 548 «Ob utverzhenii trebovaniy k obespecheniyu nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem, nadezhnosti i bezopasnosti ob'ektov elektroenergetiki i energoprimimayushchikh ustanovok»* (Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 12, 2018 No. 548 «On approval of requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations»).
2. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28.10.2020 No. 2801-r «O pasporte pilotnogo proekta Uluchshenie nadezhnosti i kachestva elektrosnabzheniya potrebitelei elektricheskoi energii za schet vnedreniya novykh tekhnologii i optimizatsii deyatel'nosti territorial'nykh setevykh organizatsii»* (Order of the Government of the Russian Federation dated October 28, 2020 No. 2801-r «On the passport of the pilot project Improving the reliability and quality of power supply to consumers of electric energy through the introduction of new technologies and optimization of the activities of territorial grid organizations»).
3. *Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 26 iyulya 2017 g. No. 676 «Ob utverzhenii metodiki otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i linii elektroperedachi elektricheskikh stantsii i elektricheskikh setei», s izmeneniyami i dopolneniyami ot 17.03.20* (Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017 No. 676 «On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main process equipment and power transmission lines of electric plants and electric networks», with amendments and additions dated March 17, 2020).
4. *Prikaz Minenergo Rossii ot 19 fevralya 2019 g. No. 123 «Ob utverzhenii metodicheskikh ukazanii po raschetu veroyatnosti otkaza funktsional'nogo uzla i edinitiy osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i otsenki posledstviy takogo otkaza»* (Order of the Ministry of Energy of Russia dated February 19, 2019 No. 123 «On approval of guidelines for calculating the probability of failure of a functional unit and a unit of main process equipment and assessing the consequences of such a failure»), registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on April 4, 2019, registration No. 54277.

5. **Bobryakov A. A., Kosharnaya Yu. V.** *Promyshlennaya energetika* (Industrial power engineering), 2024, No. 1, pp. 8 – 16.
6. **Kitushin V. G.** *Nadezhnost' energeticheskikh sistem. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy* (Reliability of energy systems. Part 1. Theoretical foundations), Novosibirsk, Publ. NSTU, 2003, 256 p.
7. **Anishchenko V. A., Kolosova I. V.** *Osnovy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya* (Fundamentals of reliability of power supply systems), manual for students majoring in «Power supply of industrial enterprises», Minsk, BNTU, 2007, 151 p.
8. **Guk Yu. B.** *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike* (Reliability Theory in Electric Power Industry), Leningrad, Energoatomizdat, 1990, 208 p.
9. **Korovin Yu. V.** *Osnovy teorii nadezhnosti elektroenergeticheskikh system* (Fundamentals of Reliability Theory of Electric Power Systems), Chelyabinsk, Publ. Center of SUSU, 2015, 72 p.
10. **GOST R MEK 61078–2021.** *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Nadezhnost' v tekhnike. Strukturnaya skhema nadezhnosti* (State Standard R IEC 61078 – 2021. National Standard of the Russian Federation. Dependability in technics. Reliability block diagrams).
11. **Nazarichev A. N., Andreev D. A.** *Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya* (Improving the Methodology for Determining the Technical Condition Index of Electrical Equipment), 91st meeting of the international scientific seminar named after Yu. N. Rudenko «Methodological issues of studying the reliability of large energy systems», Tashkent, September 23 – 27, 2019.
12. **Mezin S. V., Blagochinnov A. V., Militonyan Sh. M., Agrinskaya S. A.** *Vestnik MEI* (MPEI Vestnik), 2023, No. 4, pp. 146 – 154.

BobriakovAA@mpei.ru

Analysis of methods for calculating technical risk and probability of failure of overhead power lines

Bobryakov Al. A., Kosharnaya Yu. V.

The paper analyzes the methodology for calculating the technical risk of failure of the main technological equipment, approved by the regulatory documents of the Ministry of Energy of the Russian Federation, it is shown that the value of the technical risk of failure is mainly determined by the probability of failure of a unit of equipment. The application of the current methodology for determining the probability of failure on the example of overhead lines is considered, the shortcomings of the current methodology are identified and proposals for its improvement are formed, the effectiveness of which is shown by model examples.

Keywords: main technological equipment, overhead power lines, technical risk of failure, probability of failure, technical impact, structural reliability schemes.

DOI: 10.71759/kr8f-6x65

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Анализ энергопотребления объектов и характеристик когенерационной установки

Разуваев А. В., доктор техн. наук

Балаковский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ

Проведен анализ литературных источников об эффективности применения когенерационных установок на базе объектов «большой и малой энергетики» с представленными в них выводами. Рассмотрены материалы по определению параметров когенерационной установки, необходимых для расчета электро- и теплоснабжения объектов разного назначения. Представлены графики энергопотребления некоторых объектов жилищного комплекса и производственных предприятий. На основе экспериментальных данных рассчитаны статьи теплового баланса газового двигатель-генератора, электрической мощности 500 кВт при частоте вращения коленчатого вала $16,6 \text{ с}^{-1}$. По полученным данным составлены регрессионные зависимости для отводимой вторичной теплоты с выпускными газами и охлаждающей жидкостью от когенерационной установки в зависимости от электрической нагрузки газового двигатель-генератора.

Ключевые слова: когенерационная установка, газовый двигатель-генератор, энергетическая нагрузка объектов, регрессионные зависимости.

Эффективность применения принципа когенерационной установки, вырабатывающей одновременно электрическую и тепловую энергию для потребителя, достаточно широко описана в технической литературе. Так, например, в работе [1] представлен анализ развития теплофикации и когенерации в России начиная от ее становления. В ней же дана информация о зарубежном опыте теплофикации за рубежом — «Гармонизированные исходные значения когенерации» на основании директивы 2004/8 ЕЭС от 1 февраля 2004.

В статье [2] рассмотрены вопросы преимущества когенерации, причины, препятствующие развитию когенерации, варианты развития когенерации и ряд других, в которых анализируются и оцениваются их решения.

Преимущество комбинированного производства энергии на ТЭЦ показано в работе [3]. В статье [4] описывается проблема объективного распределения производственных затрат в системах когенерации на примере ТЭЦ. Выбор критерия для разнесения топливной составляющей затрат между электрической и тепловой энергией имеет принципиальное значение, поскольку принятый метод оказывает влияние на значение тарифов на эти виды энергии.

Если в указанных работах представлены производства теплоэнергетических ресурсов на оборудовании объектов «большой энергети-

ки», то в работе [5] отражена экономическая эффективность применения когенерационной установки на объектах «малой энергетики» и одного его представителя — КГУ-500, электрической мощностью 405 кВт и тепловой мощностью 545 кВт. Эта когенерационная установка скомпонована на базе газового двигателя внутреннего сгорания. Проведен расчет экономической эффективности ее применения на объекте. И на основании этих расчетов сделан вывод: «для энергоемких предприятий сейчас основная задача — найти радикальные решения, которые позволят снизить расходы на энергоносители, занимающие львиную долю в общей сумме затрат. Решить эту задачу и значительно снизить расходы на электрическую и тепловую энергию позволят возможности малой энергетики». Аналогичный вывод делается и в работе [6] специалистами Гродненского государственного университета имени Янки Купалы (Беларусь), а именно: «Данные установки показывают максимальную эффективность при внедрении на производствах, где для технологических нужд используется пар или горячий теплоноситель».

Эти выводы дают основания внедрять когенерационные установки на различных территориях, в частности в Ярославской области [7].

И этот же момент отмечается в ведомственном нормативном документе [8], где в п. 8.7.1 указано, что для базовых ЭС (электрических

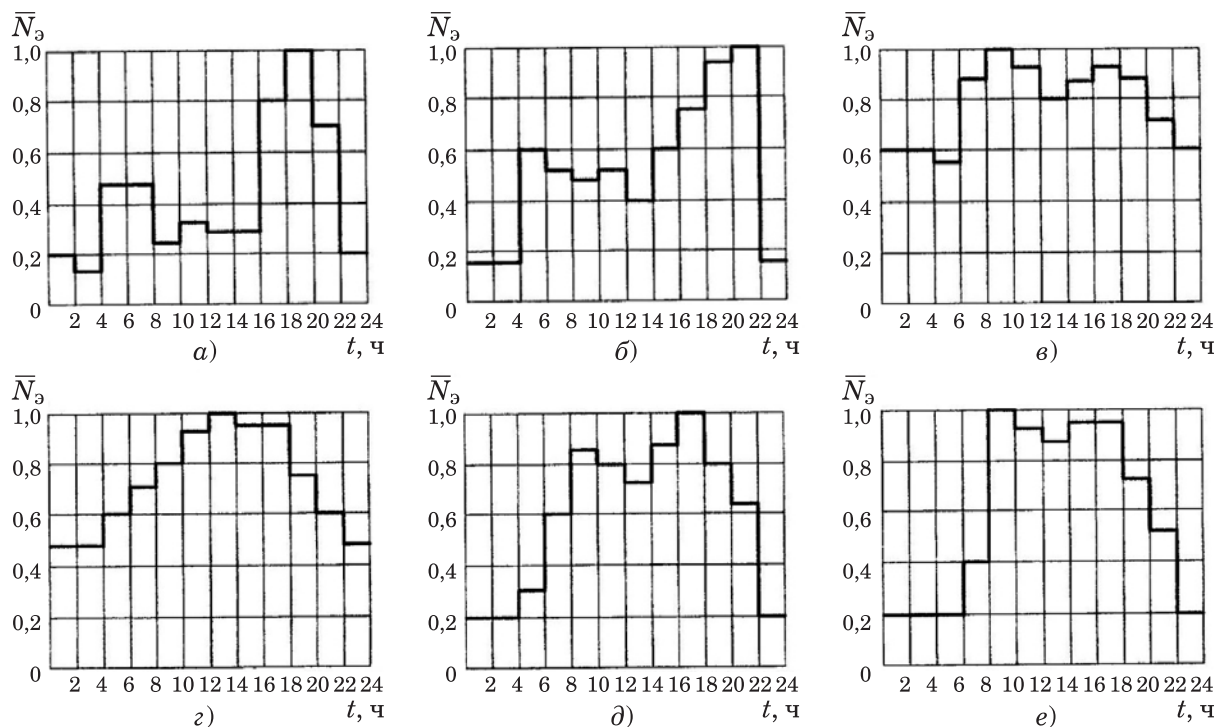


Рис. 1. Суточные графики электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей:

а — жилое здание с газовыми плитами; *б* — жилое здание с бытовыми электрическими плитами; *в* — универсальный магазин; *г* — столовая; *д* — поликлиника; *е* — двухсменная школа с электрифицированным пищеблоком

станций) наличие СКУТ (систем комплексной утилизации теплоты) является обязательным. ЭС и СКУТ представляют собой единый энергокомплекс — электротеплостанцию (ЭТС) — источник электрической и тепловой энергии. В п. 8.72 поясняется «Утилизированная теплота отработавших газов и жидкости, охлаждающей зарубашечное пространство ДВС, наддувочного воздуха и моторного масла используется для замещения теплогенерирующих (котельных) установок, а также холодоснабжения объекта с целью снижения затрат на энергообеспечение объекта путем комбинированной выработки требуемых видов энергии».

Таким образом, обоснована актуальность применения когенерационных установок (КУ) на базе ДВС на объектах их эксплуатации. Но есть вопрос, на который необходимо отвечать при проектировании объекта с КУ, т.е. определить возможность КУ обеспечить необходимым количеством теплоты для отопления (или других нужд) объекта. Учитывая, что вырабатываемая тепловая мощность КУ на базе ДВС зависит от величины вырабатываемой электрической мощности, то необходимо знать эту зависимость для теплотехнических расчетов

совместной работы КУ и объекта потребления этих ресурсов.

Задачей данной статьи является описание алгоритма получения такой зависимости для ДВС 6 ЧН 21/21 с КУ мощностью 500 кВт. Причем представленная зависимость основана на базе результатов проведенных стендовых теплосбалансовых испытаний ДВС. Этот материал может служить дополнением к информации, изложенной в работе [9].

Для определения и подбора параметров КУ для электро- и теплоснабжения конкретного объекта необходимо знать эти же параметры и у него.

В качестве примера и на основании исследований энергопотребления некоторых объектов Саратовской области были получены следующие графики [10], представленные на рис. 1 и 2.

На рис. 2 сплошной линией обозначена зимняя нагрузка, пунктирной — летняя.

Потребителей тепловой энергии можно разделить на две группы: промышленные и коммунально-бытовые. В промышленную группу включены предприятия, на которых используют тепловую энергию для технологических процессов с целью выпуска конечной продукции. Коммунально-бытовое теплотребление

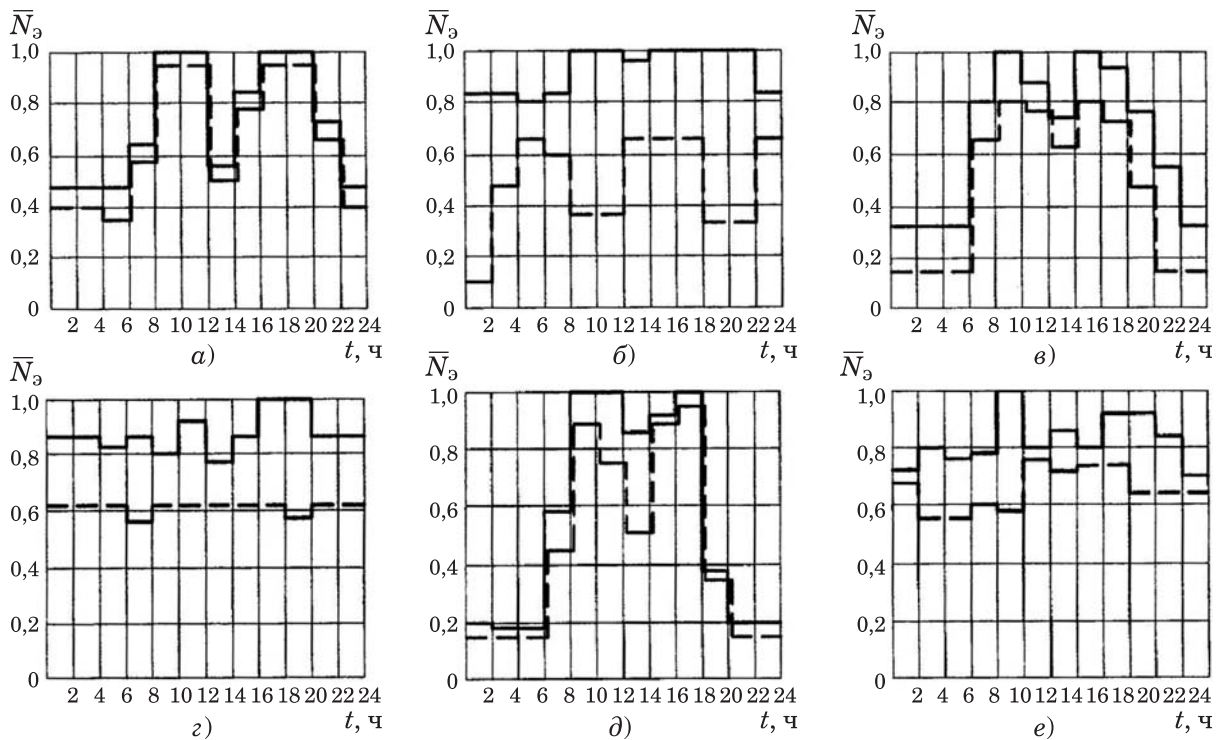


Рис. 2. Суточные графики электрических нагрузок промышленных потребителей:

a — ОАО «Сарэнергомаш»; *б* — МУПП «Саратовводоканал»; *в* — ОАО «Рефлектор»; *г* — ОАО «БАТ-СТФ»; *д* — ОАО «Сапкон-Нефтемаш»; *е* — ООО «Газпромтрансгаз Саратов»

предполагает нагрузку для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (ГВС). Эти нагрузки могут использоваться как для промышленных предприятий, так для жилых домов и общественных зданий [10]. Типовой суточный график тепловой нагрузки представлен на рис. 3.

Эти данные (рис. 3) позволяют определить необходимое количество теплоты для нужд потребителя с обязательным обеспечением санитарных норм температуры в помещении.

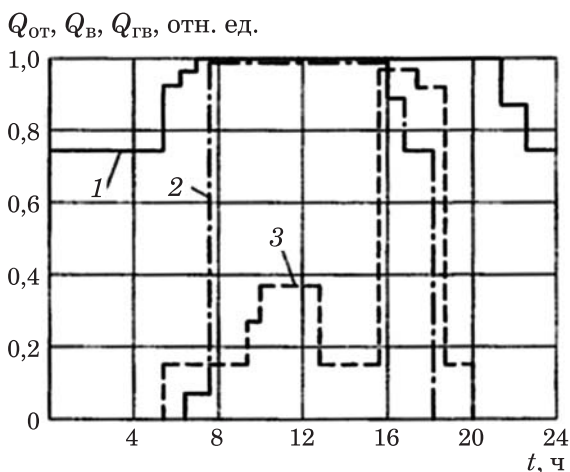


Рис. 3. Суточный график нагрузки отопления (1), вентиляции (2) и ГВС (3)

Кроме того, выработка теплоты когенерационной установкой, например, на базе газопоршневых двигателей, зависит от нагрузки на ДВС, которая, в свою очередь, зависит от потребления электрической энергии самим объектом.

Из указанного выше следует, что необходимо знать зависимость между значением вырабатываемой электрической энергии и значением тепловой энергии на том же режиме, получаемой за счет утилизации отводимого вторичного тепла от ДВС. Это позволит определить суммарное количество тепловой энергии, получаемой от когенерационной установки (КУ), вырабатываемое на средних эксплуатационных режимах работы КУ. Эти данные необходимо знать с учетом средней эксплуатационной мощности электрической нагрузки у потребителя.

Таким образом, становится актуальным вопрос по определению зависимости выработки тепловой энергии КУ от выработки электрической энергии ДВС.

На основании проведенных стендовых испытаний газового двигатель-генератора (ГДГ) с ДВС размерностью 6ЧН 21/21 и мощностью 500 кВт с частотой вращения коленчатого вал $16,6 \text{ с}^{-1}$ были получены экспериментальные

данные по его тепловому балансу. Далее по этим данным выполнены расчеты и получены регрессионные зависимости отводимой вторичной теплоты от электрической мощности ГДГ:

теплота, отводимая от второго контура — охлаждения масла и наддувочного воздуха:

$$Q_{2к} = 0,26P_e - 3,316; \quad (1)$$

теплота, отводимая с охлаждающей жидкостью от системы охлаждения двигателя:

$$Q_{охл} = 0,489P_e + 53,36; \quad (2)$$

теплота, отводимая с выхлопными газами:

$$Q_{г} = 0,6P_e + 40,54, \quad (3)$$

где Q — вторичная соответствующая теплота, кВт, отводимая от ГДГ; P_e — электрическая мощность ГДГ, кВт.

Таким образом, если взять две основные составляющие отводимой вторичной теплоты (как имеющие максимальные значения по абсолютной величине) для ее утилизации в КУ на базе ГДГ, то по формулам (2) и (3) получим:

$$Q_{утил} = Q_{охл} + Q_{г} = 1,1P_e + 93,9. \quad (4)$$

Тогда будем иметь возможность рассчитать значение утилизируемой теплоты в КУ на вполне конкретной электрической мощности ГДГ.

Полученные значения регрессионных зависимостей величин отводимой теплоты от КУ на основе экспериментальных данных позволяют рассчитать или как минимум спрогнозировать значение теплоты для возможного использования для отопления предполагаемого объекта. Более подробно этот вопрос изложен в работе [9].

В данной работе представлен алгоритм применения КУ на базе ДВС 6ЧН 21/21 (газовой модификации) с вполне определенными зависимостями по статьям теплового баланса для объекта (объектов) потребления вторичных энергоресурсов.

Необходимо отметить, что, используя этот алгоритм применения КУ с другими моделями ДВС, можно расширить «линейку» КУ и возможности их эксплуатации на различных объектах.

Выводы

1. Имея представленный алгоритм по определению возможности применения КУ на конкретном объекте и учитывая особенности ее работы можно рассчитать и подобрать параметры необходимого когенерационного комплекса для вполне конкретного потребителя с учетом его назначения и места расположения.

2. Разработать бизнес-план на стадии проектирования объекта с применением на нем КУ на базе ГДГ и ее параметрами.

3. Обеспечить энергетическую безопасность объекта и экономию углеводородного добываемого топлива, в данном случае природного газа.

4. Имеется возможность рассчитать параметры теплоутилизационного оборудования для проектирования системы утилизации вторичной теплоты, входящего в комплектацию КУ с ГДГ.

Список литературы

1. **Богданов, А. Б. Исследование о природе причин богатств и ущерба для национальной экономики от теплофикации России /** О. А. Богданова, А. Б. Богданов, Д. А. Богданов. https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=4190 (дата обращения 4.12.2024 г.)
2. **Сизоненко, Д. Н. Быть или не быть когенерации /** Д. Н. Сизоненко // *Новости теплоснабжения*. — 2019. — № 1(217). — С. 8 — 12.
3. **Буланин, В. А. Энергетический анализ эффективности когенерации /** В. А. Буланин // *Промышленная энергетика*. — 2021. — № 4. — С. 46 — 52.
4. **Степанов, В. С. Методы разнесения затрат топлива в системах когенерации /** В. С. Степанов, Т. Б. Степанова, Н. В. Старикова // *Промышленная энергетика*. — 2016. — № 3. — С. 2 — 7.
5. **Клюцен, Л. И. Малая энергетика: рассчитываем экономическую эффективность когенерации /** Л. И. Клюцен // *Справочник экономиста*. — 2023. — № 4. — С. 102 — 111.
6. **Бойко, А. А. Перспективы использования когенерационных установок /** А. А. Бойко // *Молодой ученый*. — 2024. — № 13(512). — С. 6 — 7.
7. **Тамаров, В. В. Проекты развития когенерации в Программе развития энергетики Ярославской области /** В. В. Тамаров (из выступления на отраслевой научно-практической конференции «Теплоснабжение и когенерация 2014», 9 — 10 сентября 2014 г., г. Москва). https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3350 (дата обращения 6.01.25 г.)
8. **Сайданов, В. О. Ведомственный свод правил ВСП 43-02-05/МО РФ: Правила проектирования стационарных электростанций с двига-**

- телями внутреннего сгорания объектов военной инфраструктуры / В. О. Сайданов, В. А. Путятинский, А. Н. Агафонов и др. — М.: Изд-во Минобороны. — 2005. — 93 с.
9. **Разуваев, А. В.** Расширение возможности работы когенерационных установок / А. В. Разуваев // Транспорт на альтернативном топливе. — 2024. — № 3 (99). — С. 73 – 78.
 10. **Николаев, Ю. Е.** Эффективность применения малых ТЭЦ с газовыми турбинами для энергоснабжения промышленных и коммунальных потребителей: учеб. пособие / Ю. Е. Николаев, С. В. Сизов. — Саратов: Саратов. гос. технический ун-т. — 2011. — 68 с.
6. **Boyko A. A.** *Molodoi uchenyi* (Young scientist), 2024, No. 13 (512), pp. 6 – 7.
 7. **Tamarov V. V.** *Proekty razvitiya kogeneratsii v Programme razvitiya energetiki Yaroslavskoi oblasti* (Cogeneration development projects in the Energy Development Program of the Yaroslavl Region), from a speech at the industry scientific and practical conference «Heat Supply and Cogeneration 2014», September 9 – 10, 2014, Moscow, [Electronic resource]. — URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3350 (accessed: 06.01.25)
 8. **Saidanov V. O., Putyatinsky V. A., Agafonov A. N.** *Vedomstvennyi svod pravil VSP 43-02-05/MO RF: Pravila proektirovaniya statsionarnykh elektrostantsii s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya ob"ektov voennoi infrastruktury* (Departmental set of rules VSP 43-02-05/MO RF: Rules for the design of stationary power plants with internal combustion engines of military infrastructure facilities), Moscow, Publ. Ministry of Defense, 2005, 93 p.
 9. **Razuvaev A. V.** *Transport na al'ternativnom toplive* (Transport on alternative fuel), 2024, No. 3 (99), pp. 73 – 78.
 10. **Nikolaev Yu. E., Sizov S. V.** *Effektivnost' primeneniya malykh TETs s gazovymi turbinami dlya energosnabzheniya promyshlennykh i kommunal'nykh potrebitelei* (Efficiency of using small CHP plants with gas turbines for power supply of industrial and municipal consumers), Saratov, Saratov State Technical University, 2011, 68 p.

vipdomik@mail.ru

Analysis of energy consumption of facilities and characteristics of a cogeneration plant

Razuvaev A. V.

In this work, an analysis of some literature sources on the effectiveness of the use of cogeneration plants on the basis of «large and small power generation» facilities is carried out with the conclusions presented in them. Below are materials on determining the parameters of a cogeneration plant necessary for calculating the electricity and heat supply of facilities for various purposes. In particular, graphs of energy consumption of some objects of the housing complex and industrial enterprises are presented. On the basis of experimental data, the heat balance items of a gas engine-generator with an electric power of 500 kW at a crankshaft speed of 16.6 sec⁻¹ were calculated. Further, according to these data, regression dependencies for the removed secondary heat with exhaust gases and coolant from the cogeneration unit depending on the electrical load of the gas engine — generator were compiled.

Keywords: cogeneration plant, gas engine-generator, energy load of facilities, regression dependencies.

DOI: 10.71759/bq30-jh73

Специальность 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

Разработка и экспериментальное исследование системы электрического обогрева с термоконтролем на основе пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры*

Федин М. А., доктор техн. наук,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Калинин В. А., (канд. техн. наук), **Негробов Я. С.**
ООО «НТЦ «САЙГИВАТ», Фрязино

Булатенко М. А., канд. экон. наук, **Гераскин А. Ю.**, аспирант
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Предложено использование пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры в системах электрического обогрева большой протяженности и площади. Приведена функциональная система электрического обогрева на основе пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков. Выполнена аппаратная и программная реализация щита управления гирляндой пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков. Экспериментально получены градуировочные характеристики пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры, связывающих функционально температуру с их резонансными частотами. Разработан экспериментальный стенд, включающий систему кабельного электрообогрева с гирляндой из восьми пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры. По результатам эксперимента построены температурные кривые нагрева саморегулирующегося кабеля с использованием пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков и термопары. Проведено сравнение температурных кривых нагрева, полученных с использованием пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры и термопары.

Ключевые слова: система электрического обогрева, распределённый термоконтроль, пьезокварцевый резонансно-частотный датчик температуры, щит управления, градуировочная характеристика, кривая нагрева.

Для современных систем электрообогрева (СЭО) большой длины и площади необходима цифровая система измерения пространственного распределения температуры от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перспективным решением является система контроля и измерения, сбора и передачи пользователю информации о распределении температуры путем опроса датчиков по двухпроводной линии конечного набора пассивных высокочастотных пьезокварцевых резонансно-частотных датчиков температуры (ПКРЧД), выполненных в виде гильз и соеди-

ненных электрически параллельно (по типу гирлянды).

Пьезокварцевые и пьезорезонансные датчики (давления, температуры, ускорения и др.) применяются в различных областях техники с 70-х годов прошлого века [1]. Основа таких датчиков — пьезокварцевый кристалл, который выступает в качестве резонатора [2]. При подаче на ПКРЧД электромагнитного сигнала низкой частоты (радиосигнала), пьезоматериал датчика начинает колебаться с частотой этого сигнала, проявляя при этом комплексный характер своего электрического сопротивления, которое при достижении резонансной частоты становится чисто активным и стремится к нулю. Резонансная частота колебаний пьезокварцевого кристалла ПКРЧД зависит от его температуры, но при одной температуре резонансные частоты у ПКРЧД в одной гирлянде разные, что является основой для по-

* Работа выполнена в рамках проекта «Разработка современных разветвленных скин-кабельных систем электрообогрева с цифровым двойником и пространственной цифровой системой термоконтроля» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024 – 2026 гг.».

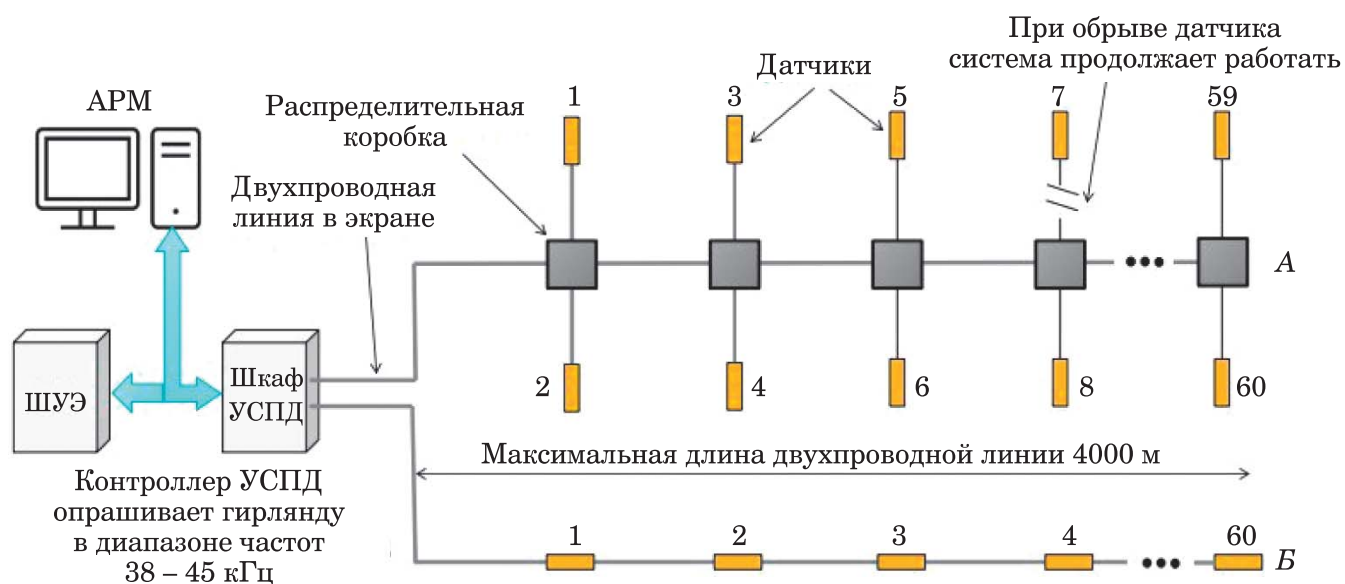


Рис. 1. Система электрического обогрева на основе ПКРЧД

строения системы косвенного измерения температуры [3, 4].

Преимущества использования ПКРЧД в СЭО состоят в высокой точности измерения температуры, быстром отклике на ее изменения, надежной работе в широком диапазоне температур, отсутствии электромагнитных влияний на работу датчика, малых размерах и низком энергопотреблении. ПКРЧД могут быть установлены как внутри обогреваемого объекта, так и на его поверхности, а также они могут быть интегрированы в систему автоматического управления температурой [5 – 8].

Принцип построения СЭО с ПКРЧД

Гирлянда ПКРЧД устанавливается с помощью специальной крепежной оснастки на поверхности контролируемого объекта под теплоизоляционным материалом при его наличии (рис. 1). ПКРЧД подключаются к щиту питания и управления, который последовательно формирует и отправляет радиосигналы низкой частоты в диапазоне 30 – 45 кГц по двухпроводной линии [9]. Предлагаемая система имеет древовидную структуру расположения ПКРЧД, допускает множество ветвлений в пределах одной гирлянды посредством применения распределительных коробок (рис. 1, вариант А) и позволяет контролировать температурный профиль объектов длиной до 4000 м в диапазоне температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 1 (вариант Б) показана структура гирлянды ПКРЧД без ветвлений. Технические харак-

теристики гирлянды датчиков приведены ниже.

Рабочий диапазон температур ПКРЧД, $^{\circ}\text{C}$	60 – 250
Точность контроля температуры, $^{\circ}\text{C}$	± 1
Количество одновременно опрашиваемых ПКРЧД	60
Рабочий диапазон частот датчиков ПКРЧД, кГц	30 – 50
Дистанция опроса датчиков ПКРЧД, м	1000
Время опроса одного датчика ПКРЧД в гирлянде, с	6
Рабочий диапазон температур щита управления, $^{\circ}\text{C}$	0 – 60
Напряжение питания щита управления, В	220
Потребляемая мощность ЩУ, не более, Вт	18
Выходной интерфейс щита управления	Ethernet или RS-485 ModBus RTU

В отличие от традиционных решений, где необходимо индивидуальное подключение каждого измерительного элемента, гирлянда датчиков ПКРЧД на двухпроводной линии подключается к щиту управления (рис. 2) только с одного конца. Такой подход снижает затраты на измерительные проводники и монтажные работы, а также вносит значительный вклад в общую энергоэффективность СЭО, что особенно актуально в контексте современных требований к эффективности промышленных предприятий [10].

Структурная схема щита управления приведена на рис. 2. В состав схемы входят вторичный источник питания ВИП (блок питания), программируемый логический кон-

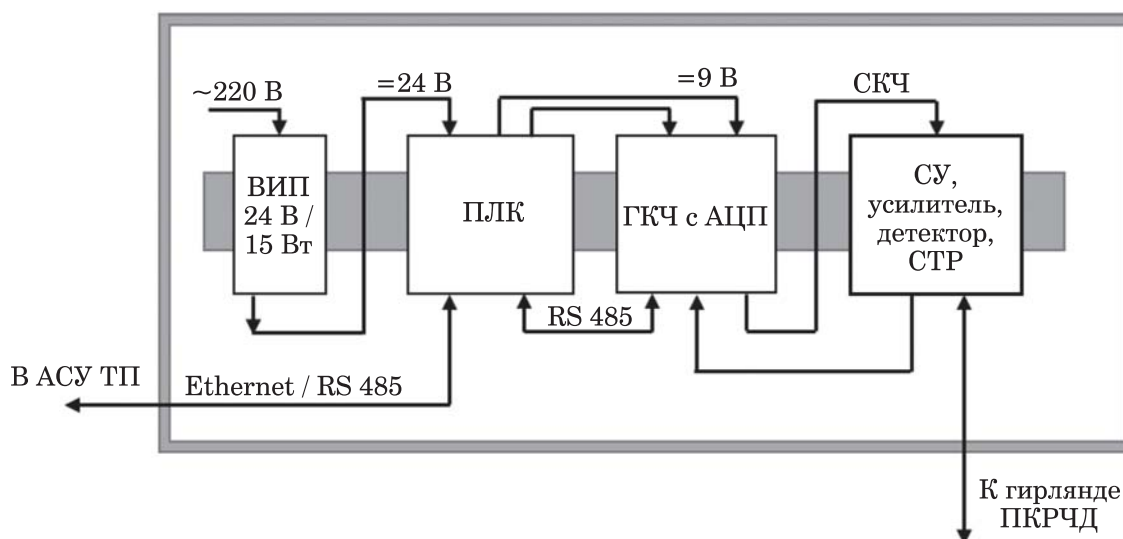


Рис. 2. Структурная схема щита управления

троллер ПЛК (обменивается информацией с автоматизированной системой управления технологическим процессом АСУ ТП), генератор качающейся частоты с аналого-цифровым преобразователем ГКЧ с АЦП, вырабатывающий сигнал качающейся частоты СКЧ, симметрирующее устройство СУ, усилитель, детектор и согласующий трансформатор СТР.

К основным функциям ГКЧ относятся вывод синусоидального сигнала заданной частоты на выходе DDS с точностью 0,1 Гц и амплитудой от 0 до 3 В и автоматический поиск и детектирование резонансных частот датчиков в заданной полосе частот [11]. Каждый датчик резонирует с опрашивающим сигналом качающейся частоты только на собственной резонансной частоте, и в этот момент электрическое сопротивление всей двухпроводной линии резко изменяется, что и фиксируется аппаратурой щита управления как резонансная частота конкретного датчика при искомой температуре [12].

Вычислительные устройства (программируемый логический контроллер WirenBoard и микроконтроллер MiniEVB), входящие в состав шкафа управления гирляндой ПКРЧД, реализуют программные подсистемы синхронизации, коммуникации, обработки данных, управления и контроля. Каждая из подсистем работает под управлением операционной системы с открытым исходным кодом Linux, что обеспечивает достаточную гибкость системы и точную калибровку всех данных в процессе информационного обмена [13].

В основе ГКЧ лежит стандартный модульный электронный компонент — микросхема STM32. Устройство последовательно вырабатывает близкие к синусоиде сигналы разной частоты с определенным шагом (0,1 и 1,0 Гц). Программа управления ГКЧ написана таким образом, чтобы уловить амплитуду сигнала, пропорционального току двухпроводной линии, соответствующую резонансной частоте каждого датчика, и зафиксировать значения этих резонансных частот. В момент падения сопротивления устройство начинает уменьшать шаг, чтобы как можно более точно уловить амплитуду сигнала, соответствующую резонансной частоте, после чего значение резонансной частоты фиксируется и записывается в регистр памяти.

Далее ГКЧ передает полученные данные контроллеру Wiren Board 7 по интерфейсу RS 485. В веб-интерфейсе ПЛК WirenBoard 7 с помощью виджетов языка программирования JavaScript выведены резонансные частоты каждого датчика гирлянды, полученные от контроллера STM32, соответствующие им температуры датчиков, диапазон частот опроса гирлянды, коэффициенты функциональных зависимостей температур датчиков от резонансной частоты [13, 14].

Для шкафа управления был подобран блок питания ВИП (рис. 2) MDR-10-12 для слабых систем управления со следующими характеристиками: входное напряжение — 100 – 240 В переменного тока, выходное напряжение — 12 В постоянного тока, ток — 0,84 А и мощность — 10 Вт. Данный блок пи-

тания имеет встроенную защиту от КЗ и перенапряжений.

Определение градуировочной характеристики датчика

Для использования ПКРЧД в качестве датчиков температуры необходимо экспериментальное определение их градуировочных характеристик [4]. В рамках данного исследования были проведены испытания гирлянды, состоящей из восьми датчиков ПКРЧД, в климатической камере ERSTVAK EVCLIM КТХВ-408-D [5]. С целью учёта нелинейности градуировочной характеристики для каждого датчика проводилось определение значений резонансной частоты для семи различных температур в диапазоне от 0 °С до +130 °С, по которым строились графики экспериментальных зависимостей и подбирались аппроксимирующие функции. Эти функции можно записать в виде полинома третьего порядка [2]:

$$f(t) = f_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3),$$

где A, B, C — коэффициенты, определяемые типом среза ПКРЧД; t — измеряемая температура; f_0 — постоянная частота, выдаваемая опорным генератором; f — резонансная частота ПКРЧД.

По измеренным значениям резонансной частоты в зависимости от температуры конкретного датчика были получены уравнения третьего порядка для каждого из них. Для удобства использования полученных функциональных зависимостей в ПЛК для косвенного определения температуры они были пересчи-

таны в зависимости температуры от резонансной частоты для каждого ПКРЧД. Например, для одного из датчиков (соответствуют датчику Д3 на рис. 3) в ходе эксперимента было получено уравнение третьего порядка следующего вида:

$$t(f) = 0,000000217617295t^3 - 0,024718575129552t^2 + 935,408967214577t - 11793181,3010764.$$

Из уравнения видно, что увеличение температуры от 0 °С до 130 °С приводит к снижению резонансной частоты датчика от 37,6 кГц до 37,3 кГц.

Проведение эксперимента

Эксперимент проводился на специально разработанном в НИУ «МЭИ» на кафедре ЭППЭ стенде для изучения эффективности применения ПКРЧД в СЭО труб с водой, а также для проверки показаний температуры, полученных с использованием ПКРЧД, путем их сравнения с показаниями, полученными с использованием эталонных датчиков, например, термоэлектрических преобразователей. Функциональная схема стенда приведена на рис. 3.

Питание экспериментальной установки осуществляется от однофазной сети напряжением 220 В промышленной частоты. Функцию защиты от токов короткого замыкания выполняет автоматический выключатель $QF1$. ПКРЧД Д1 – Д8, установленные вдоль трубы, подключены к щиту управления А1 с Wi-Fi мо-

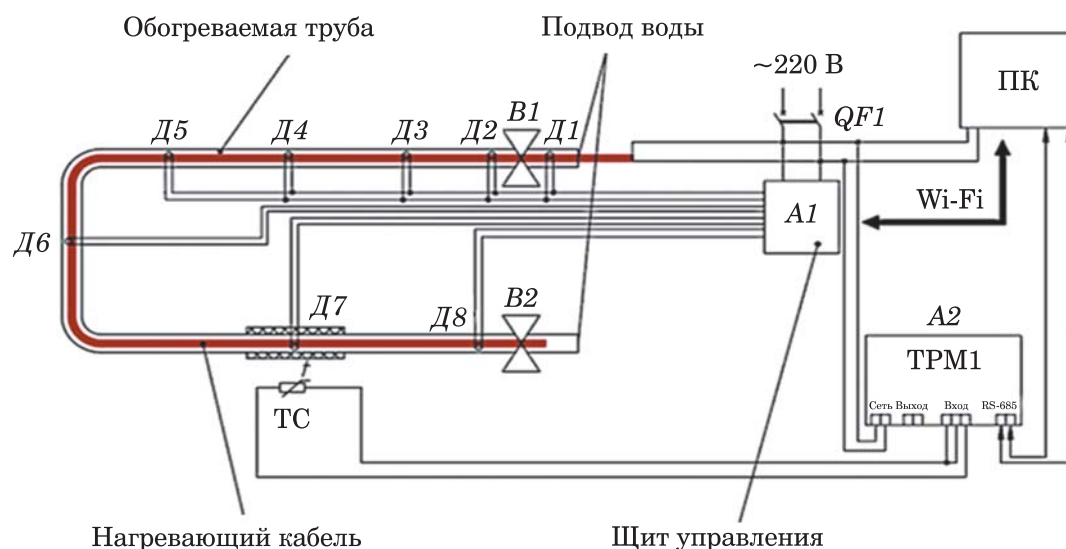


Рис. 3. Функциональная схема экспериментального стенда

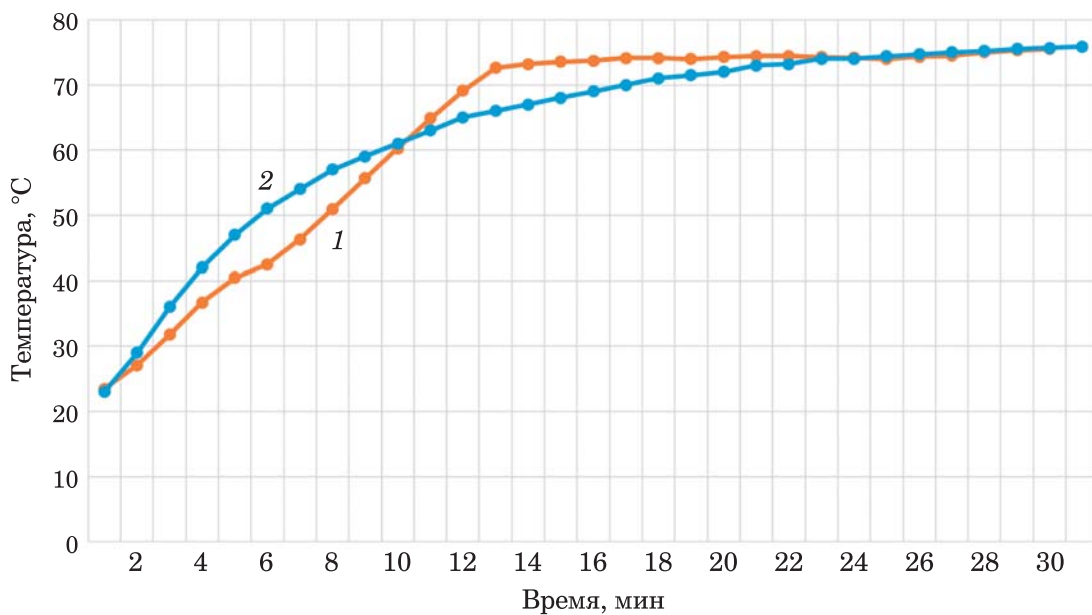


Рис. 4. Температурные кривые нагревательного кабеля на трубе с двумя слоями теплоизоляции, полученные с помощью ПКРЧД (кривая 1) и термоэлектрического преобразователя (кривая 2)

дулем для беспроводного подключения к персональному компьютеру ПК, с которого можно управлять процессом измерения, задавать градуировочные характеристики датчиков и фиксировать температурные показатели в реальном времени в веб-интерфейсе ПЛК WirenBoard.

Электрический саморегулирующийся нагревательный кабель располагается вдоль *U*-образной полипропиленовой трубы диаметром 1/2" и длиной 3,5 м с возможностью подключения к системе водоснабжения и регулирования интенсивности потока воды с помощью электрических клапанов *B1*, *B2*.

В качестве тепловой изоляции обогреваемой трубы используются две теплоизоляционные трубки *K-Flex* из вспененного полиэтилена с внутренними диаметрами 22 мм и 42 мм и с толщиной стенки 9 мм, надетые одна на другую, образуя двухслойную теплоизоляцию обогреваемой кабелем трубы. В систему интегрирован терморегулятор ТРМ1, поддерживающий заданную температуру на основе сигнала от термосопротивления *ТС*. Для верификации данных, собранных с ПКРЧД, в рамках эксперимента организовано параллельное снятие температурных показаний с двух термопар с открытым спаем (на рис. 3 не показаны), характеризующихся очень малой тепловой инерционностью, что позволяет им быстро реагировать на изменения температуры и обеспечивать высокую точность измерений [15, 16].

При размещении обоих датчиков под двумя слоями теплоизоляции (рис. 4) максимальная абсолютная разница показаний, снятых с ПКРЧД и термопары, составила 14,3 °C (максимальное относительное отклонение 28 %).

Среднее абсолютное отклонение по всем измерениям составило около 1,9 °C. При размещении обоих датчиков открыто на трубе без тепловой изоляции (рис. 5) максимальное абсолютное отклонение показаний составило 15,3 °C (максимальное относительное отклонение составило 28 %), среднее абсолютное отклонение — около 3,8 °C.

Основной причиной расхождения температурных кривых, по мнению авторов, является влияние тепловой инерции термоусадочной трубки, надетой на гильзу ПКРЧД, так как ее теплоизолирующие свойства сильно сказываются на скорости передачи тепла металлической гильзе датчика. При оценке тепловой постоянной времени трубы, находящейся под двойным слоем тепловой изоляции, начальная температура датчика составляла 23 °C, а конечная температура, к которой стремится система в установившемся режиме, равнялась 76 °C. Разница температур составила 53 °C. Для определения тепловой постоянной времени использовалась температура, соответствующая 63,2 % от этой разницы. Расчет показал, что данная температура составляет 56,6 °C. ПКРЧД достиг этой температуры через 9,2 мин после начала измерений, следовательно, тепловая постоянная времени трубы с дву-

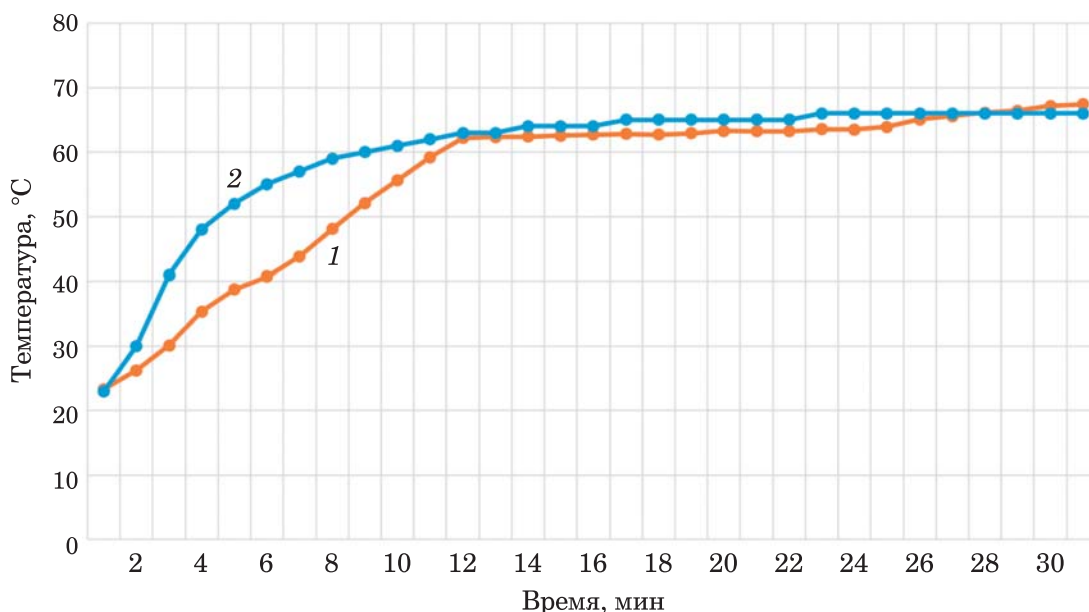


Рис. 5. Температурные кривые нагревательного кабеля на трубе без теплоизоляции, полученные с помощью ПКРЧД (кривая 1) и термоэлектрического преобразователя (кривая 2)

мя слоями тепловой изоляции оценивается в 9,2 мин. Аналогичным образом установлено, что тепловая постоянная времени нетеплоизолированной трубы составляет примерно 7,5 мин.

Из приведенных экспериментальных результатов видно, что тепловую постоянную времени ПКРЧД с учетом наличия термоусадочной трубки можно принять в диапазоне 60 – 90 с, что важно учитывать при использовании ПКРЧД в более прецизионных системах, требующих высокой скорости реакции, или в системах с малой тепловой инерцией.

Выводы

1. Использование ПКРЧД в сочетании с современными системами автоматического управления в СЭО открывает новые возможности для точного и надежного контроля температурных режимов. Разработанный экспериментальный стенд, включающий СЭО с мониторингом температуры, продемонстрировал способность ПКРЧД обеспечивать работу системы термоконтроля в широком диапазоне температур. Полученные градуировочные характеристики позволили установить зависимость между резонансной частотой и температурой и откалибровать систему контроля. Температурные кривые, построенные с использованием ПКРЧД и термопар, стабилизируются практически одновременно, что свидетельствует о высокой точности данных, сня-

тых с ПКРЧД, покрытых термоусадочной трубкой, несмотря на их более высокую тепловую инерционность.

2. Тепловая постоянная времени трубы с двумя слоями тепловой изоляции оценивается в 9,2 мин, а для нетеплоизолированной трубы — 7,5 мин. Сравнение температурных кривых в части отклонений показаний, полученных от ПКРЧД и термопар, свидетельствуют о том, что тепловая изоляция способствует снижению максимального и среднего абсолютных отклонений: 15,3 °C и 3,8 °C — для датчиков без теплоизоляции; 14,3 °C и 1,9 °C — для датчиков под двумя слоями теплоизоляции соответственно. Отклонения указывают на необходимость дальнейшего совершенствования системы термоконтроля с ПКРЧД как в аппаратной, так и в программной частях, расширяя возможности их применения в различных сферах.

Список литературы

1. Малов, В. В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. В. Малов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.
2. Михеев, В. П. Датчики и детекторы: Учебное пособие / В. П. Михеев, А. В. Просандеев. — М.: МИФИ, 2007. — 172 с.
3. Коновалов, С. И. К вопросу о частотах резонанса и антирезонанса пластинчатого пьезокерамического преобразователя / С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко // Дефектоскопия. — 2017. — № 11. — С. 50 – 54.

4. **Milan D. Radmanovich. Designing and modeling of the power ultrasonic transducers** / Milan D. Radmanovich, Dragan D. Mancic // University of Nis: Faculty of Electronics, 2004. — 198 p.
5. **Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики** / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шаропова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
6. **Бобцов, А. А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений** / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, В. В. Григорьев, П. В. Карев. — СПб.: Университет ИТМО, 2017. — 134 с.
7. **Юманова, Л. А. Распределённая система измерения физических величин на основе пьезорезонансных датчиков** / Л. А. Юманова. — Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы. — Казань, 2023. — С. 603 – 604.
8. **Вавилов, В. Д. Микросистемные датчики физических величин** / В. Д. Вавилов, С. П. Тимошенко, А. С. Тимошенко. — М.: Техносфера, 2018. — 550 с.
9. **Sedalischev, V. Simulation of measuring transducers based on interconnected piezoresonators** / V. Sedalischev, Ya. Sergeeva // X International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2020. Barnaul, 24 – 25 April 2020 / J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1615, article: 012030.
10. **Хлыстов, А. И. Управление производством — основа повышения энергетической результативности промышленного предприятия** / А. И. Хлыстов, Л. А. Копцев, В. В. Штафиевко, И. А. Япрынцева, М. Н. Жарова // Промышленная энергетика. — 2019. — № 9. — С. 2 – 9.
11. **Богущ, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей** / М. В. Богущ. — М.: Техносфера, 2014. — 312 с.
12. **Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / А. Оппенгейм, Р. Шафер.** — М.: Техносфера, 2006. — 856 с.
13. **Свекис Лоренс Ларс. JavaScript с нуля до профи** / Свекис Лоренс Ларс, Путтен Майке ван, Персиваль Роб. — СПб.: Питер, 2023. — 480 с.
14. **Федин, М. А. Система распределённого термомониторинга на основе пьезорезонансных датчиков** / М. А. Федин, А. И. Василенко, К. В. Северин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2024. — С. 530.
15. **Федин, М. А. Экспериментальное определение градуировочной характеристики пьезорезонансных датчиков для измерения температуры в системе электрообогрева** / М. А. Федин, А. И. Василенко, В. В. Кривошеин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2024. — С. 533.
16. **Разина, А. П. Тепловая инерция датчиков температуры** / А. П. Разина // ИСУП. — 2020. — № 2. — С. 15 – 17.

References

1. **Malov V. V. P'ezorezonansnye datchiki** (Piezoresonance sensors), 2nd ed., revised. and add, Moscow, Energoatomizdat, 1989, 272 p.
2. **Mikheev V. P., Prosandeev A. V. Datchiki i detektory** (Sensors and detectors), Moscow, MEPhI, 2007, 172 p.
3. **Konovalov S. I., Kuzmenko A. G. Defektoskopiya** (Journal of Nondestructive Testing), 2017, No. 11, pp. 50 – 54.
4. **Milan D. Radmanovich, Dragan D. Mancic. Designing and modeling of the power ultrasonic transducers**, University of Nis: Faculty of Electronics, 2004, 198 p.
5. **Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova E. V. P'ezoelektricheskie datchiki** (Piezoelectric sensors), Moscow, Tekhnosfera, 2006, 632 p.
6. **Bobtsov A. A., Boykov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Karev P. V. Iсполnitel'nye ustroistva i sistemy dlya mikroperemeshchenii** (Actuators and systems for microdisplacements), St. Petersburg, ITMO University, 2017, 134 p.
7. **Yumanova L. A. Prikladnaya elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy** (Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems), Kazan, 2023, pp. 603 – 604.
8. **Vavilov V. D., Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S. Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin** (Microsystem Sensors of Physical Quantities), Moscow, Tekhnosfera, 2018, 550 p.
9. **Sedalischev V., Sergeeva Ya. Simulation of Measuring Transducers Based on Interconnected Piezoresonators**, X International Conference on High-performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production (HPCST) 2020, Barnaul, 24 – 25 April 2020, J. Phys., Conf. Ser., Vol. 1615, No. 012030.
10. **Khlystov A. I., Koptsev L. A., Shtafienko V. V., Yapryntseva I. A., Zharova M. N. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 2019, No. 9, pp. 2 – 9.
11. **Bogush M. V. Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektropugikh modelei** (Design of piezoelectric sensors based on spatial electroelastic models), Moscow, Tekhnosfera, 2014, 312 p.
12. **Oppenheim A., Shafer R. Tsifrovaya obrabotka signalov** (Digital signal processing), Moscow, Tekhnosfera, 2006, 856 p.
13. **Svekis Lawrence Lars, Putten Meike van, Percival Rob. JavaScript s nulya do profi** (JavaScript from scratch to pro), St. Petersburg, Piter, 2023, 480 p.

14. **Fedin M. A., Vasilenko A. I., Severin K. V.** *Sistema raspredelennogo termokontrolya na osnove p'ezorezonansnykh datchikov* (Distributed temperature control system based on piezoelectric resonance sensors), Radio electronics, electrical engineering and power engineering, Moscow, OOO «Center for printing services «RADUGA», 2024, p. 530.
15. **Fedin M. A., Vasilenko A. I., Krylov V. V.** *Ekspperimental'noe opredelenie graduirovочноi kharakteristiki p'ezorezonansnykh datchikov dlya izmereniya temperatury v sisteme elektroobogreva* (Experimental determination of the calibration characteristic of piezoelectric resonance sensors for measuring temperature in an electric heating system), Radio electronics, electrical engineering and power engineering, Moscow, OOO «Center for printing services «RADUGA», p. 533.
16. **Razina A. P.** *ISUP* (ISUP), 2020, No. 2, pp. 15 – 17.

FedinMA@mpei.ru

Development and experimental study of an electric heating system with thermal control based on piezo-quartz resonant frequency temperature sensors

Fedin M. A., Kalinin V. A., Negrobov Ya. S., Bulatenko M. A., Geraskin A. Yu.

The use of piezoelectric resonant-frequency temperature sensors in large-area and long-distance electric heating systems is proposed. A functional electric heating system based on piezoelectric resonant-frequency sensors is presented. The hardware and software implementation of a control panel for a garland of piezoelectric resonant-frequency sensors is performed. The calibration characteristics of piezoelectric resonant-frequency temperature sensors, which functionally relate temperature to their resonant frequencies, are experimentally obtained. An experimental stand has been developed that includes a cable electric heating system with a garland of eight piezoelectric resonant-frequency temperature sensors. Based on the experiment results, temperature heating curves of a self-regulating cable using piezoelectric resonant-frequency sensors and a thermocouple have been constructed. A comparison of temperature heating curves obtained using piezoelectric resonant-frequency temperature sensors and a thermocouple has been carried out.

Keywords: electric heating system, distributed temperature control, piezoelectric resonant frequency temperature sensor, control panel, calibration characteristic, heating curve.

DOI: 10.71759/ssgm-2b10

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Исследование и разработка методики выбора параметров и регулятора напряжения активного фильтра гармоник

Шевырёв Ю. В., доктор техн. наук, Крещановский П. С., аспирант
ФГАОУ ВО «НИТУ МИСИС», Москва

С целью энергосбережения и гибкого управления технологическими процессами в настоящее время практически на всех промышленных предприятиях внедряются мощные частотно-регулируемые электроприводы. Такие решения позволяют экономить электроэнергию, снизить нагрузку на оборудование и увеличить срок службы машин и механизмов. Однако широкое использование частотных преобразователей приводит к существенному отклонению формы напряжения в электрических сетях от синусоидальной. Перспективные средства фильтрации высших гармоник — активные фильтры гармоник. Важным аспектом проектирования систем электроснабжения с АФГ является правильный выбор параметров активного фильтра гармоник, а также удержание и регулирование напряжения емкостного накопительного звена.

Ключевые слова: качество электроэнергии, распределительная сеть, частотно-регулируемый электропривод, активный фильтр гармоник, параметры активного фильтра гармоник, регулятор напряжения.

Необходимость повышения производительности и оптимизации использования сырья и энергии технологических процессов приводит современную промышленность к необходимости перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому, дающему значительный эффект как в части экономии электроэнергии, так и совершенствовании самого технологического процесса [1].

Повсеместное внедрение частотно-регулируемых электроприводов в промышленности, кроме энергосбережения, позволяет интегрировать такие установки в единую систему управления технологическим процессом, снизить нагрузку на оборудование и увеличить срок службы машин и механизмов.

Широкое использование мощных частотных преобразователей приводит к существенному отклонению формы напряжения в электрических сетях от синусоидальной [2]. Искажение синусоидальной формы кривой напряжения и тока увеличивает потери мощности в элементах электросистемы, сокращает срок службы электротехнического оборудования, приводит к высокой вероятности резонанса в системе электроснабжения и выходу из строя батарей статических конденсаторов, а также к сбою в работе систем релейной защиты и автоматики.

Перспективным средством фильтрации высших гармоник являются активные фильт-

ры гармоник (АФГ), основанные на полупроводниковых приборах [3, 4]. Важный аспект проектирования систем электроснабжения с АФГ — правильный выбор параметров активного фильтра гармоник и регулирование напряжения емкостного накопительного звена.

Цель и задачи

Цель данной работы — исследование и разработка методики выбора параметров активного фильтра гармоник и регулятора напряжения на конденсаторе АФГ.

Основными задачами являются:

обоснование метода выбора индуктивности реактора и емкости накопительного конденсатора активных фильтров гармоник при регулировании напряжения конденсатора активного фильтра и учете параметров нелинейных потребителей;

исследование эффективности применения активных фильтров гармоник для повышения качества электроэнергии при учете изменения параметров нелинейных потребителей и длины линии питания трансформатора подстанции.

Методика исследований

Все исследования выполнены при помощи специально разработанных компьютерных

программ, учитывающих свойства преобразователей частоты (ПЧ) и системы электроснабжения [5].

Под эффективностью применения АФГ в данной работе понимается снижение уровня высших гармоник до допустимых значений при заданном быстродействии и перерегулировании системы управления АФГ.

Показателями качества электроэнергии (ПКЭ), на которые следует опираться при исследовании эффективности применения АФГ, являются суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения K_u и тока K_i в точках присоединения частотно-регулируемых электроприводов к сети.

На основании указанного предлагается следующая методика исследования.

1. Составляется имитационная модель распределительной сети электроснабжения, содержащая источники ЭДС, сопротивления линий электропередачи, силовые трансформаторы, ЧРЭП, АФГ.

2. При отключенном АФГ с помощью этой модели определяются значения K_u и K_i в точках присоединения частотно-регулируемых электроприводов к сети.

3. Используя разработанную имитационную модель, находятся K_u и K_i при коррекции гармонического содержания активным фильтром с разными параметрами при отсутствии и наличии регулятора напряжения емкостного звена АФГ.

4. Осуществляется анализ результатов исследований, выполненных в п. 2 и 3. На основе выполненного анализа делаются выводы об эффективности применения активных фильтров гармоник и необходимости регулирования напряжения емкостного звена АФГ.

Структура системы электроснабжения

Так как специфических отличий в структурах распределительных сетей нет, то в качестве объекта исследования рассматривается схема электроснабжения куста добычи нефти с использованием установок погружных электроцентробежных насосов (УЦЭН) с частотно-регулируемым электроприводом (ЧРЭП). Выбор такого объекта исследования объясняется широким применением ЧРЭП в нефтепромысловых электрических сетях, что вызывает значительные искажения синусоидальной формы напряжения питания УЦЭН [1, 6]. Это подтверждается результатами инструментальных исследований качества электроэнер-

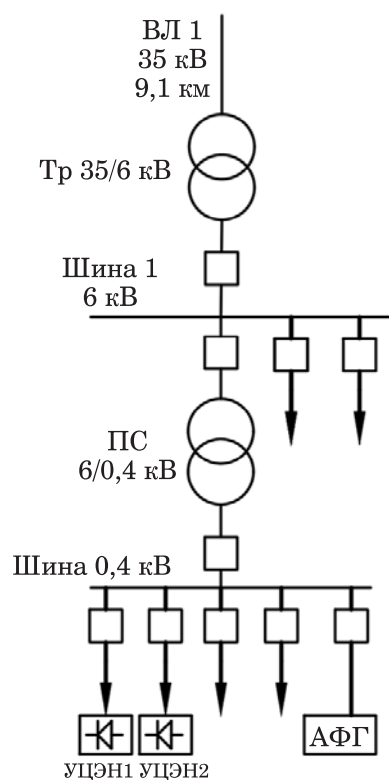


Рис. 1. Схема электроснабжения куста

гии, выполненные сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания» на Приобском месторождении ООО «РН-Юганскнефтегаз» [6]. Результаты измерений показали, что реальные значения коэффициентов гармонических искажений напряжения на шинах 6 кВ превышают допустимые значения в соответствии с ГОСТ 32144–2013, что требует применения специальных средств повышения качества электроэнергии.

Схема электроснабжения исследуемого куста добычи нефти в упрощенном виде приведена на рис. 1.

Питание куста скважин осуществляется по воздушной линии 35 кВ. На кустовой площадке установлена понижающая подстанция ПС 35/6 кВ мощностью 6,3 МВ·А, от которой по линии 6 кВ получает питание КТП-6/0,4 кВ мощностью 1 МВ·А. От РУНН 0,4 кВ этой КТП осуществляется распределение электрической энергии непосредственно к насосным установкам УЦЭН.

Для исследования влияния ЧРЭП и АФГ на качество электроэнергии в соответствии со схемой на рис. 1, в среде Matlab Simulink разработана имитационная модель схемы электроснабжения, учитывающая наличие ЧРЭП и АФГ.

Модель активного фильтра гармоник

В разработанной модели применяется активный фильтр с двухуровневой топологией инвертора. Система вычисления компенсируемых токов основана на теории мгновенной мощности, разработанной Х. Акаджи [3]. Модуляция компенсируемых токов осуществляется релейным модулятором. Также для фильтрации высокочастотных помех от АФГ применяется выходной RLC фильтр.

На рис. 2 приведена функциональная схема параллельного АФГ с двухуровневым инвертором и релейной схемой модуляции компенсируемых токов и нелинейной нагрузки. Нелинейной нагрузкой являются частотно-регулируемые электроприводы, которые содержат входной реактор с индуктивностью $L_{чрЭП}$, неуправляемый выпрямитель, сглаживающий конденсатор емкостью $C_{чрЭП}$, двухуровневый инвертор на IGBT, асинхронный двигатель.

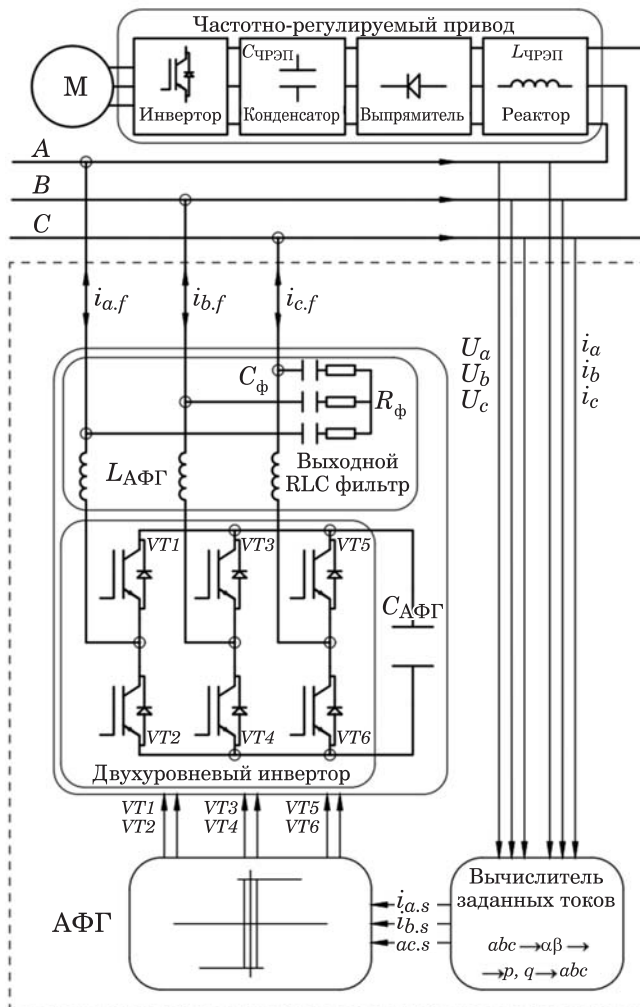


Рис. 2. Функциональная схема параллельного АФГ и нелинейной нагрузки

Параметры активных фильтров, влияющие на эффективность компенсации высших гармонических составляющих (ВГС)

К параметрам активного фильтра гармоник, влияющих на эффективность компенсации ВГС, относятся следующие:

1. Параметры выходного RLC фильтра:

индуктивность реактора $L_{АФГ}$;

емкость конденсаторов $C_ф$;

активное сопротивление $R_ф$.

2. Емкость конденсатора звена постоянного тока $C_{АФГ}$.

Емкость конденсаторов $C_ф$ и активное сопротивление $R_ф$ (по результатам машинных расчетов) имеют фиксированные значения для достижения эффективной работы на всех диапазонах параметров АФ. Необходимым и достаточным условием для фильтрации высокочастотных помех, создаваемых активным фильтром, является выполнение неравенств $R_ф \geq 5 \text{ Ом}$ и $C_ф \geq 10 \text{ мкФ}$.

Также на эффективность компенсации ВГС фильтров влияют такие внешние факторы как:

параметры питающей сети;

высшие гармонические составляющие питающей сети;

параметры линий питания нелинейных потребителей;

параметры нелинейных потребителей.

Регулирование напряжения на конденсаторе активного фильтра

Для стабильной работы АФГ необходимо стабильное напряжение на емкостном элементе звена постоянного тока. Повлиять на уровень напряжения $C_{АФГ}$ можно путем регулирования активной и реактивной составляющих компенсационных токов.

После выделения компенсируемых активных p и реактивных q составляющих мощностей (перед дальнейшим преобразованием p и q в компенсируемые токи) выполняется регулирование напряжения на звене постоянного тока АФ. В качестве регулятора напряжения предлагается использование пропорционального регулятора. На рис. 3 представлена структурная схема вычисления компенсируемых токов АФГ с регулятором напряжения на конденсаторе.

Для регулирования напряжения на звене постоянного тока предлагаемый регулятор на

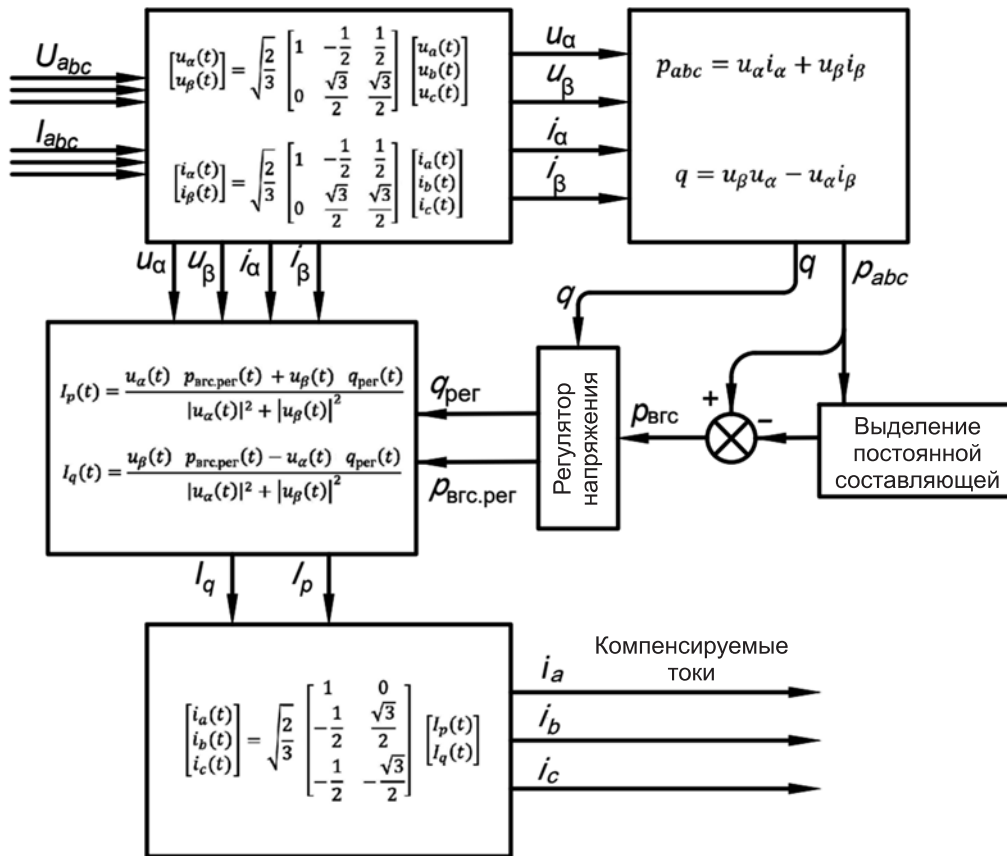


Рис. 3. Структурная схема вычисления компенсируемых токов активным фильтром гармоник с регулятором напряжения на конденсаторе

пряжения управляет мощностями $p_{врс}(t)$ и q по следующим законам:

$$p_{врс.пер}(t) = p_{врс}(t) f(U_C) = p_{врс}(t) \left[1 - \frac{K_1 (U_C - U_{Опр})}{U_{Опр}} \right]; \quad (1)$$

$$q_{пер}(t) = q(t) f(U_C) = q(t) \left[1 - \frac{K_2 (U_C - U_{Опр})}{U_{Опр}} \right]; \quad (2)$$

где $p_{врс.пер}(t)$ и $q_{пер}(t)$ — выходные значения с регулятора напряжения; $U_{Опр}$ — опорное напряжение (сигнал задания) регулятора; K_1 и K_2 — коэффициенты усиления регулятора напряжения звена постоянного тока.

Коэффициенты усиления регулятора K_1 и K_2 выбираются из условий достаточного быстрого действия регулятора (при учете постоянной времени контура), включающего индуктивность реактора и емкость конденсатора АФГ. При этом для получения максимальной эффективности работы АФГ (на основании по-

лученных на модели результатов) предлагается принимать $K_2 = K_1/2$.

Предлагаемый регулятор не исключает полностью ошибку регулирования, но может в разной степени приближать значения реального напряжения конденсатора к опорному (желаемому). При этом выбранные коэффициенты K_1 и K_2 должны исключать возникновение колебаний в системе регулирования АФГ.

При проведении машинных экспериментов были определены допустимые значения индуктивности выходного реактора АФГ $L_{АФГ}$ в зависимости от тока нелинейной нагрузки:

$$L_{АФГ} \approx \frac{1000 - 60n}{I_n}, \quad (3)$$

где I_n — ток нелинейной нагрузки, А; n — коэффициент, выбирается исходя из технологических возможностей или параметров уже существующих силовых частей инвертора, рекомендуется выбирать (для оптимальной работы АФГ) в пределах от 6 до 10.

При проведении расчетов на модели с перебором возможных значений коэффициентов K_1 , $L_{АФГ}$, $C_{АФГ}$, а также $L_{чрЭП}$ и $C_{чрЭП}$, было

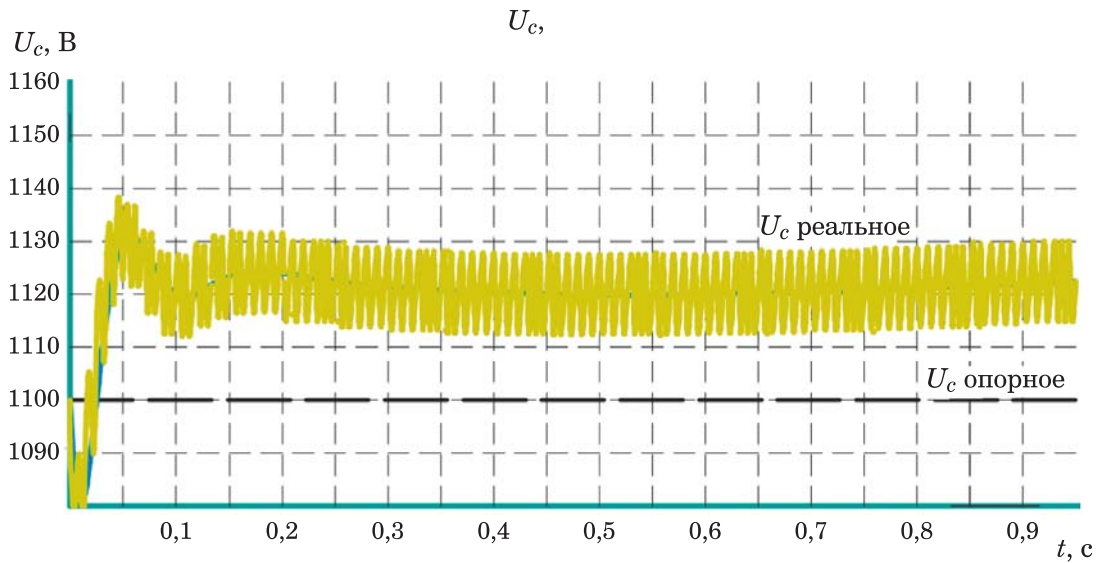
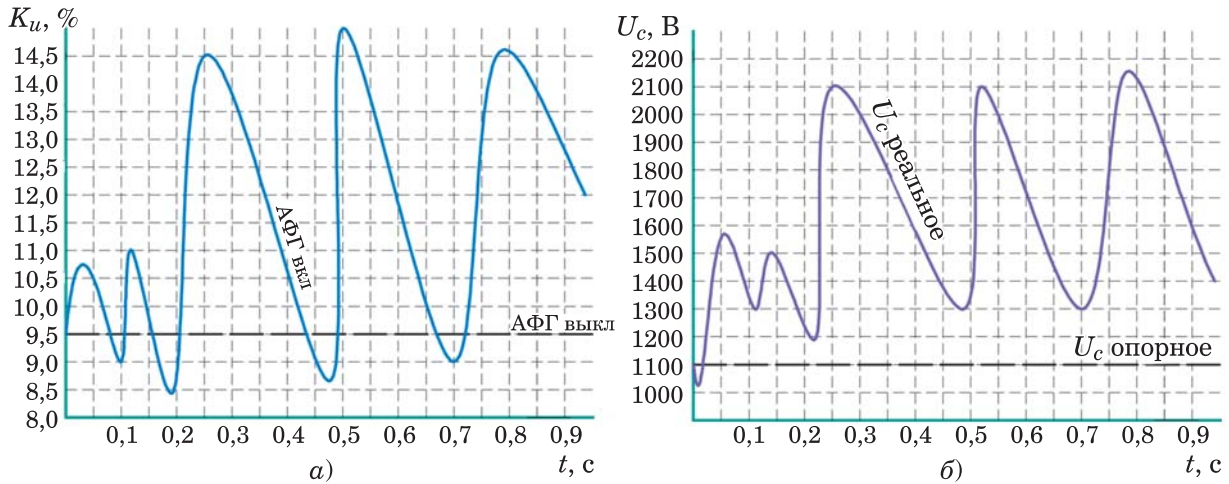


Рис. 4. График напряжения на конденсаторе АФГ

Рис. 5. Графики K_u и U_c при невыполнении условия выбора емкости $C_{АФГ}$

получено следующее выражение, по которому можно определить емкость накопительного конденсатора АФГ $C_{АФГ}$ в соответствии с выбранным коэффициентом K_1 и применяемых в ЧРЭП индуктивностей реакторов $L_{ЧРЭП}$:

$$C_{АФГ} \geq \frac{(4,5 - 1,8 \lg[85 L_{ЧРЭП}]) K_1}{L_{АФГ}}, \quad (4)$$

где $C_{АФГ}$ — емкость конденсатора активного фильтра, мкФ; $L_{ЧРЭП}$ — индуктивность реактора ЧРЭП мкГн/(кВ·А); $L_{АФГ}$ — индуктивность реактора АФГ, мГн.

Выражение (4) для выбора $L_{АФГ}$ получено в ходе исследования на модели, при этом условиями выбора $L_{АФГ}$ являлись стабильная работа регулятора напряжения на конденсаторе АФГ и существенное снижение K_u .

Анализ выражения (4) позволяет сделать вывод о наличии связи между коэффициентами K_1 , $L_{АФГ}$, $C_{АФГ}$, I_n , а также $L_{ЧРЭП}$. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведен график напряжения на конденсаторе АФГ при работе регулятора напряжения в случае, когда коэффициенты регуляторов напряжения K_1 и K_2 выбраны с учетом $L_{АФГ}$, $C_{АФГ}$, I_n , $L_{ЧРЭП}$ в соответствии с выражением (4).

Однако выбор емкости $C_{АФГ}$ меньше значения, чем предусмотрено выражением (4), может вызывать нестабильную работу регулятора напряжения и АФ в целом. Для подтверждения указанного на рис. 5 приведены графики изменения во времени K_u (рис. 5, а) и напряжения на конденсаторе U_c (рис. 5, б) для этого случая. Эти графики наглядно показывают возникновение колебаний при нару-

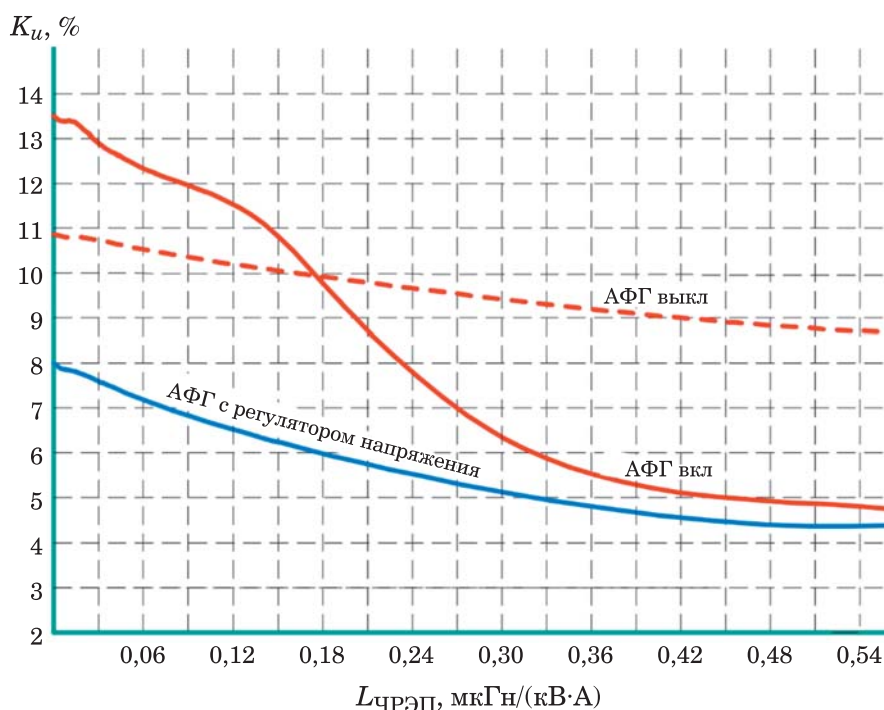


Рис. 6. Зависимости K_u от индуктивности реактора нагрузки

шении условия выбора емкости $C_{АФГ}$ при известных $L_{АФГ}$, $L_{чрЭП}$, K_1 в соответствии с (4).

На рис. 6 приведены результаты вычислений коэффициента K_u при изменении индуктивности реакторов на электроприводах нагрузки при наличии регулятора напряжения. Как видно, применение регулятора напряже-

ния конденсатора АФГ увеличивает эффективность применения активного фильтра независимо от значения индуктивности реактора нагрузки, в том числе при его отсутствии. Однако включение АФГ без регулятора напряжения требует наличия реактора нагрузки, минимальное значение индуктивности которого должно быть около 17 мкГн/(кВ·А).

Предложенный регулятор напряжения повышает эффективность АФГ также при изменении уровня нелинейной нагрузки в процессе эксплуатации. Подтверждением сказанного стали результаты исследования на имитационной модели, показанные на рис. 7.

АФГ по предложенной методике был настроен на загрузку трансформаторной подстанции нелинейной нагрузкой $\beta_{нл} = 0,36$. После настройки модели АФГ на конкретную нагрузку получена зависимость коэффициента K_u при изменении нелинейной нагрузки. Она показывает, что при отклонении нагрузки от расчетной в случае реальных режимов работы коэффициент K_u не превышает нормативного значения 8 %.

Предложенный метод регулирования напряжения на конденсаторе АФГ расширяет допустимую длину линии питания подстанции.

На рис. 8 представлена графическая зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от длины линии питания трансформатора подстанции.

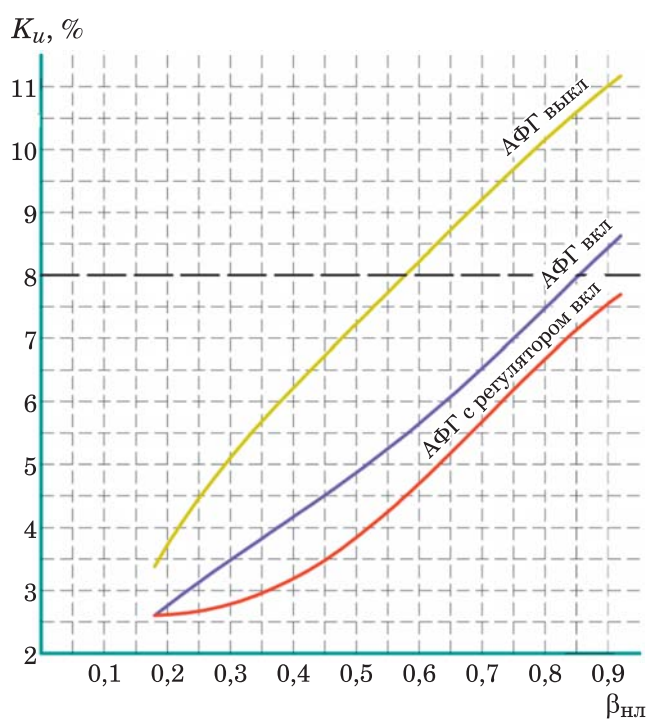


Рис. 7. Зависимости коэффициента K_u от загрузки трансформатора нелинейной нагрузкой

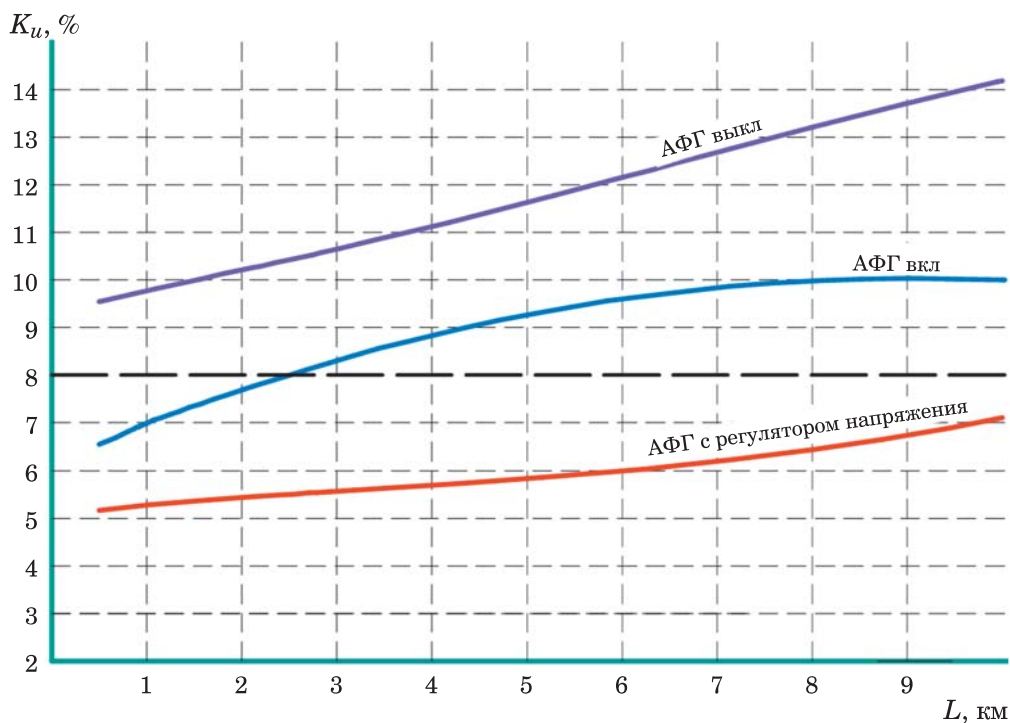


Рис. 8. Зависимости коэффициента K_u от длины линии питания трансформатора

Как видно из рис. 8, фильтр без регулятора напряжения при длине линии больше 2,5 км не снижает значение K_u до нормативного, равного 8 %, согласно ГОСТ 32144–2013. Однако включение регулятора напряжения на конденсаторе АФГ обеспечивает решение задачи получения K_u , не превышающего нормативного значения 8 % на всем исследуемом диапазоне.

Предложенный метод выбора параметров АФГ и регулирования напряжения на накопительном конденсаторе активного фильтра обуславливает эффективную работу такого устройства при существенном изменении параметров сети, электропривода и значения нагрузки.

Выводы

1. Активные фильтры гармоник на основе релейной модуляции компенсируемых токов и описанной системе вычисления компенсируемых токов эффективно снижают до допустимых значений суммарные коэффициенты гармонических составляющих.

2. Выбор индуктивности реактора и емкости накопительного конденсатора активных фильтров гармоник, выбор и настройка регулятора напряжения АФГ являются основными задачами при проектировании и эксплуатации регуляторов качества электроэнергии на основе АФГ.

3. На основании выполненных исследований предложены способы выбора индуктивности реактора и емкости накопительного конденсатора активных фильтров гармоник при регулировании напряжения конденсатора активного фильтра и учете параметров нелинейных потребителей, что позволяет увеличить эффективность применения активного фильтра для компенсации высших гармоник.

Список литературы

1. Шевырев, Ю. В. Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты / Ю. В. Шевырев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 2. — С. 171–178. — DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178. — EDN: GKQMBVO.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 264 с.
3. Сычев, Ю. А. Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Ю. А. Сычев, М. Е. Аладьин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. — № 11. — С. 159–181. — DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-159. — EDN: SCIDUO.
4. Сычев, Ю. А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными

- фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 132 – 140. — DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14. — EDN: BVBLH.
5. **Шевырев, Ю. В.** Применение компьютерных моделей для выбора регуляторов качества электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями / Ю. В. Шевырев, Н. Ю. Шевырева, А. С. Плехов, Д. Ю. Титов. — Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2018. — 180 с.
 6. **Абрамов, Б. И.** Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов / Б. И. Абрамов, Д. А. Державин, А. М. Чуриков [и др.] // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 1. — С. 90 – 92. — EDN: VOPCVV.
 2. **Zhezhelenko I. V.** *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* (Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises), Moscow, Energoatomizdat, 1994, 264 p.
 3. **Sychev Yu. A., Aladyin M. E.** *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* (Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises), 2023, No. 11., pp. 159 – 181, DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-159, EDN: SCIDUO.
 4. **Sychev Yu. A., Zimin R. Yu.** *Zapiski Gornogo instituta* (Journal of Mining Institute), 2021, Vol. 247, pp. 132 – 140, DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14, EDN: BVBLH.
 5. **Shevyrev Yu. V., Shevyreva N. Yu., Plekhov A. S., Titov D. Yu.** *Primenenie komp'yuternykh modelei dlya vybora regulyatorov kachestva elektroenergii pri rabote elektroprivodov s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami* (Application of computer models for selecting power quality regulators for operation of electric drives with semiconductor converters), Nizhny Novgorod, NSTU named after R. E. Alekseev, 2018, 180 p.
 6. **Abramov B. I., Derzhavin D. A., Churikov A. M.** *Neftyanoe khozyaistvo* (Oil Industry), 2016, No. 1, pp. 90 – 92, EDN: VOPCVV.

References

1. **Shevyrev Yu. V.** *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal* (Mining informational and analytical bulletin. Scientific and technical journal), 2020, No. 2, pp. 171 – 178, DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178, EDN: GKQMB0.

pavel.321333@yandex.ru

Research and development of a methodology for selecting the parameters and voltage regulator of an active harmonic filter

Shevyrev Yu. V., Kreshchanovskii P. S.

In order to save energy and efficiently manage technological processes, frequency-controlled electric drives are being introduced in most industrial enterprises. These solutions allow for energy savings, reduced equipment load, and extended machine and mechanism lifespan. However, widespread use of frequency converters can lead to significant deviations from the sinusoidal voltage form in electrical networks. Active harmonic filters are a promising solution for filtering higher harmonics. A crucial aspect of designing power supply systems with active harmonic filters is the correct selection of filter parameters, as well as maintaining and regulating the voltage of the capacitor storage link.

Keywords: power quality, distribution network, frequency-controlled electric drive, active harmonic filter, parameters of the active harmonic filter, voltage regulator.

DOI: 10.71759/0wtz-0k90

Специальность 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

Использование бегущего электромагнитного поля для предварительного нагрева прокатных валков при их закалке

Качанов А. Н., доктор техн. наук, Миронов Е. А. магистр
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева», Орел

Приведены результаты исследования характера распределения электродинамических сил, мощности тепловыделения и температурных полей в зависимости от способа включения и взаимного пространственного расположения трехфазных индукторов с бегущим электромагнитным полем промышленной частоты вокруг валка прокатного стана. Представлены конфигурации мощности тепловыделения, результирующей тяговой силы, графики зависимостей температуры по длине окружности и по сечению валка, а также картины распределения температурного поля от указанного выше фактора, полученные путем проведения компьютерного моделирования в программной среде Elcut.

Ключевые слова: индукционный нагрев, бегущее электромагнитное поле, трехфазный ток промышленной частоты, цилиндрическая ферромагнитная загрузка, чередование фаз, электродинамические силы, мощность тепловыделения, программный продукт Elcut.

Одни из самых крупных отраслей промышленности в России — это машиностроение и металлургия. Важной составляющей машиностроения является прокатное и кузнечно-штамповочное производство. Для получения высокосортной продукции используются мощные станы холодной и горячей прокатки. Надежная и бесперебойная работа прокатных станов в значительной степени определяется качеством рабочих и опорных прокатных валков. Рабочая поверхность валка (бочка) должна иметь высокое сопротивление износу, быть стойкой к образованию сколов и трещин, поэтому для изготовления валков используют высокоуглеродистые легированные стали. Для достижения необходимых характеристик бочки валка на заключительной стадии процесса его производства широко применяют индукционную поверхностную закалку с последующим отпуском для снижения хрупкости закаленной поверхности и уровня остаточных напряжений.

Индукционная закалка бочек крупногабаритных валков прокатных станов чаще всего осуществляется непрерывно-последовательным способом с помощью индукторов различной конструкции. Конструкция закалочного устройства включает в себя спрейер для водяного охлаждения нагретого слоя. Для более плавного изменения твердости переходной зоны от закаленного слоя к сердцевине валка по технологии требуется его предварительный подогрев. С целью получения более равномер-

ного распределения внутренних источников теплоты в закаливаемом слое, а также для сбивания паровой рубашки при водяном охлаждении, в процессе термообработки необходимо вращать валок с частотой 20 – 40 об/мин в зависимости от типоразмера валка [1].

Известны технические решения, направленные на создание и внедрение устройств индукционной термообработки рабочих валков прокатных станов с использованием двухчастотного нагрева, обеспечивающего преимущества глубинного нагрева с повышением его производительности. Так, в статье [2], предлагается осуществлять закалку непрерывно-последовательным способом с использованием специального блока индуктор-спрейер в вертикальном положении валка. Нагрев проводится в два этапа: предварительный нагрев за несколько проходов индуктора на одной частоте (100 Гц) и заключительный проход того же индуктора, но уже подключенного к источнику повышенной частоты, обеспечивающему заданную глубину закаленного слоя. При этом на протяжении всего процесса закалки необходимо осуществлять вращение валка с определенной частотой, что требует наличия дополнительного механизма вращения.

В настоящей статье авторы предлагают (в отличие от указанных выше технических решений) на предварительном этапе перед закалкой поверхности бочки валков прокатных станов применить индукционный нагрев с бегущим электромагнитным полем (БЭМП) на

промышленной частоте, что позволяет исключить из закалочной установки дополнительный механизм вращения.

Устройства с БЭМП позволяют оказывать на объекты как тепловое, так и механическое воздействие. БЭМП в нагреваемом объекте наводит вихревые токи, которые обеспечивают не только нагрев, но и вызывают появление электродинамических сил в нем. Данный эффект успешно используется на практике при создании различных электротехнологических устройств. В настоящее время индукционные устройства с БЭМП нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [3 – 5]: от электродинамических сепараторов в металлургии до устройств нагрева и перемешивания агрессивных жидкостей в химической промышленности и др. Применение для нагрева бочки валка трехфазных индукторов с БЭМП, работающих на промышленной частоте, как указано выше, позволяет совместить в одном электротехническом устройстве две функции, а именно, глубокий нагрев и вращение с необходимой частотой.

Для соблюдения условий технологического режима процесса закалки бочки валка прокатного стана непрерывно-последовательным способом предлагается использовать систему, состоящую из двух секций индукторов, размещенных на подвижной платформе и работающих на разных частотах (рис. 1). Первая секция, состоящая из нескольких индукторов с БЭМП, работающих на промышленной частоте, обеспечивает предварительный подогрев бочки валка до точки Кюри. Дальнейший нагрев до закалочной температуры обеспечивает закалочный индуктор с пульсирующим электромагнитным полем повышенной частоты, расположенный во второй секции. В конструкции закалочной установки также имеются: спрейер, который обеспечивает подачу охлаждающей жидкости на закаливаемую поверхность; устройство воздушного дутья для отсекаания брызг воды от зоны нагрева, а также пирометры для контроля температуры на всех стадиях нагрева.

Достаточно подробно изученные линейные индукционные машины имеют единую природу протекающих в них электромагнитных и тепловых процессов с устройствами с БЭМП, которые, однако, недостаточно изучены и требуют дополнительных теоретических и практических исследований.

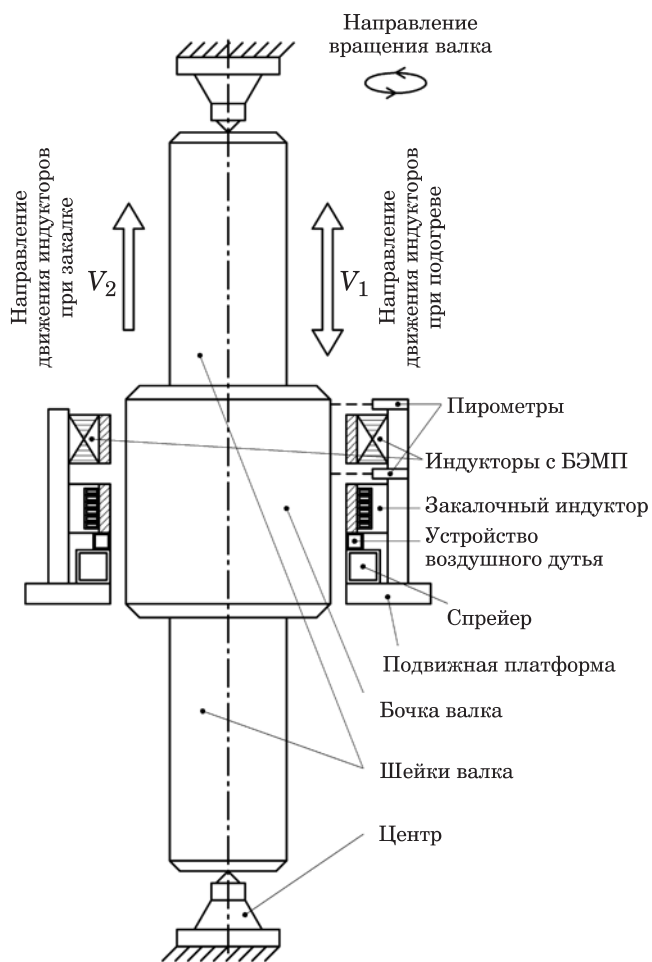


Рис. 1. Схема индукционной закалки валка прокатного стана с использованием индукторов с БЭМП

Конструкции устройств с БЭМП имеют ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать, например, большое значение зазора между магнитопроводом индуктора и загрузкой (поверхностью валка), влияющее на их энергетические характеристики, а также проблемы выбора количества индукторов с БЭМП, расстояния между их торцевыми частями, с учетом диаметров нагреваемых валков и др.

В процессе исследований была рассмотрена простейшая модель системы «индуктор с БЭМП — цилиндрическая загрузка» (рис. 2).

Нагрев является основной функцией индуктора с БЭМП, поэтому при определении активной мощности, выделяющейся в загрузке P_{2T} , приходящейся на один индуктор, нужно знать суммарную активную мощность $P_{2T\Sigma}$, необходимую для нагрева загрузки до заданной температуры.

При подключении к источнику переменного тока индуктор с БЭМП, помимо нагрева за-

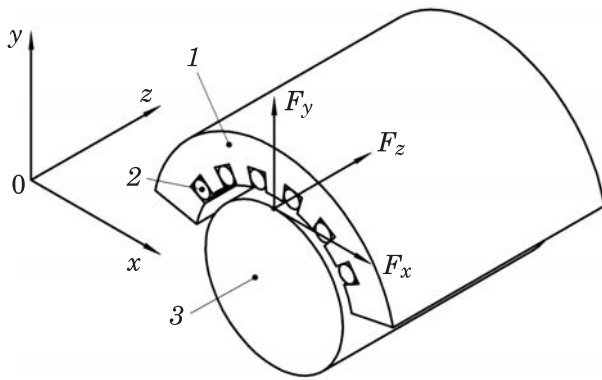


Рис. 2. Эскиз системы «индуктор с БЭМП — цилиндрическая загрузка» и распределение электродинамических сил в загрузке:

1 — магнитопровод; 2 — индуктирующий провод; 3 — загрузка

грузки, начинает создавать электродинамические силы, действующие на элементарный проводящий объем загрузки в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях [6]. Обозначим электродинамическую силу, создаваемую одним индуктором и действующую в тангенциальном направлении — F_x , в радиальном (нормальном по отношению к образующей плоскости зубцового слоя индуктора) — F_y , в осевом — F_z . В тангенциальном направлении действует тяговая сила, т.е. электродинамическая сила F_x , которая обеспечивает вращение загрузки с определенной частотой. Другие силы в данной статье не рассматриваются, так как они компенсируются путем использования известных инженерных технических решений.

Для моделирования систем индукционного нагрева успешно применяют известные программные средства [7], базирующиеся на численных методах расчета, таких как метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод интегральных уравнений (МИУ). В работе моделирование исследуемой системы «индуктор с БЭМП — цилиндрическая загрузка» проводилось в программной среде ELCUT 6.6 Professional [8], которая основана на использовании МКЭ и позволяет последовательно решать мультидисциплинарные задачи индукционного нагрева.

На рис. 3 представлен эскиз фрагмента системы «индуктор с БЭМП — цилиндрическая загрузка», которую использовали при проведении исследований в программной среде ELCUT.

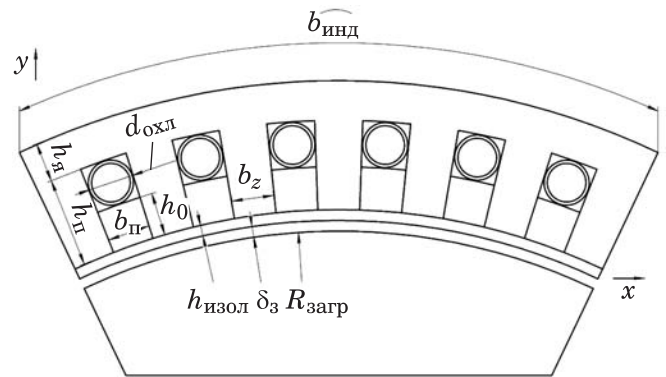


Рис. 3. Эскиз фрагмента системы «индуктор с БЭМП — цилиндрическая загрузка»

Параметры исследуемой системы представлены в табл. 1.

При закалке валков различных типоразмеров возникает необходимость использования нескольких индукторов, выбора их оптимальной мощности, с учетом массы и геометрической

Таблица 1

Параметры системы «индуктор с БЭМП — цилиндрическая загрузка»

Параметр системы	Значение
Ширина индуктора $b_{\text{инд}}$, мм	260
Ширина паза магнитопровода b_n , мм	20
Ширина зубца магнитопровода b_z , мм	20
Высота паза магнитопровода h_n , мм	40
Высота активного слоя h_a , мм	20
Высота ярма магнитопровода $h_{\text{я}}$, мм	20
Наружный диаметр трубки охлаждения $d_{\text{охл}}$, мм	20
Толщина футеровки $h_{\text{изол}}$, мм	5
Радиус загрузки $R_{\text{загр}}$, мм	275
Длина индуктора (вдоль координаты Z) $l_{\text{инд}}$, мм	200
Длина загрузки (вдоль координаты Z) $l_{\text{загр}}$, мм	200
Толщина воздушного зазора между футеровкой и загрузкой δ_z , мм	5
Частота тока индуктора f , Гц	50
Ток индуктора $I_{\text{инд}}$, А	6000
Материал загрузки	Сталь 9Х

ских размеров валков, и их расположения относительно закаливаемой поверхности. Так, при использовании нескольких индукторов и соблюдении условия равномерного распределения мощности между ними можно найти активную мощность тепловыделения в загрузке, приходящуюся на один индуктор, по формуле:

$$P_{2T} = \frac{P_{2T\Sigma}}{n}, \quad (1)$$

где n — количество индукторов.

Результирующая тяговая сила, действующая на загрузку, создаваемая всеми индукторами системы:

$$F_{x\Sigma} = \sum_n F_x. \quad (2)$$

Ниже приведены результаты исследования влияния количества индукторов с БЭМП для шести вариантов взаимного пространственного расположения индукторов вокруг загрузки (рис. 4) и способов их включения относительно друг друга с учетом направления создаваемых ими тяговых усилий на распределение мощности тепловыделения в загрузке и значения результирующей тяговой силы, действующей на нее. За положительное направление действия силы F_x принято направление по часовой стрелке, а за отрицательное — против часовой. При размещении индукторов относительно загрузки использовалось условие их равноудаленности друг от друга.

Таким образом, мощность тепловыделения в загрузке, создаваемая одним индуктором (рис. 4, а) будет равняться $P_{2T\Sigma}/1$, а тяговая сила, воздействующая на загрузку — $\pm F_x/1$, в зависимости от порядка чередования фаз.

Таблица 2

Конфигурации мощности тепловыделения в загрузке и результирующей тяговой силы при равенстве и постоянстве единичной мощности каждого индуктора с БЭМП

Количество индукторов с БЭМП n	Мощность тепловыделения в загрузке $P_{2T\Sigma}$	Результирующая тяговая сила $F_{x\Sigma}$	Количество вариантов режимов
1	$\sum_n \frac{P_{2T\Sigma}}{n}$	$\pm 1 \cdot F_x/n$	2
2		$0 \cdot F_x/n$	3
		$\pm 2 \cdot F_x/n$	
3		$\pm 1 \cdot F_x/n$	4
		$\pm 3 \cdot F_x/n$	
4		$0 \cdot F_x/n$	5
		$\pm 2 \cdot F_x/n$	
		$\pm 4 \cdot F_x/n$	
5		$\pm 1 \cdot F_x/n$	6
		$\pm 3 \cdot F_x/n$	
		$\pm 5 \cdot F_x/n$	
6		$0 \cdot F_x/n$	7
	$\pm 2 \cdot F_x/n$		
	$\pm 4 \cdot F_x/n$		
	$\pm 6 \cdot F_x/n$		

Таблица 3

Конфигурации мощности тепловыделения в загрузке и результирующей тяговой силы с регулированием единичной мощности каждого индуктора с БЭМП

Количество индукторов с БЭМП n	Мощность тепловыделения в загрузке $P_{2T\Sigma}$	Результирующая тяговая сила $F_{x\Sigma}$	Количество вариантов режимов
1	$\sum_n \frac{(0 \dots P_{2T\Sigma})}{n}$	$\pm \sum_n \frac{(0 \dots F_{x\Sigma})}{n}$	$\rightarrow \infty$
2			
3			
4			
5			
6			

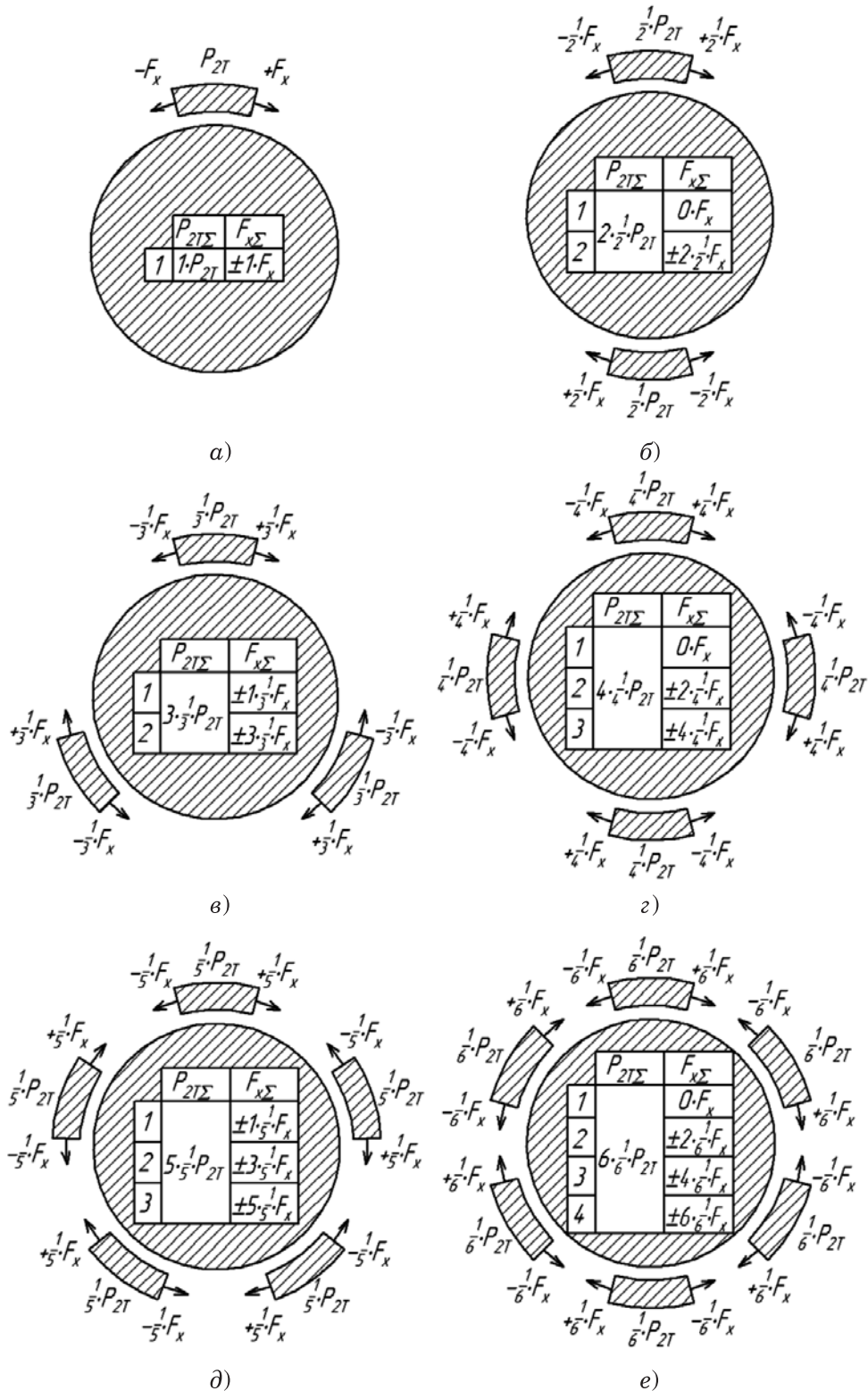
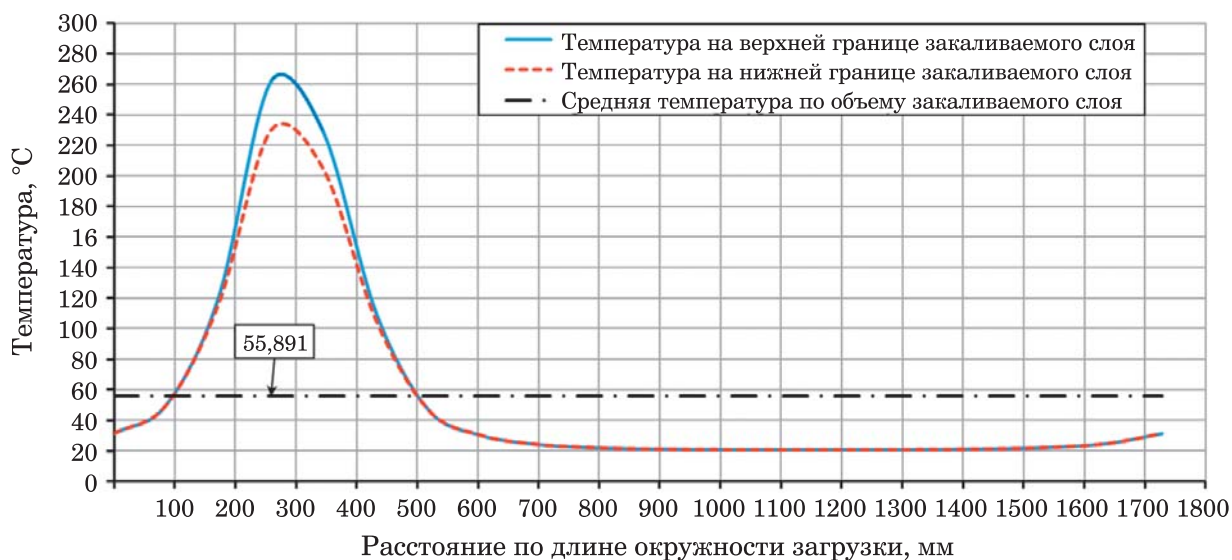


Рис. 4. Варианты расположения индукторов с БЭМП вокруг цилиндрической загрузки с конфигурацией мощности тепловыделения и результирующей тяговой силы:

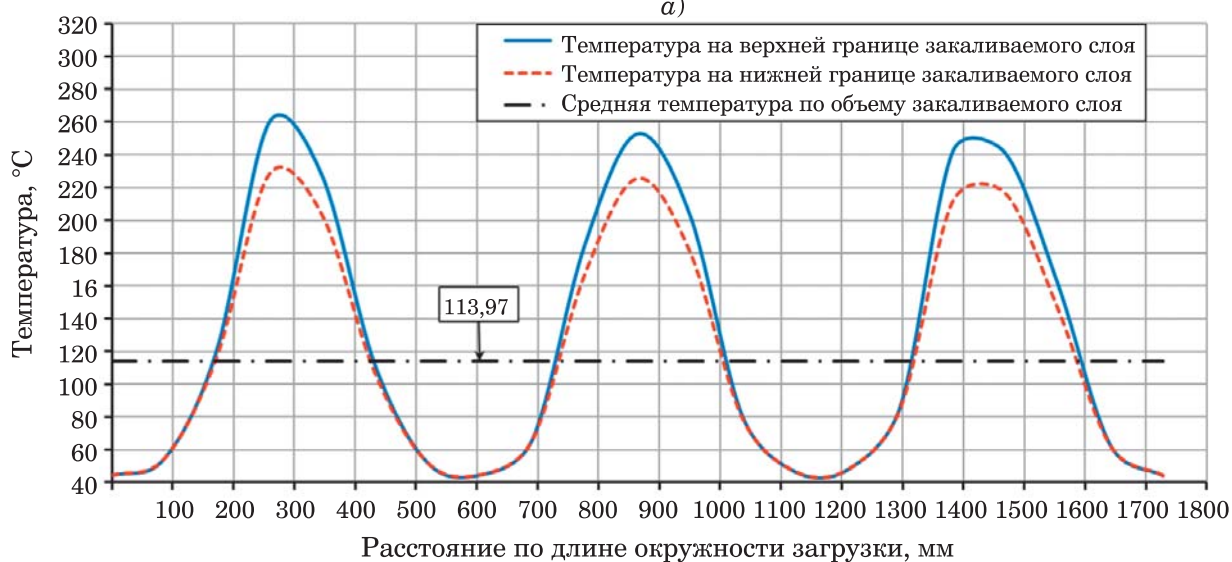
a — один индуктор; *б* — два индуктора; *в* — три индуктора; *г* — четыре индуктора; *д* — пять индукторов; *е* — шесть индукторов

При использовании двух индукторов (рис. 4, б) мощность, создаваемая одним индуктором, составит уже $P_{2T\Sigma}/2$, а результирующая тяговая

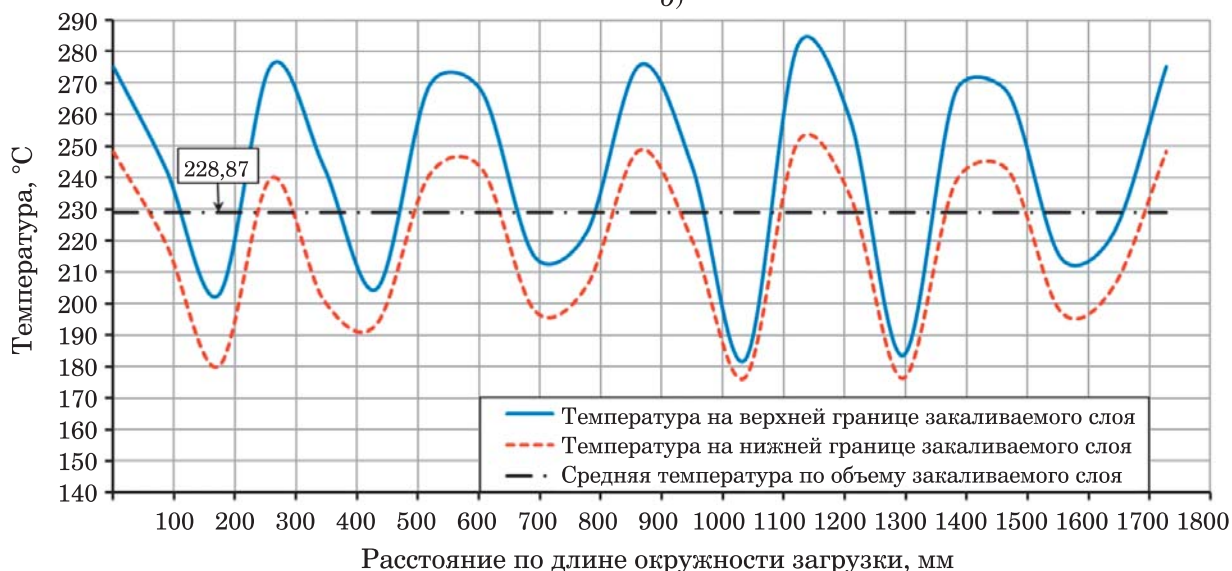
сила будет $\pm 2F_x/2$ при согласном включении обоих индукторов либо $0 \cdot F_x$ при встречном включении (тяговые силы, создаваемые обои-



а)



б)



в)

Рис. 5. Графики распределения температуры по длине окружности цилиндрической загрузки через 600 с нагрева:

а — одним индуктором; б — тремя индукторами; в — шестью индукторами

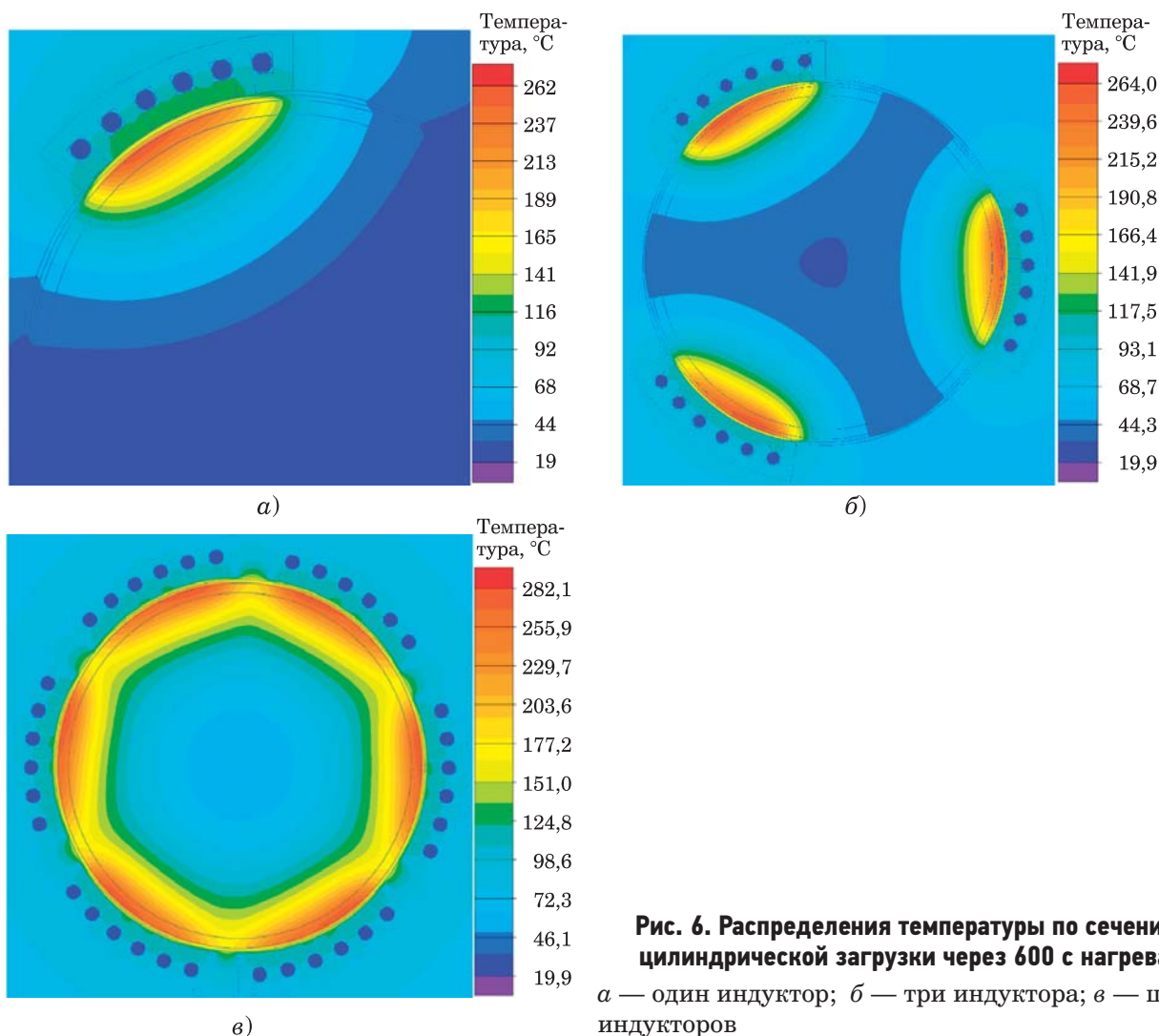


Рис. 6. Распределения температуры по сечению цилиндрической загрузки через 600 с нагрева:
а — один индуктор; *б* — три индуктора; *в* — шесть индукторов

ми индукторами, равны и противоположны по направлению, т.е. они скомпенсировали друг друга).

Результаты исследований для шести вариантов размещения индукторов при равенстве и постоянстве единичной мощности каждого индуктора сведены в табл. 2, а с регулированием единичной мощности каждого индуктора — в табл. 3.

На рис. 5 представлены графики распределения температуры по длине окружности цилиндрической загрузки через 600 с нагрева в зависимости от количества индукторов с БЭМП, расположенных вокруг нее (для вариантов с одним, тремя и шестью индукторами).

На рис. 6 показаны картины распределения температурного поля в ELCUT при нагреве в течение 600 с одним, тремя и шестью индукторами с БЭМП, расположенными вокруг цилиндрической загрузки.

Анализируя результаты проведенных исследований (рис. 5 и 6), можно отметить, что

с увеличением количества индукторов уменьшается неравномерность распределения температурного поля по длине окружности загрузки.

На рис. 7 представлены графики распределения температуры по сечению цилиндрической загрузки через 600 с нагрева индукторами с БЭМП (количество индукторов от 1 до 6).

На рис. 8 показаны графики зависимости перепада температуры по сечению цилиндрической загрузки и средней температуры закаливаемого слоя от количества индукторов с БЭМП.

Из приведенных на графиках кривых следует, что при увеличении количества индукторов с одного до шести средняя температура закаливаемого слоя увеличивается на 75 %, а перепад температуры по сечению — на 12 %. Таким образом, для повышения качества закаленного слоя целесообразно использовать большее количество индукторов с мощностью, определяемой по формуле (1).

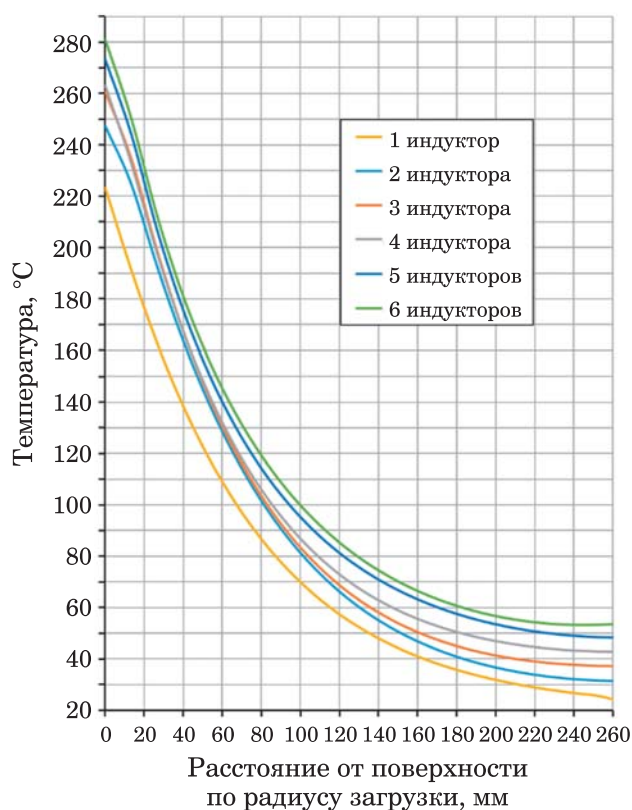


Рис. 7. Графики распределения температуры по сечению цилиндрической загрузки через 600 с нагрева индукторами с БЭМП

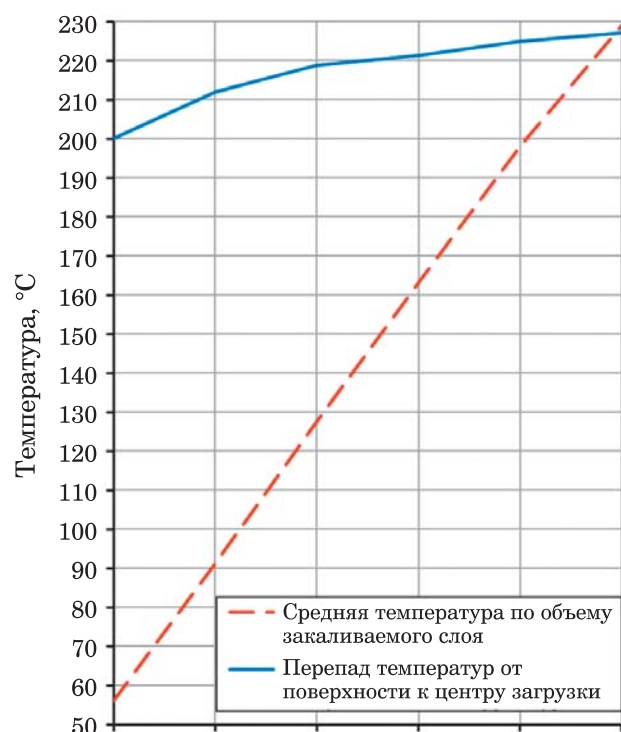


Рис. 8. Графики зависимости перепада температуры по сечению цилиндрической загрузки и средней температуры закаливаемого слоя от количества индукторов с БЭМП

Выводы

1. Оптимальный вариант комплексного воздействия (нагрев и вращение) на закаливаемый валок в процессе его предварительного нагрева, направленный на повышение качества процесса термообработки валка, целесообразно выбирать с использованием полученных и описанных в статье результатов.

2. Выбор количества индукторов с БЭМП зависит как от их единичной мощности, так и массогабаритных размеров валка. Так, с увеличением количества индукторов увеличивается возможное количество вариантов управления режимами нагрева и вращения, а также повышается равномерность распределения температуры по длине окружности валка, увеличивается средняя температура закаливаемого слоя и перепад температур по сечению валка.

3. Установлено, что полная компенсация тяговых сил (результатирующая сила $F_{x\Sigma} = 0$) без регулирования мощности индукторов с БЭМП достигается лишь при их четном количестве.

4. Наличие в установках для закалки валков прокатных станов индукторов с БЭМП с возможностью регулирования их единичной мощности позволяет расширить диапазон управления режимами нагрева и вращения, а также повысить гибкость всей системы при внесении корректировок в карты технологического процесса термообработки валков.

Список литературы

1. Гедеон, М. В. Термическая обработка валков холодной прокатки / М. В. Гедеон, Г. П. Соболев, И. В. Паисов. — М.: Металлургия, 1973. — 344 с.
2. Демидович, В. Б. Индукторы для закалки валков прокатных станов / В. Б. Демидович, Ю. Ю. Первалов // Электричество. — 2019. — № 3. — С. 65 – 70.
3. Коняев, А. Ю. Особенности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями / А. Ю. Коняев, С. Л. Назаров // Электротехника. — 2013. — № 3. — С. 62 – 66.
4. Угольников, А. В. Использование эффекта бегущего магнитного поля при обезвоживании ферромагнитных пульп / А. В. Угольников, А. Е. Горелова // Фундаментальные исследования — 2017. — № 5. — С. 83 – 87.
5. Патент № 2257017 РФ. Индукционное устройство для нагрева и перемешивания жидких сред / Качанов А. Н., Кувалдин А. Б., Качанов Н. А.; Заявл. 23.12.2002; Опубл. 20.07.2005. Бюл. № 20.
6. Веселовский, О. Н. Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, А. Л. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 255 с.
7. Демидович, В. Б. Современные программные средства для моделирования и проектирования индукционных нагревателей /

- В. Б. Демидович, Ю. Ю. Перевалов // Известия РАН. Энергетика. — 2019. — № 6. — С. 130 – 144.
8. **ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя.** — Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2021. — 290 с.

References

1. **Gedeon M. V., Sobol G. P., Paisov I. V.** *Termicheskaya obrabotka valkov kholodnoi prokatchi* (Heat treatment of cold rolling rolls), Moscow, Metallurgy, 1973, 344 p.
2. **Demidovich V. B., Perevalov Yu. Yu.** *Elektrichestvo* (Electricity), 2019, No. 3, pp. 65 – 70.
3. **Konyaev A. Yu., Nazarov S. L.** *Elektrotekhnika* (Electrical Engineering), 2013, No. 3, pp. 62 – 66.
4. **Ugolnikov A. V., Gorelova A. E.** *Fundamental'nye issledovaniya* (Fundamental research), 2017, No. 5, pp. 83 – 87.
5. **Kachanov A. N., Kuvaldin A. B., Kachanov N. A.** *Patent No. 2257017 RF. Induktsionnoe ustroystvo dlya nagreva i peremeshivaniya zhidkikh sred* (Patent No. 2257017 RF. Induction device for heating and mixing liquid media), claimed: 23.12.2002, publ. 20.07.2005, Bul. No. 20.
6. **Veselovsky O. N., Konyaev A. L., Sarapulov F. N.** *Lineinye asinkhronnye dvigateli* (Linear asynchronous motors), Moscow, Energoatomizdat, 1991, 255 p.
7. **Demidovich V. B., Perevalov Yu. Yu.** *Izv. Rossiiskoi akademii nauk. Energetika* (Izv. of the Russian Academy of Sciences. Power engineering), 2019, No. 6, pp. 130 – 144.
8. **ELCUT. Modelirovanie dvumernykh polei metodom konechnykh elementov. Versiya 6.6. Rukovodstvo pol'zovatelya** (ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by the finite element method. Version 6.6. User's manual), St. Petersburg, Production cooperative TOR, 2021, 290 p.

kan@ostu.ru

Using a traveling electromagnetic field to preheat rolling rolls during hardening

Kachanov A. N., Mironov E. A.

The article presents the study results of the nature of electrodynamic forces distribution, heat release power and temperature fields depending on the mutual spatial arrangement method of three-phase inductors with an industrial frequency traveling electromagnetic field around the roll of a rolling mill. Configurations of heat release power, resulting traction force, graphs of temperature dependences along the circumference length and the cross-section of the roll, as well as patterns of temperature field distribution from the above factor, obtained by conducting computer modeling in the Elcut software environment are presented.

Keywords: induction heating, traveling electromagnetic field, three-phase power frequency current, cylindrical ferromagnetic load, phase alternation, electrodynamic forces, heat release power, Elcut software product.



ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

DOI: 10.71759/emem-a743

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Экономия и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждаемых наружным воздухом*

Яковлев И. В., канд. техн. наук, Авдокунин Н. В., ведущий инж.,
Горелов М. В., канд. техн. наук
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Москва

Обоснована энергетическая эффективность применения наружного воздуха для охлаждения центров обработки данных (система прямого фрикулинга). На основе методических рекомендаций по проектированию и анализа климатических данных определены пять зон на диаграмме влажного воздуха ($H-d$ диаграмме), в которых может проводиться тепло-влажностная обработка воздуха для поддержания оптимальных параметров микроклимата. С использованием данного подхода представлен метод расчета энергетических показателей системы фрикулинга, основанный на применении графиков числа часов стояния средних температур и влажности в климатических условиях Москвы за последние 5 лет. Выполнены расчеты непосредственно для климатических условий Москвы.

Ключевые слова: центр обработки данных, тепловлажностная обработка воздуха, фрикулинг, энергоэффективность, микроклимат.

Центры обработки данных (далее — ЦОД) представляют неотъемлемую часть IT-сектора экономики, являющегося крупным потребителем электрической энергии. На 2019 г. мировое потребление электроэнергии составило 22 500 ТВт·ч. Потребление электроэнергии IT-сектором за 2020 г. составило 1935 ТВт·ч, что сопоставимо с общим потреблением электроэнергии такими лидерами, как Россия или Япония [1]. На долю IT-сектора приходится около 9 % мирового потребления электроэнергии, а в перспективе к 2030 г. — 11,5 % [1]. В 2020 г. доля потребления электроэнергии ЦОД составляла 209 ТВт·ч, или 10,8 % от общего потребления IT-индустрией [2]. Указанные факты свидетельствуют о достаточно обширном теоретическом потенциале энергосбережения в IT-индустрии и, в частности, в ЦОД.

Для охлаждения оборудования ЦОД применение холодильных машин или прецизионных кондиционеров воздуха требует значительного

расхода электрической энергии. Их мощность по охлаждению может достигать 50 % от суммарной потребляемой мощности ЦОД.

Уменьшить потери и снизить затраты энергоресурсов позволяет другой способ охлаждения ЦОД — использование холода окружающей среды (фрикулинг). Различают прямой и косвенный фрикулинг. При прямом фрикулинге наружный воздух поступает непосредственно в помещение после очистки, предварительной обработки или без нее. При косвенном фрикулинге охлаждение оборудования осуществляется через промежуточный контур, в котором движется теплоноситель, охлажденный наружным воздухом. В настоящее время применяется преимущественно косвенный фрикулинг. Прямой фрикулинг используется реже, поскольку требует очень качественной очистки и термовлажностной обработки больших объемов воздуха. Однако он более эффективен с точки зрения снижения энергетических затрат, поэтому его применение вызывает большой интерес.

Наружный воздух существенное время в течение года может иметь более низкую температуру, чем приточный воздух, направляемый

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (гос. задание) № FSWF-2023-0017.

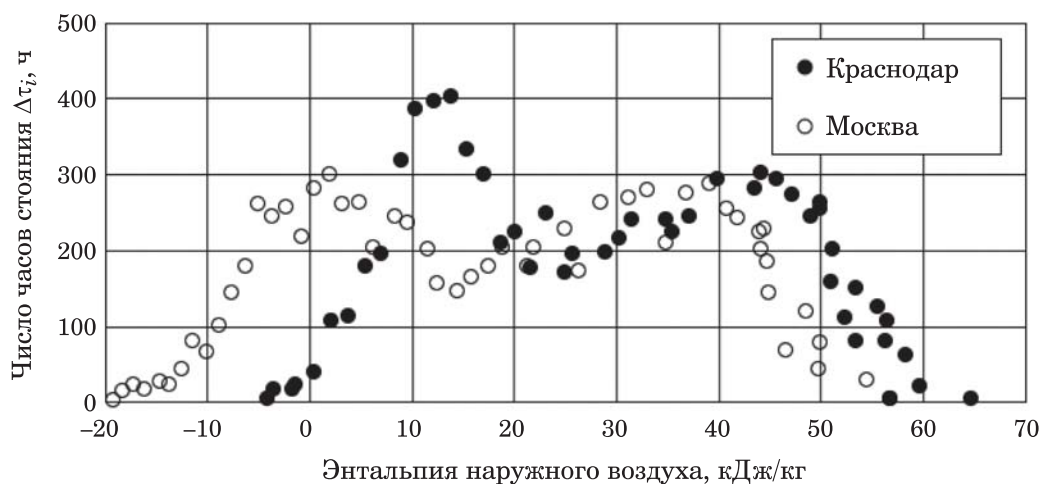


Рис. 1. Число часов стояния средних удельных энтальпий наружного воздуха

в рабочую зону ЦОД, что позволяет использовать его, не проводя какую-либо его обработку (исключая очистку от механических примесей). Фрикулинг достаточно привлекательный способ охлаждения оборудования ЦОД, поскольку позволяет:

при относительно низких затратах энергии обеспечить оптимальные параметры микроклимата, тем самым поддерживать надёжную и эффективную работу ИТ-оборудования ЦОД;

утилизировать часть сбросной теплоты ЦОД и использовать её на нужды вентиляции машинного зала ЦОД, тем самым снижая энергопотребление на охлаждение оборудования;

экономить топливо на источнике энергии, снижая углеродный след.

Разумеется, такой способ применим в условиях климата местности с достаточно низкими среднегодовыми температурами и может быть успешно реализован в климатических условиях России. В связи с этим ставится задача создания методики расчета:

количества сбросной теплоты, утилизируемой и используемой на нужды ЦОД в системе прямого фрикулинга;

количества электрической энергии, потребляемой на нужды увлажнения и охлаждения воздуха;

расхода воды в системе адиабатического охлаждения (увлажнения);

расхода воздуха, направляемого на смешение с наружным с целью подогрева его до оптимальной температуры;

экономии условного топлива на источнике тепловой энергии при применении фрикулинга.

Как отмечено выше, на характеристики системы охлаждения в режиме фрикулинга большое влияние оказывают климатические условия в местоположении ЦОД. Предлагаемый расчетный метод опирается на графики числа часов стояния средних температур и относительной влажности наружного воздуха. Графики построены по архивным данным о погоде [3] в районах местоположения ЦОД за последние 5 лет. В расчетах использовались 2920 пар данных о температуре и относительной влажности наружного воздуха за календарный год. Для примера на рис. 1 приведены графики числа часов стояния средних энтальпий наружного воздуха, вычисленных по температуре и относительной влажности, для Москвы и Краснодара.

Работа является продолжением [4], в которой подобная задача решалась при ограничении изменения влагосодержания в процессах обработки воздуха и ассимиляции избыточной теплоты от оборудования ЦОД. Здесь это ограничение снято.

В [5] приведены оптимальные и допустимые параметры внутреннего воздуха в машинных залах ЦОД. Допустимые параметры внутреннего воздуха различаются в зависимости от класса используемого оборудования, оптимальные параметры применимы для любого класса оборудования. Поэтому в работе рассмотрены способы достижения оптимальных параметров микроклимата. Анализ климатических данных показал, что параметры, характеризующие состояния наружного воздуха, на диаграмме $H - d$ располагаются относительно заданной нормативами области оптимального микроклимата [5] (зона $ABCDE$ на рис. 2)

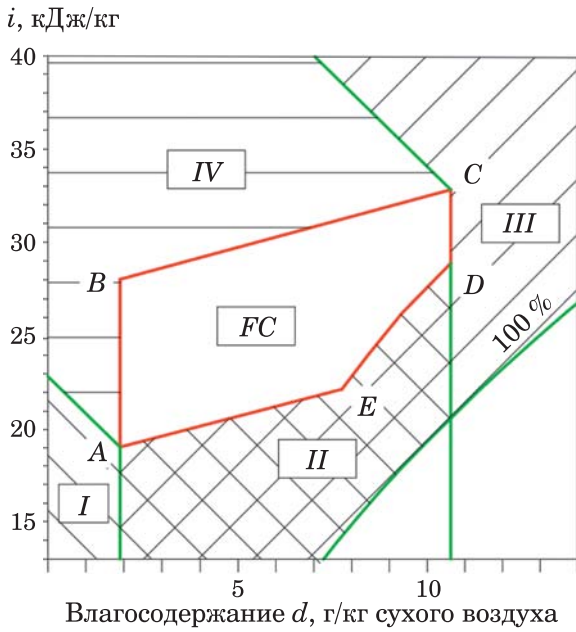


Рис. 2. Распределение зон наружного воздуха около оптимальных параметров микроклимата внутри машинного зала ЦОД

в пяти вариантах. Данные зоны можно разделить в соответствии с требуемыми методами предварительной обработки воздуха.

1. Зона низкого влагосодержания и энтальпии, которая ограничена линией энтальпии и влагосодержания, т.е. $H_n < 22,5$ кДж/кг; $d_n < 1,8$ г/кг (рис. 2, зона I).

2. Зона оптимального влагосодержания — ограничена линией изотермы $t_n \leq 18$ °С в интервале влагосодержаний $1,8$ г/кг $\leq d_n \leq 7,7$ г/кг и линией относительной влажности $\phi_n \leq 60$ % в интервале влагосодержаний $7,7$ г/кг $< d_n \leq 10,7$ г/кг (рис. 2, зона II).

3. Зона высокой энтальпии и влагосодержания — ограничена линией энтальпии $H_n > 54,3$ кДж/кг в диапазоне влагосодержаний $d_n < 10,7$ г/кг и линией влагосодержания $d_n > 10,7$ г/кг (рис. 2, зона III).

4. Зона высокой температуры и энтальпии — ограничена линией $H_n \geq 22,5$ кДж/кг при влагосодержании $d_n < 1,8$ г/кг и линией

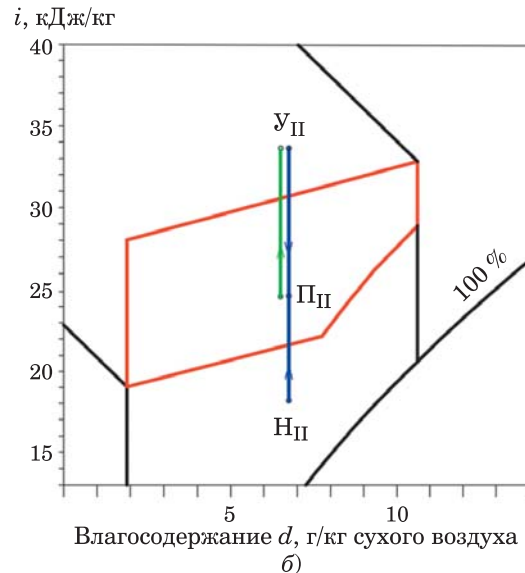
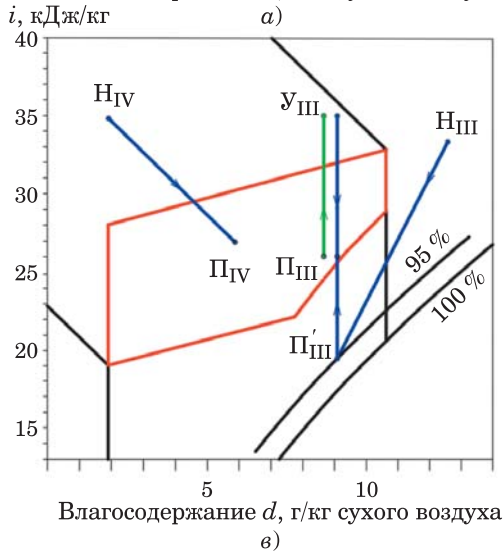
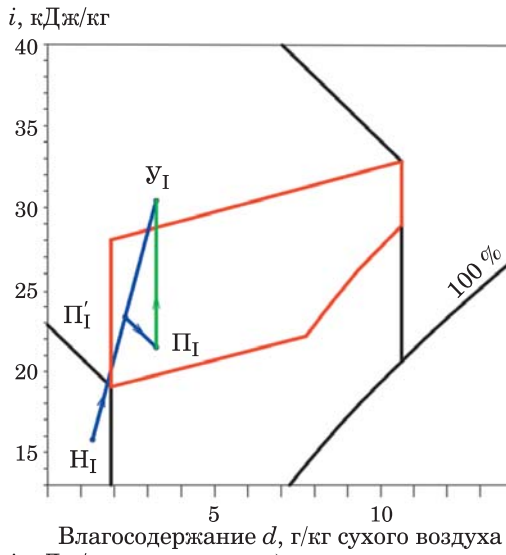


Рис. 3. Пример обработки наружного воздуха:
а — зона I; б — зона II; в — зоны III и IV

температуры $t_n > 27$ °С при $22,5 \text{ кДж/кг} < H_n \leq 54,3 \text{ кДж/кг}$ (рис. 2, зона IV).

5. Зона фрикулинга находится внутри области $ABCDE$ (рис. 2, зона FC).

Для каждой из зон I — IV требуется проводить обработку наружного воздуха, обеспечивающую оптимальные параметры приточного воздуха, подаваемого в «холодные коридоры» машинного зала ЦОД. Рассмотрим процессы подготовки воздуха по ранее определенным зонам параметров наружного воздуха.

В зоне I (рис. 3, а) необходима коррекция температуры и влагосодержания. Здесь требуется применение двух процессов: смешение части удаляемого воздуха и наружного с целью подогрева последнего до температуры 18 °С; адиабатическое увлажнение смеси водой, распыляемой в воздух форсунками высокого давления, до влагосодержания 1,8 г/кг. Параметры приточного воздуха: температура — 18 °С; влагосодержание — 1,8 г/кг; удельная энтальпия — $H_n = H_{n'} = 22,5 \text{ кДж/кг}$ (точка П — параметры приточного воздуха; П' — параметры точки смешения наружного и удаляемого воздуха, их энтальпия при адиабатном увлажнении совпадает). Энтальпия смеси обеспечивается регулированием расхода рециркулирующего воздуха с температурой 27 °С и удельной энтальпией 31,6 кДж/кг. Увлажнение воздуха от влагосодержания $d_{n'}$ до влагосодержания 1,8 г/кг регулируется расходом воды через форсунки.

Температура удаляемого воздуха определяется расходом приточного воздуха, который из теплового баланса помещения машзала ЦОД определяется формулой

$$G_n = \frac{\Delta Q}{C_p(t_y - t_n)}, \quad (1)$$

где C_p — удельная изобарная теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·°С); t_y — температура удаляемого воздуха из горячего коридора, °С; t_n — температура приточного воздуха в холодный коридор, °С.

При условии $G_n = \text{const}$ разность температур удаляемого и приточного воздуха составляет 9 °С.

Процесс смешения описывается системой уравнений теплового и материального балансов, из которых следует, что относительный расход воздуха, направляемый на рециркуля-

цию, при текущих параметрах наружного воздуха t_{ni} , d_{ni} :

$$\overline{G_{yi}} = \frac{G_{yi}}{G_n} = \frac{H_{n'i} - H_{ni}}{H_{yi} - H_{ni}}. \quad (2)$$

Индекс «i» соответствует параметрам воздуха, взятым или рассчитанным на основе климатических данных за расчетный период, разбитый на интервалы продолжительностью 3 ч.

В процессе увлажнения воздуха его энтальпия не изменяется, поэтому $H_{n'i} = H_{ni} = H_n = 22,5 \text{ кДж/кг}$, неизменной остается и удельная энтальпия удаляемого воздуха $H_{yi} = H_y = 31,6 \text{ кДж/кг}$. Влагосодержание смеси воздуха в точке П' определяется по формуле

$$d_{n'i} = \frac{-H_{ni} + C_p t_{n'} + 10^{-3} \varepsilon_i d_{ni}}{10^{-3} [\varepsilon_i - (r + C_{пn} t_{n'})]}, \quad (3)$$

где ε_i — тепловлажностное отношение, кДж/кг; r — теплота парообразования воды, кДж/кг; $C_{пn}$ — удельная изобарная теплоёмкость водяного пара, кДж/(кг·°С); $t_{n'}$ — температура смеси воздуха в точке П'.

Тепловлажностное отношение ε_i :

$$\varepsilon_i = \frac{H_{yi} - H_{ni}}{10^{-3} (d_{y1i} - d_{ni})}. \quad (4)$$

В случае распыления воды форсунками текущий расход воды на орошение, кг/с:

$$G_{wi} = \frac{10^{-3} (d_n - d_{n'i}) \Delta Q}{C_p (t_y - t_n)}, i = 1 \dots N_I. \quad (5)$$

а годовой расход воды G_w , кг/год, на увлажнение воздуха в зоне I определяется уравнением:

$$G_w = 3600 \sum_{i=1}^{N_I} \frac{10^{-3} (d_n - d_{n'i}) \Delta Q}{C_p (t_y - t_n)} \Delta \tau_i, i = 1 \dots N_I. \quad (6)$$

Удельное потребление электрической энергии насосами, подающими воду к струйным форсункам высокого давления, распыляющими воду в поток воздуха, по данным [6] составляет в среднем $\varepsilon_{\text{фо}} = 0,0055 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$. Удельный (доля от $\Delta Q z_o$) расход электроэнергии при охлаждении приточного воздуха, расход которого определяется уравнением (1), находится из соотношения:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta \mathcal{E}_I} &= \frac{\Delta \mathcal{E}_V}{\Delta Q z_o} \\ &= 3600 \frac{\varepsilon_{\text{фо}}}{z_o} \sum_{i=1}^{N_I} \frac{10^{-3} (d_{ni} - d_{ni'})}{C_p (t_y - t_n)} \Delta \tau_i, i = 1 \dots N_I. \quad (7) \end{aligned}$$

Удельное количество теплоты, передаваемое наружному воздуху за период z_1 , ч, при условии $t_{ni} < t_{п}$ и $\varphi_n < 20\%$:

$$\overline{\Delta Q_{yT}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_I} q_{yT}}{\Delta Q z_0} = \sum_{i=1}^{N_I} \frac{H_{пi} - H_{ni}}{H_{y1} - H_{ni}} \frac{H_{y1} - H_{пi}}{C_p} \frac{\Delta \tau_i}{(t_y - t_{п}) z_0}, \quad (8)$$

где N_I — количество интервалов температур и относительной влажности наружного воздуха в зоне I ; z_1 — длительность периода, ч, в пределах которого температура наружного воздуха $t_n \leq 18^\circ\text{C}$ и относительная влажность $H_n < 22,5$ кДж/кг; $\Delta Q z_0$ — количество теплоты, выделяемое оборудованием ЦОД в течение года ($z_0 = 8760$ ч), кВт/год. Показатель Q_{yT} представляет долю количества утилизируемой теплоты, применяемой на собственные нужды ЦОД.

В зоне II (рис. 3, б) осуществляется подогрев наружного воздуха путём смешения его с частью удаляемого воздуха с температурой 27°C . По времени этот способ подготовки наружного воздуха занимает наибольшую часть года. Процессы смешения и ассимиляции избыточной теплоты имеют место при постоянном влагосодержании, равном влагосодержанию наружного воздуха. Температура приточного воздуха 18°C или относительной влажности 60% обеспечивается регулированием расхода воздуха, направляемого на смешение. Смешение потоков удаляемого и наружного воздуха происходит при постоянном влагосодержании d_n :

$$d_n = d_{y1} = d_{п}. \quad (9)$$

Уравнения (2) и (8) справедливы для зоны II , изменяются только пределы суммирования и принимается $H_{пi} = H_{ni}$.

Параметры приточного воздуха поддерживаются путем регулирования расхода удаляемого воздуха, направляемого на рециркуляцию. Температура удаляемого воздуха принимается равной $(t_{ni} + 9)^\circ\text{C}$. Удельные энтальпии в уравнениях (2) и (8) находятся по уравнениям [7], [8]:

$$H_{y1i} = C_p (t_{ni} + 9) + 10^{-3} d_{ni} [r + c_{п} (t_{ni} + 9)]; \quad (10)$$

$$H_{ni} = C_p t_{ni} + 10^{-3} d_{ni} (r + c_{п} t_{ni}), \quad i = N_I + 1 \dots N_{II}; \quad (11)$$

$$d_{ni} = 622 \frac{p_{si} \varphi_{п}}{p_6 - p_{si} \varphi_{п}}; \quad (12)$$

$$p_s = \exp\left(\frac{16,57 t_{ni} - 115,72}{233,77 + 0,997 t_{ni}}\right), \quad (13)$$

где индекс $i = N_I + 1 \dots N_{II}$; p_s — давление насыщения водяного пара при температуре воздуха, кПа; p_6 — барометрическое давление (принималось равным нормальному — $101,325$ кПа).

В зоне III (рис. 3, в) в связи с достаточно влажным воздухом могут быть реализованы два последовательных процесса — предварительная осушка в камере орошения с последующим подогревом воздуха в камере смешения за счет теплоты удаляемого воздуха. Так как в камере орошения невозможно реализовать ступенчатую осушку, то воздух на выходе из нее будет иметь относительную влажность 95% и температуру значительно ниже 18°C , поэтому необходимо провести дальнейший подогрев воздуха. Осушка производится за счет подачи холодной воды в форсунки, здесь потребляется электроэнергия на прокачку теплоносителя.

По предварительным данным за последние 5 лет количество точек наружного воздуха, попадающих в данную область, не превышает 10% в самый нагруженный год. Реализовывать процессы, описанные выше, технологически и экономически нецелесообразно. Наружный воздух, находящийся в данной зоне, полностью находится в зоне допустимых параметров микроклимата дата-центров, за исключением ряда точек, у которых относительная влажность выше 90% . Для таких точек необходимо проводить подогрев воздуха при $d = \text{const}$ аналогично зоне II , но до относительной влажности 90% .

В зоне IV (рис. 3, в) по параметрам наружного воздуха проводится его охлаждение путем впрыска воды форсунками до температуры 18°C или относительной влажности 60% , или влагосодержанию $10,7$ г/кг в зависимости от расположения параметров наружного воздуха. В устройствах такого типа имеют место затраты электрической энергии на привод насосов высокого давления для сжатия воды перед форсунками. Оценим эти затраты, как и ранее, в долях от энергии, выделяемой оборудованием ЦОД за год.

Параметры воздуха в процессе адиабатического его увлажнения и охлаждения методом

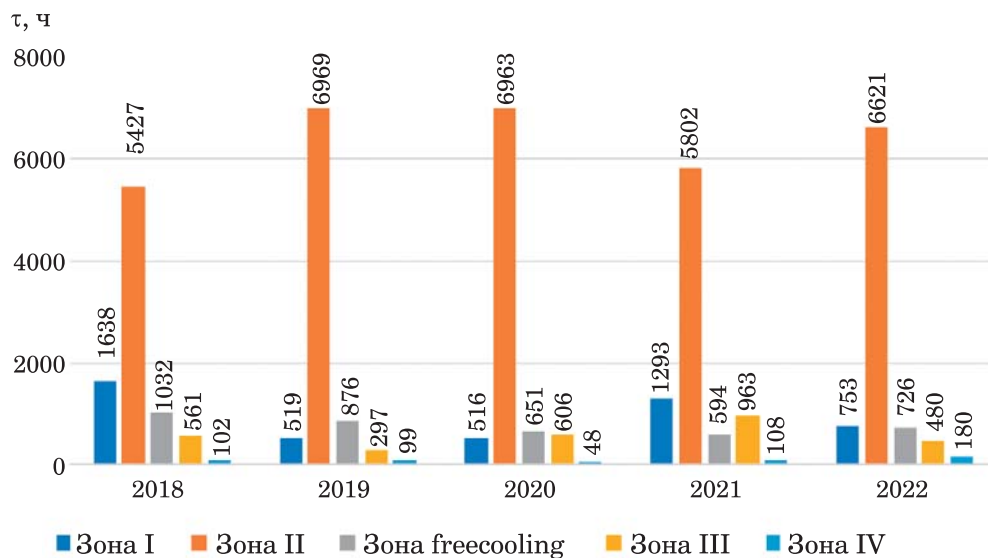


Рис. 4. Продолжительность периодов, в течение которых параметры наружного воздуха находятся в пределах пяти выделенных зон

простой итерации в последовательности, приведенной ниже. Задавалась температура приточного воздуха. Из уравнения (13) находилось давление насыщения водяного пара при температуре t_{pi} . По полученному значению давления насыщения и относительной влажности приточного воздуха 60 % по уравнению (12) находилось влагосодержание приточного воздуха d_{pi} . С другой стороны, это значение влагосодержания вычисляется из условия равенства энтальпий наружного и приточного воздуха по формуле:

$$d_{pi} = 10^3 \frac{H_{ni} - C_p t_{pi}}{r + c_{п} t_{pi}}, i = N_{III} + 1 \dots N_{IV}. \quad (14)$$

Сравниваются полученные значения d_{pi} , и при совпадении их в пределах 1 % расчет заканчивается.

Расход распыляемой воды, кг/с, при текущих параметрах наружного воздуха, расход воды через форсунки за год, кг/год, и затраты электроэнергии на сжатие воды перед форсунками рассчитываются по формулам (5) – (7).

В FC зоне — зоне фрикулинга (рис. 2) предварительная обработка воздуха не проводится. Наружный воздух после фильтрации напрямую поступает в машинный зал, нагреваясь, отводя теплоту от стоек с оборудованием, и удаляется из помещения.

Расчеты, моделирующие работу системы вентиляции по описанному алгоритму, проводились с привлечением графиков стояния средних температур и влажностей наружного воздуха для климатических условий Москвы.

Привлекались данные за 2018 – 2022 гг. Выбор местоположения ЦОД неслучаен. Известно, что примерно 70 % действующих ЦОД располагаются в Москве.

Данные, полученные в результате обработки воздуха, описанные в представленном алгоритме, показывают, что приточный воздух соответствует оптимальным параметрам в 90 % случаев от времени всего года, а оставшиеся количество точек удовлетворяют допустимым параметрам, которые при необходимости могут быть исправлены путем более полного увлажнения или увеличения расхода приточного воздуха.

Рис. 4 показывает, что длительность периода, в течение которого требуется увлажнение приточного воздуха, составляет от 516 до 1638 часов. Длительность периода, в течение которого необходимо воздух охлаждать, занимает от 48 до 180 часов. Как показали расчеты, удельные энергозатраты, связанные с увлажнением и охлаждением (рис. 5), составляют от $1,01 \cdot 10^{-4}$ до $2,93 \cdot 10^{-4}$ долей от суммарного за год поступления теплоты от оборудования ЦОД (ΔQ_{z_0}). Здесь наблюдается существенная зависимость энергозатрат от погодных условий.

Слабая зависимость от погодных условий наблюдается для такого показателя как удельное количество утилизируемой теплоты (рис. 6), которое в долях от суммарного поступления её от ИТ-оборудования ЦОД в среднем составляет $0,47 \pm 0,02$.

Остальная часть теплоты может быть использована после повышения её потенциала

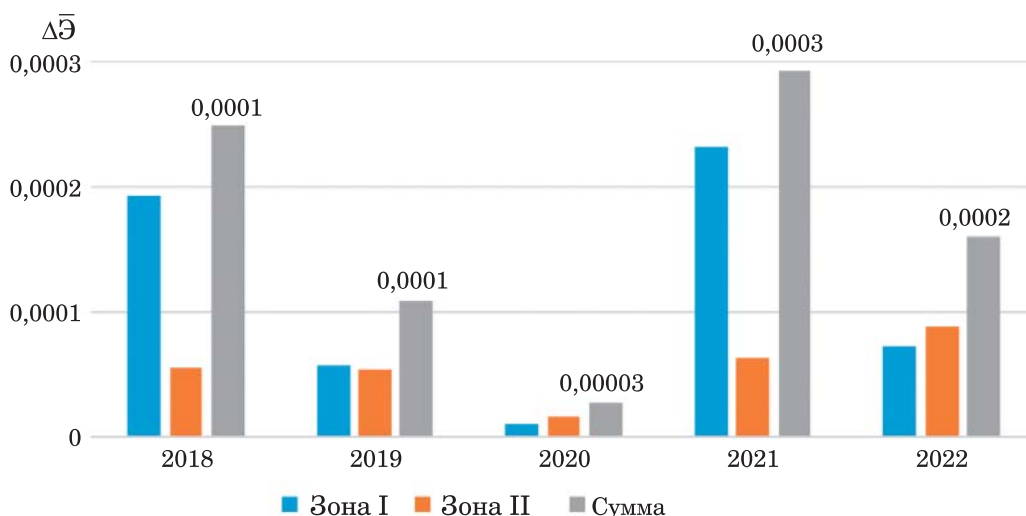


Рис. 5. Удельные затраты электроэнергии на увлажнение и охлаждение приточного воздуха



Рис. 6. Удельное количество утилизируемой теплоты в зависимости от состояния наружной среды

с применением теплового насоса для тепло-снабжения, например, офисной части ЦОД или внешнего потребителя. Эффективности применения этой части теплоты рассмотрены в работе [7].

Удельная экономия условного топлива на источнике при применении свободного фриклинга можно оценить с учетом затрат электроэнергии:

$$\Delta \bar{b} = \frac{\Delta B}{\Delta Q_{z_0} b_Q} = \Delta \bar{Q}_{\text{ут}} - \Delta \bar{\mathcal{E}} \left(\frac{b_{\mathcal{E}}}{b_Q} \right), \quad (15)$$

где $\Delta Q_{z_0} b_Q$ — эквивалент теплоты, поступающей от оборудования ЦОД, в условном топливе, кг у.т.; $\Delta \mathcal{E}$ — суммарные удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/(кВт·ч), на увлажнение

и охлаждение воздуха (рис. 5); $\Delta \bar{Q}_{\text{ут}}$ — суммарное удельное количество утилизируемой теплоты, кВт·ч/(кВт·ч) (рис. 6); $b_{\mathcal{E}}/b_Q$ — отношение удельных расходов условного топлива на выработку 1 кВт·ч тепловой (b_Q) и электрической энергии ($b_{\mathcal{E}}$).

Технический потенциал энергосбережения от применения утилизации теплоты ЦОД в условиях свободного фриклинга может быть определен по зависимости (15) при среднем по РФ отношении $b_{\mathcal{E}}/b_Q = 2,7$ по заданному значению $\Delta \bar{Q}$. Оценивая второе слагаемое в уравнении (15) как $\Delta \bar{\mathcal{E}} \left(\frac{b_{\mathcal{E}}}{b_Q} \right) = 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot 2,7 = 0,00078$, можно полагать $\Delta \bar{b} \approx \Delta \bar{Q}_{\text{ут}}$.

Предположив, что электрическая мощность ИТ-оборудования ЦОД $P_{ИТ} = 1$ МВт, тогда тепловая мощность, поступающая от оборудования $\Delta Q \approx 1,1P_{ИТ} = 1,1$ МВт. Сравним по энергопотреблению два варианта систем охлаждения: систему охлаждения с парокомпрессионной холодильной машиной и свободный фрикулинг. По первому варианту годовое потребление электрической энергии холодильной машиной (холодильный коэффициент $\varepsilon = 3$) при запасе холодильной мощности 7 % найдем из выражения:

$$\Delta \mathcal{E} = \left(\frac{1,07 \Delta Q}{\varepsilon} \right) z_0 =$$

$$= \left(\frac{1,07 \cdot 1,1 P_{ИТ}}{\varepsilon} \right) z_0 = 3437 \text{ МВт}\cdot\text{ч.}$$

Годовое потребление электрической энергии системой свободного фрикулинга:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \bar{\mathcal{E}} \Delta Q z_0 = \Delta \bar{\mathcal{E}} \cdot 1,1 \cdot P_{ИТ} z_0 =$$

$$= 2,93 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 8760 = 2,82 \text{ МВт}\cdot\text{ч.}$$

Значение $\Delta \bar{\mathcal{E}} = 2,93 \cdot 10^{-4}$ выбрано максимальным из полученных расчетом (рис. 5). Выгода применения фрикулинга очевидна.

Выводы

1. Представлен метод расчета энергетических показателей системы свободного фрикулинга, основанный на применении графиков числа часов стояния средних температур и влажности. Выполнены расчеты основных показателей для климатических условий Москвы.

2. Применение свободного фрикулинга позволяет обеспечить 90 % (7797 ч в год) оптимальные параметры приточного и удаляемого из помещения ЦОД воздуха. Энергетические затраты при этом невелики и могут составлять до $2,9 \cdot 10^{-4}$ доли количества теплоты, поступающей от оборудования ЦОД за расчетный период.

3. Применение свободного фрикулинга при необходимости обеспечения оптимальных параметров подаваемого в машинный зал воздуха позволяет утилизировать до 47 % количества теплоты, поступающей от оборудования ЦОД. При этом данная утилизируемая энергия является в полном объеме экономией энергоресурсов, выраженная в условном топливе,

от эквивалента в условном топливе количества теплоты, поступающей от оборудования ЦОД.

4. По соотношениям (5) и (6) можно оценить расход воды на увлажнение и испарительное охлаждение воздуха при любой заданной мощности тепlopоступления от оборудования ЦОД.

5. Полученные результаты позволяют оценивать эффективность работы системы свободного фрикулинга при местоположении ЦОД в любом климатическом районе и задании любых допустимых параметров микроклимата.

Список литературы

1. Petit, V. **Digital economy and climate impact** / V. Petit, S. Carlini, V. Avelar. — Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2021. — 28 с.
2. Яковлев, И. В. **Перспективы и техническая реализация утилизации сбросной теплоты центров обработки данных** / И. В. Яковлев, Н. В. Авдокунин / Энергосбережение — теория и практика: Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием «Энергосбережение — теория и практика» (Москва, 10–14 октября 2022 г.) — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2022. — С. 95 – 101.
3. **Погода и климат**. [Электрон. ресурс]. Режим доступа <http://www.pogodaiklimat>.
4. Яковлев, И. В. **Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных** / И. В. Яковлев, Н. В. Авдокунин // Теплоэнергетика. — 2023. — № 10. — С. 55 – 64.
5. **Методические рекомендации по проектированию центров обработки данных. Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве**. — М.: Минстрой России, 2019.
6. **Экономический анализ процессов увлажнения. Оценка эксплуатационных расходов / СОК**. — 2009. — № 4. — С. 80 – 83.
7. Тарабанов, М. Г. **J-d диаграмма влажного воздуха: методические указания** / М. Г. Тарабанов. — Волгоград, 2003.
8. Кириллин, В. А. **Техническая термодинамика: учебник** / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 496 с.

References

1. Petit V., Carlini S., Avelar V. Digital economy and climate impact, Rueil-Malmaison, Schneider Electric, 2021, 28 p.
2. Yakovlev I. V., Avdokunin N. V. *Energoberezhenie — teoriya i praktika: Trudy Odinnadtsatoi Vserossiiskoi konferentsii s Mezhdunarodnym uchastiem «Energoberezhenie — teoriya i praktika»*, Moskva, 10 – 14 oktyabrya 2022 goda (Energy saving — theory and practice: Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference with International Participation «Energy saving — theory and practice», Mos-

- cow, October 10 – 14, 2022), Moscow, ООО «Center for printing services «Raduga», 2022, pp. 95 – 101.
3. **Pogoda i klimat** (Weather and climate), [Electronic resource]. — URL: <http://www.pogodaiklimat>.
 4. **Yakovlev I. V., Avdokunin N. V. Teploenergetika** (Teploenergetika), 2023, No. 10, pp. 55 – 64.
 5. **Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu tsentrov obrabotki dannykh. Federal'nyi tsentr normirovaniya, standartizatsii i tekhnicheskoi otsenki sootvetstviya v stroitel'stve** (Methodological recommendations for the design of data processing centers. Federal Center for Normation, Standardization and Technical Assessment of Conformity in Const-
 6. **Ekonomicheskii analiz protsessov wlazhneniya. Otsenka ekspluatatsionnykh raskhodov** (Economic analysis of humidification processes. Assessment of operating costs), SOK, 2009, No. 4, pp. 80 – 83.
 7. **Tarabanov M. G. J-d diagramma vlazhnogo vozdukha** (J-d diagram of humid air), Volgograd, 2003.
 8. **Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheindlin A. E. Tekhnicheskaya termodinamika** (Technical thermodynamics), Moscow, Publ. MPEI, 2008, 496 p.

GorelovMV@mpei.ru

Power savings and consumption when providing thermal conditions for data processing centers cooled by external air

Yakovlev I. V., Avdokunin N. V., Gorelov M. V.

The article considers the power efficiency of the outdoor air use for cooling data centers (direct free cooling system). Taking into account the methodological recommendations on climate data design and analysis, the authors in the moist air diagram ($H - d$ diagram) identified 5 areas, in which various thermal and humidity air treatment can be carried out in order to maintain optimal microclimate parameters. The paper also presents the method for calculating the energy indicators of the free cooling system based on the graphs of the number of hours at average temperatures and humidity in the climatic conditions of Moscow over the past five years. The calculations were made directly for the Moscow city climate conditions.

Keywords: data processing center, thermal and humidity air treatment, free cooling system, power efficiency, and microclimate.



ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: 10.71759/z7sr-2w60

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Вариант энергоэффективной утилизации твердых отходов нефтеперерабатывающего предприятия (на примере ПАО «Орскнефтеоргсинтез»)

Бушув А. Н., канд. техн. наук, **Мажирин Р. Е.**, канд. пед. наук
Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического
университета «МИСИС», г. Новотроицк

Рассмотрен вариант утилизации полимеров и сгораемых материалов в твердых промышленных отходах нефтеперерабатывающего предприятия с выработкой полезной электрической и тепловой энергии в газотурбинном и паротурбинном циклах. Предложена схема утилизации отходов, базирующаяся на традиционной ГТУ с установленным за ней устройством, обеспечивающим нагрев твердых промышленных отходов уходящими газами турбины с последующей подачей загрязненных газов в паровой котел-утилизатор. Показана необходимость дополнительного дожигания природного или нефтяного газов в топочной камере котла-утилизатора с целью нейтрализации сверхтоксичных соединений в газах за мусоросжигательным устройством. Представлены формулы, описывающие образование отдельных углеводородов при нагреве твердых коммунальных и промышленных отходов. Приведены временные графики теоретического недостатка кислорода в мусоросжигательном устройстве и количества незагрязненных диоксинами и фуранами газов, поступающих в котел-утилизатор после загрузки отходов на утилизацию.

Ключевые слова: газотурбинная установка, деструкция, котел-утилизатор, мусоросжигательное устройство, твердые промышленные отходы, токсичные соединения, утилизация.

Отрицательным фактором образования твердых коммунальных и промышленных отходов является не только воздействие на экологию планеты, но и то, что стоимость их захоронения постоянно возрастает и происходит отторжение земель. В такой обстановке переработка и утилизация отходов — наиболее оптимальный выход из проблемы.

Нефтеперерабатывающее предприятие ПАО «Орскнефтеоргсинтез» (г. Орск) является крупным промышленным объектом, производственная деятельность которого сопровождается образованием мусора и загрязняющих выбросов всех агрегатных состояний. На предприятии нет технической возможности осуществлять переработку твердых отходов, что требует их вывоза с последующим захоронением.

Среди основных негорючих твердых отходов предприятия, неподдающихся термической переработке и утилизации, можно отме-

тить лом отработанных абразивных кругов, отатки и огарки стальных сварочных электродов, лом и несортированные стальные отходы, лом и бой бетонных изделий, цемент, отходы железобетона. Также на предприятии стабильно образуются отходы, достаточно легко воспламеняемые и поддерживающие горение с выделением полезного количества теплоты. Их состав и условия образования на предприятии приведены в таблице. Суммарный годовой объем таких отходов на предприятии лежит в пределах 20 – 25 т.

Наличие подобных отходов свидетельствует о возможности термической утилизации части мусора с полезным использованием теплоты в энергетических целях и сокращением показателя загрязнения территории твердым мусором.

Учитывая в отходах наличие материалов, нагрев и горение которых приводит к образо-

Отходы на предприятии, допускающие горение

Вид отхода	Код по ФККО	Условия образования отхода	Компонентный состав, % масс.
Мусор от офисных и бытовых помещений организации несортированный (исключая негорючий)	7 33 100 01 72 4	Бытовые помещения	Бумага — 12 Железо — 10 Полимерные материалы — 15 Стекло — 9 Прочее — 54
Тара из черных металлов, загрязненная лакокрасочными материалами (содержание менее 5 %)	4 68 112 02 51 4	Территория строительной площадки	Черный металл Лакокрасочные материалы < 5
Обтирочный материал, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание менее 15 %)	9 19 204 02 60 4	Проведение строительных специальных работ	Хлопчатобумажная ткань — 99,1 Масло — 0,9
Спецодежда из натуральных, синтетических, искусственных и шерстяных волокон, загрязненная нефтепродуктами (содержание менее 15 %)	4 02 312 01 62 4	Территория всего корпуса	Ткань из смешанных волокон — 91,1 Полимерный материал — 1,6 Нефтепродукты — 7,3

ванию диоксинов и фуранов, сжигание должно осуществляться при высоких температурах с последующей нейтрализацией вредных летучих веществ и механической или влажной очисткой [1 – 3]. Обезвреживание решается дожиганием с последующей утилизацией теплоты.

В качестве источника горячих газов, осуществляющих нагрев отходов, предлагается рассматривать газотурбинную установку (ГТУ). Уходящие газы после турбины с высокой остаточной температурой (более 450 °С) и избыточным давлением поступают в мусоросжигательное устройство (МСУ), в качестве которого может выступать барабанная печь с незначительными доработками конструкции, обеспечивающая разогрев отходов до температур воспламенения или деструкции полимеров [4, 5]. При условии установки за МСУ парового котла-утилизатора (КУ) подобная схема сможет обеспечить выработку электроэнергии на двух генераторах. Схема рассматриваемого мусоросжигательного комплекса показана на рис. 1.

Основной проблемой при сжигании и сильном нагреве мусора, содержащего органические примеси (полимеры, масла, резину), является образование сверхтоксичных соединений, загрязняющих отходящие газы после мусоросжигательных устройств — диоксинов (поли-

хлордибензодиоксины ПХДД или PCDD) и фуранов (полихлордibenзофураны ПХДФ или PCDF) [1 – 3].

Для безопасного и полного дожигания образующих токсичных соединений в продуктах сгорания необходимо выполнить основные условия [1, 2, 6]:

поддержание температуры выше 1200 °С не менее 2 с и последующее быстрое охлаждение до 150 °С;

при дожигании должен обеспечиваться избыток кислорода более 2 %;

режим перемешивания токсичных газов — высокотурбулентный.

Преимущества рассматриваемой схемы «ГТУ – МСУ – КУ» заключаются в возможности организации двукратного сжигания вредных летучих веществ в газах, образующихся при горении мусора. Также схема допускает повышение температуры греющих газов в самом МСУ за счет дополнительного сжигания горючего газа с избытком воздуха или за счет кислорода в уходящих газах ГТУ. Воздух в МСУ и в КУ при необходимости может подаваться от компрессора газовой турбины.

Определить момент возгорания продуктов деструкции большинства полимеров очень сложно, но можно предположить, что возгоранию в МСУ без дополнительного повышения

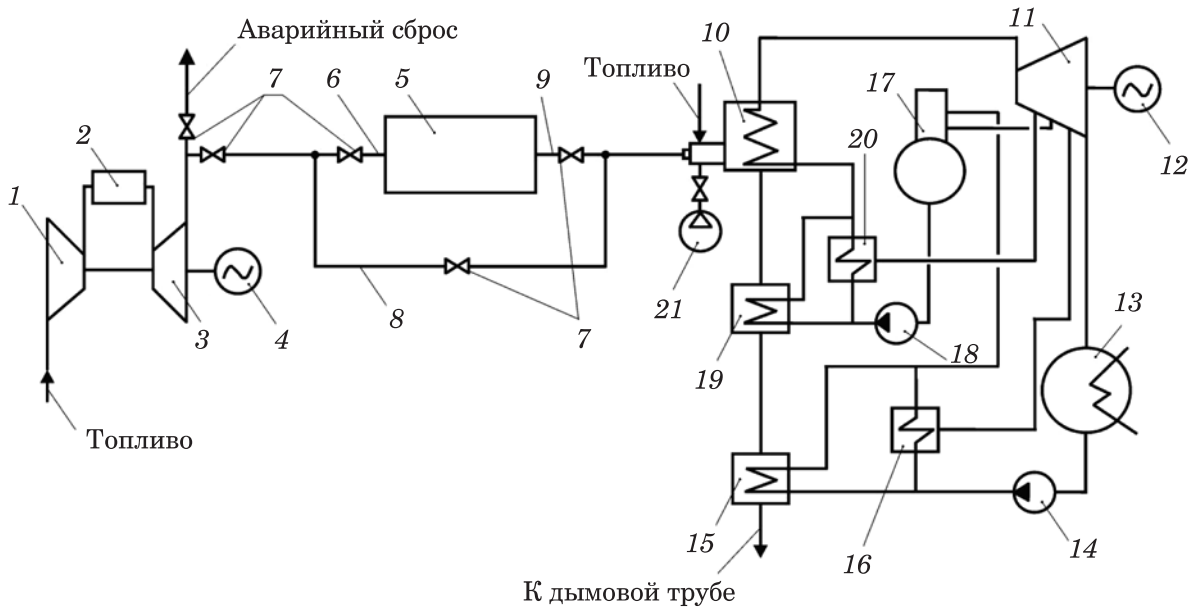


Рис. 1. Схема мусоросжигательного комплекса на базе парогазового цикла:

1 — компрессор; 2 — камера сгорания; 3 и 11 — газовая и паровая турбины; 4 и 12 — электрогенераторы; 5 — мусоросжигательная установка; 6 — подводящий канал; 7 — система шиберов; 8 — перемычка (байпасный канал); 9 — отводящий канал; 10 — котел-утилизатор; 13 — конденсатор; 14 — конденсатный насос; 15 и 19 — газодляные теплообменники; 16 и 20 — регенеративные теплообменники; 17 — деаэрактор; 18 — питательный насос; 21 — вентилятор

температуры подвергаются только химические соединения с температурой самовоспламенения не более $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Для примерной оценки соединений, образующихся в газах за МСУ при утилизации твердых отходов предприятия, принимается масса, кг:

эмалей марки ПФ-178 — a ;

эмалей ПФ-223 — b ;

полимеров — P (из них j — масса тефлона; k — масса полиэтилена; l — масса полиэтилентерефталата; m — масса полистирола; n — масса поливинилхлорида);

резины и схожих элементов — p ;

нефтяных масел и примесей — q ;

бумаги — r ;

тканей — s .

Распределение между продуктами деструкции перечисленных компонентов может быть представлено через основные углеводороды типа $C_xH_yO_z$.

Углеводород $C_{x1}H_{y1}O_{z1}$ как продукт распада эмалей:

$$\begin{cases} x1 = 34,72a + 22,327b; \\ y1 = 43,4a + 37,069b; \\ z1 = 0. \end{cases}$$

Углеводород $C_{x2}H_{y2}O_{z2}$ как продукт распада полимеров:

$$\begin{cases} x2 = 0,0154j + 34,8193k + 21,6675l + \\ + 76,038m + 9,3993n + 25,4143p; \\ y2 = 82,1694k + 39,1656l + 76,4046m + \\ + 52,15616n + 38,935p; \\ z2 = 0,02532j + 12,555l + 0,515n + 4,7726p. \end{cases}$$

Углеводород $C_{x3}H_{y3}$ как смесь паров нефтяных масел:

$$\begin{cases} x3 = 63,664q; \\ y3 = 115,102q. \end{cases}$$

Углеводород $C_{x4}H_{y4}O_{z4}$ как смесь углеводородов, подвергающихся горению в самом МСУ:

$$\begin{cases} x4 = 12,2147b + 16,585k + 19,5338l + \\ + 1,7216n + 4,126p; \\ y4 = 24,4293b + 40,5308k + 38,5906l + \\ + 2,41024n + 6,0566p; \\ z4 = 9,5284l + 0,73264p. \end{cases}$$

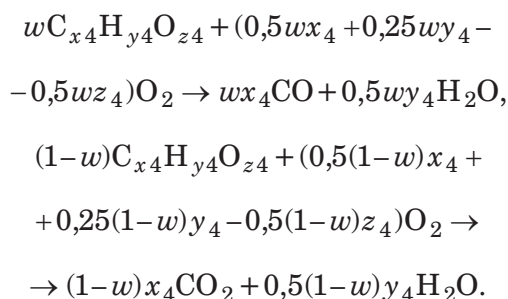
Углеводород $C_{x5}H_{y5}O_{z5}$ как смесь углеводородов, подвергающихся дальнейшему дожиганию в котле-утилизаторе:

$$\begin{cases} x_5 = 34,72a + 10,112b + 18,2342k + 0,14375l + \\ \quad + 76,02558m + 7,1624n + 17,802p; \\ y_5 = 30,992a + 12,64b + 41,6386k + 0,575l + \\ \quad + 76,4046m + 11,5741n + 26,758p; \\ z_5 = 0. \end{cases}$$

На 1 кг твердых отходов принимается следующее распределение компонентов: $a = b = 0,01$ кг; $j = 0,03$ кг; $k = r = 0,15$ кг; $i = 0,05$ кг; $m = 0,08$ кг; $n = p = 0,2$ кг; $q = 0,02$ кг; $s = 0,1$ кг; $l = 0$. Подставляя принятые значения масс компонентов, получаем следующие углеводородные соединения (по порядку): $C_{0,570}H_{0,805}$, $C_{19,353}H_{38,614}O_{1,686}$, $C_{1,273}H_{2,302}$, $C_{4,756}H_{9,947}$, $C_{10,705}H_{14,244}$.

Горение бумаги в МСУ рассматривается без образования токсичных соединений с выделением тепловой энергии.

Принимая некоторый недожог компонентов мусора w , горение в МСУ упрощенно можно представить химическими реакциями [5, 8]:



Для упрощения принимается равенство тепловой энергии, затрачиваемой на нагрев отходов до температур начала деструкции и энергии, выделяемой при сгорании бумаги, паров масел и самих горючих продуктов деструкции [3, 9, 10]. В таком случае учету подлежат только тяжелые углеводороды с высокой температурой воспламенения, подвергающиеся непосредственному дожиганию в котле-утилизаторе.

Функцию распада твердых отходов при его нагреве в МСУ приближенно можно задать линейной зависимостью типа:

$$f_{\Pi}(\tau) = \Omega \frac{\tau - \tau_{\text{Н}}}{\tau_{\text{К}} - \tau_{\text{Н}}},$$

где Ω — задаваемая доля распада к концу периода сжигания; $\tau_{\text{Н}}$ — момент начала распада полимеров в отходах, с; $\tau_{\text{К}}$ — момент окончания процесса сжигания, с.

Временная функция количества кислорода, требуемого для сжигания углеводородов и при-

месей в газе, поступающем в КУ, рассчитывается по формуле:

$$V_{O_2}(\tau) = \frac{f'_{\Pi}(\tau)}{M_{\text{МСУ}}(\tau)} \times$$

$$\left(\begin{aligned} &0,032(m_1 + 0,25n_1 - 0,5p_1) + \\ &+ 0,40737n + 0,04896p + \\ &+ 0,016(wm_1 + 0,95357l + 0,515n + \\ &+ 1,2536p) \end{aligned} \right),$$

где $f'_{\Pi} = f_{\Pi}(\tau) - f_{\Pi}(\tau - 1)$;

$$m_1 = 12,2147b + 9,3194k + 0,477l + 2,9251p;$$

$$n_1 = 24,4293b + 22,3668k + 0,477l + 2,57p;$$

$M_{\text{МСУ}}(\tau)$ — временная функция расхода газов за МСУ, кг/с.

Функция расхода топлива $m(\tau)$, кг/с, подаваемого на дожигание в КУ для повышения температуры, может быть определена через тепловой баланс, представляющий собой равенство суммы энергий продуктов, поступающих на сжигание, и энергии горячей смеси в факеле при заданной температуре факела. Необходим учет функции образования дополнительных газов в мусоросжигательном устройстве, приводящих к изменению химического состава рабочего газа в котле и к дополнительным энергетическим затратам.

В связи с периодическим изменением количественно-качественных показателей газов за МСУ тепловая мощность котла и функция $m(\tau)$ будут иметь резкопеременный характер. Подача дополнительного топлива для стабилизации переменного характера тепловой производительности может корректироваться двумя способами:

по постоянству теплоты, вводимой в котел-утилизатор;

по постоянству теплопроизводительности котла (паротурбинной части системы).

Для второго способа функциональная зависимость корректирующего требуемого расхода дополнительного топлива $m'(\tau)$ в конечной форме может быть выражена формулой:

$$m'(\tau) = \frac{N_3^{\text{пту}} - M(\tau)I(\tau)(1 - q_{\text{внеш}}) + M(\tau)I_{\text{ух}}(\tau)}{\eta_3 \eta_{\text{пту}} Q_{\text{Н}} - aQ_{\text{Н}} + I_{\text{ух}}(\tau)},$$

где $N_3^{\text{пту}}$ — электрическая мощность по паротурбинной части, кВт; $q_{\text{внеш}}$ — доля тепловых потерь котла через внешнюю обмуровку; $\eta_{\text{пту}}$ — КПД паротурбинного цикла; η_3 — КПД электрогенератора; $M(\tau)$ и $I(\tau)$ — функции мас-

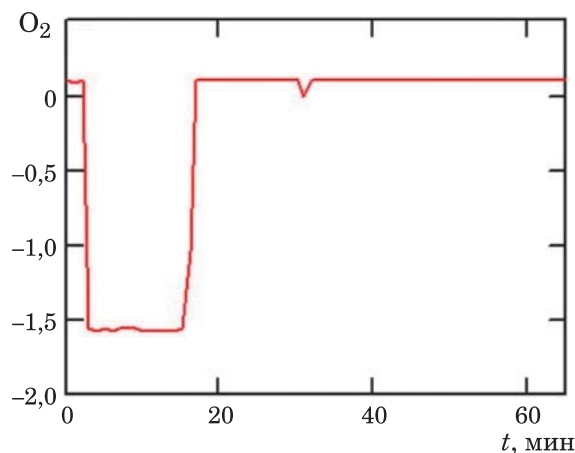


Рис. 2. Теоретическая избыточная доля кислорода в газе после МСУ:

O_2 — избыток кислорода после МСУ, %; t — время после загрузки ТПО в МСУ, мин

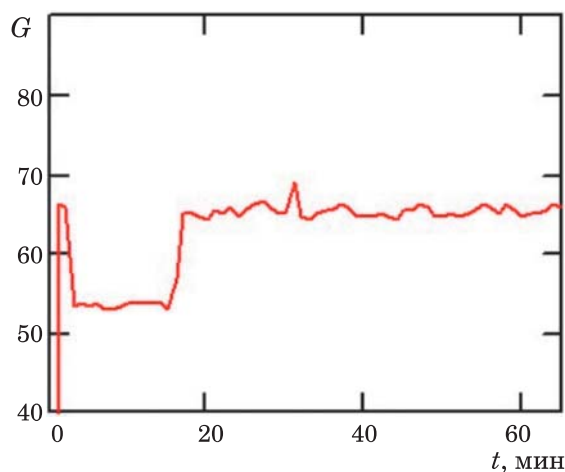


Рис. 3. Количество незадымленных (нетоксичных) газов в горелке котла

G — расход газов, кг/с; t — время после загрузки ТПО в МСУ, мин

сового расхода, кг/с, и энтальпии, кДж/кг, газов в котле.

Данный метод корректирования обеспечивает постоянство генерируемой электрической мощности системы, но стабилизирующая подача $m'(\tau)$ может принимать значения, недостаточные для достижения задаваемой температуры. При этом методе необходим дополнительный контроль отклонения температуры для исключения снижения температуры в топке КУ ниже $1250\text{ }^\circ\text{C}$ в связи с условием полной деструкции диоксинов и фуранов в потоке газа.

В связи с протеканием деструкции и воспламенения полимеров в МСУ возникает не-

достаток кислорода в первые минуты нагрева. График теоретического недостатка кислорода в МСУ показан на рис. 2.

Расчет и построение кривой осуществлялись для загрузки мусора 100 кг при условии пропускания через МСУ 20 % отходящих газов простой ГТУ со свободной турбиной мощностью 25 МВт с переменной нагрузкой. Отрицательные значения кислорода в газе указывают на необходимость увеличения доли газов через МСУ до 30 % на первые 19 – 20 мин после загрузки мусора.

На рис. 3 показана кривая количества незагрязненных фуранами и диоксинами газов на входе в теоретический котел-утилизатор. В период деструкции полимеров доля чистых газов, поступающих в котел, снижается.

Согласно теоретическим расчетам, показатель корректирования топлива в КУ $m'(\tau)$ в рассматриваемой схеме не поддается сильному колебанию и при постоянной паропроизводительности характер изменения определяется в основном только произведением $G(I_{\text{вх}} - I_{\text{ух}})$, т.е. количеством вносимого тепла с газами после ГТУ. Показатель $m'(\tau)$ находится в пределах 15% при мощности паротурбинной части системы в интервале 25 – 30 кВт и полный расход нефтяного газа в котел-утилизатор на дожигание колеблется в пределах $1,7 - 1,85\text{ м}^3/\text{с}$.

Результаты были получены при малом подсосе холодного воздуха (0,5 %) в МСУ при учете горения масел в мусоре. При расходе газов через МСУ в тепловом эквиваленте более 20 кВт на 100 кг мусора отклонение температуры факела в котле от задаваемой ($1350\text{ }^\circ\text{C}$) не наблюдается.

Следует отметить, что показатель расхода нефтяного газа на дожигание в котле-утилизаторе в рассматриваемой схеме значительно ниже количества сбросного газа, сжигаемого на газовом факеле («свече») нефтеперерабатывающего предприятия. Согласно данным ПАО «Орскнефтеоргсинтез» фактическая стоимость сбросного нефтяного газа практически равна нулю, что позволяет не учитывать данный показатель при экономических расчетах подобных схем утилизации твердых отходов нефтеперерабатывающих предприятий.

Список литературы

1. Юдин, А. Г. Условия образования и полной деструкции диоксинов и фуранов при сжигании галогеносодержащих отходов

References

- (Часть 1) / А. Г. Юдин, Л. А. Шульц // Экология и промышленность России. — 2009. — № 9. — С. 33 – 37.
- Юдин, А. Г. Условия образования и полной деструкции диоксинов и фуранов при сжигании галогеносодержащих отходов (Часть 2) / А. Г. Юдин, Л. А. Шульц // Экология и промышленность России. — 2009. — № 10. — С. 50 – 53.
 - Бушуев, А. Н. Энергетическая оценка дожигания вредных выбросов, образуемых при предварительном подогреве загрязненного металлического лома газами умеренной температуры в электросталеплавильном производстве / А. Н. Бушуев, Е. Б. Шабловская // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — Т. 16, № 15. — С. 34 – 42.
 - Пальгунов, П. П. Утилизация промышленных отходов / П. П. Пальгунов, М. В. Сумароков. — М.: Стройиздат, 1990. — 352 с.
 - Теплотехника: учебник / под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. — 6-е изд. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2018. — 880 с.
 - Федоров, Л. А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы / Л. А. Федоров; отв. ред. В. В. Оноприенко. — М.: Наука, 1993. — 265.
 - Газовые топлива и их компоненты: свойства, получение, применение, экология: справочник / В. Н. Бакулин [и др.]. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 614 с.
 - Кудинов, А. А. Горение органического топлива: учебное пособие / А. А. Кудинов. — М.: ИНФРА-М, 2023. — 390 с.
 - Асеева, Р. М. Горение полимерных материалов / Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков. — М.: Наука, 1981. — 280 с.
 - Косивцов, Ю. Ю. Технологии пиролиза органических материалов: монография / Ю. Ю. Косивцов, Э. М. Сульман. — Тверь: Тверской гос. технический ун-т, 2010. — 123 с.
 - Yudin A. G., Shultz L. A. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii (Ecology and Industry of Russia)*, 2009, No. 9, pp. 33 – 37.
 - Yudin A. G., Shultz L. A. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii (Ecology and Industry of Russia)*, 2009, No. 10, pp. 50 – 53.
 - Bushuev A. N., Shablovskaya E. B. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta (Herald of Kazan Technological University)*, 2013, Vol. 16, No. 15, pp. 34 – 42.
 - Palgunov P. P., Sumarokov M. V. *Utilizatsiya promyshlennykh otkhodov (Recycling of industrial waste)*, Moscow, Stroyizdat, 1990, 352 p.
 - Arkharova A. M., Afanasyeva V. N. *Teplotekhnika (Thermal engineering)*, 6th ed., Moscow, Publ. MSTU im. Bauman, 2018, 880 p.
 - Fedorov L. A., Onoprienko V. V. *Dioksiny kak ekologicheskaya opasnost': retrospektiva i perspektivy (Dioxins as an environmental hazard: retrospective and prospects)*, Moscow, Nauka, 1993, 265 p..
 - Bakulin V. N. *Gazovye topliva i ikh komponenty: svoystva, poluchenie, primeneniye, ekologiya (Gaseous fuels and their components: properties, production, application, ecology)*, Moscow, Publ. MPEI, 2009, 614 p..
 - Kudinov A. A. *Gorenie organicheskogo topliva (Combustion of organic fuel)*, Moscow, INFRA-M, 2023, 390 p..
 - Aseeva R. M., Zaikov G. E. *Gorenie polimernykh materialov (Combustion of polymeric materials)*, Moscow, Nauka, 1981, 280 p.
 - Kosivtsov Yu. Yu., Sulman E. M. *Tekhnologii piroliza organicheskikh materialov (Technologies of pyrolysis of organic materials)*, Tver, Tver State Technical University, 2010, 123 p.

bushuev.an@misis.ru

An option for energy-efficient disposal of solid waste from an oil refinery (using the example of PJSC Orsknefteorgsintez)

Bushuev A. N., Mazhirina R. E.

The option of recycling polymers and combustible materials of solid industrial waste from an oil refinery with the production of useful electrical and thermal energy in gas turbine and steam turbine cycles is considered. A waste disposal scheme based on a traditional gas turbine engine with a device installed behind it that provides heating of solid industrial waste with exhaust gases from a turbine followed by the supply of contaminated gases to a steam recovery boiler is proposed. The article shows the need for additional combustion of natural or petroleum gases in the combustion chamber of the recovery boiler in order to neutralize the supertoxic compounds in the gases behind the incinerator. Formulas are presented that reflect the formation of individual hydrocarbons during the heating of solid household and industrial waste. Time graphs of the theoretical oxygen deficiency in the waste incineration device and the amount of gases uncontaminated with dioxins and furans entering the waste-to-energy boiler after loading waste for disposal are given.

Keywords: gas turbine plant, destruction, waste heat recovery boiler, incinerator, solid industrial waste, toxic compounds, recycling.

CONTENTS

PROJECTS AND RESEARCH

- Bobryakov Al. A., Kosharnaya Yu. V.** Analysis of methods for calculating technical risk and probability of failure of overhead power lines. 2
- Razuvaev A. V.** Analysis of energy consumption of facilities and characteristics of a cogeneration plant. 11
- Fedin M. A., Kalinin V. A., Negrobov Ya. S., Bulatenko M. A., Geraskin A. Yu.** Development and experimental study of an electric heating system with thermal control based on piezo-quartz resonant frequency temperature sensors 16
- Shevyrev Yu. V., Kreshchanovskii P. S.** Research and development of a methodology

for selecting the parameters and voltage regulator of an active harmonic filter 24

- Kachanov A. N., Mironov E. A.** Using a traveling electromagnetic field to preheat rolling rolls during hardening. 32

SAVING ENERGY RESOURCES

- Yakovlev I. V., Avdokunin N. V., Gorelov M. V.** Power savings and consumption when providing thermal conditions for data processing centers cooled by external air 41

ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Bushuyev A. N., Mazhirina R. E.** An option for energy-efficient disposal of solid waste from an oil refinery (using the example of PJSC Orsknefteorgsintez). 50

Продолжается подписка на наш журнал на 2025 г.
Оформить подписку можно через подписные агентства
(подписной индекс 70734) или через редакцию.
Возможна подписка на электронную версию журнала.

Главный редактор **С. А. ЦЫРУК**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

М. Г. Баширов, И. В. Белоусенко,
В. В. Вахнина, А. В. Волков, Е. Г. Гашо, В. И. Гнатюк, А. О. Гольцев, И. Д. Грачев,
Н. Ф. Джагаров (Болгария), **Е. Н. Касьянова** (ответственный секретарь),
Ю. В. Матюнина, И. И. Надтока, А. Н. Пехота (Республика Беларусь),
С. К. Попов (зам. гл. редактора по теплоэнергетике),
Е. Н. Рыжкова (зам. гл. редактора по электроэнергетике), **Ю. А. Сычев, В. Э. Фризен,**
Н. Д. Чичирова, К. Ф. Шарафеддин (Ливан), **А. В. Щербаков, С. А. Янченко**

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных в журнале «Промышленная энергетика», допускаются только с разрешения редакции

Адрес редакции: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8.

Телефон: (495) 234-74-49.

[Http://www.promen.energy-journals.ru](http://www.promen.energy-journals.ru) E-mail: prom_energy@rambler.ru; prom_energy1@mail.ru

Сдано в набор 10.01.2025. Подписано в печать 27.01.2025. Дата выхода в свет 28.01.2025. Формат 60 × 84 1/8. Печ. л. 4,0.
Тираж 2500 экз. Заказ БЛ-1390. Цена — свободная.

Адрес для переписки: АО НТФ «Энергопрогресс»: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8

Оригинал-макет выполнен в издательстве «ФОЛИУМ»
127411, Москва, Дмитровское ш., 157, тел.: (499) 258-08-28. E-mail: info@folium.ru

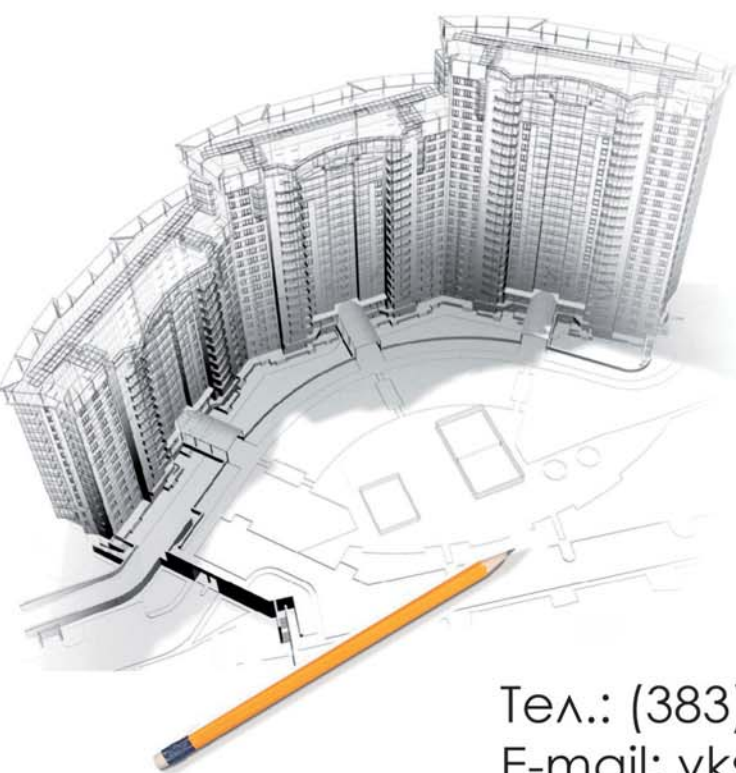
Типография издательского дома «ФОЛИУМ»

XXII межрегиональная специализированная выставка

11 - 13 марта 2025 г.

"Стройиндустрия СЕВЕРА. Энергетика. ЖКХ"

г. Якутск



Организаторы:



**Союз «Торгово-промышленная
палата Республики Саха (Якутия)»**



**Выставочная компания
Сибэкспосервис**
г. Новосибирск



**Выставочная компания
СахаЭкспоСервис**
г. Якутск

Тел.: (383)3356350

E-mail: vkse@yandex.ru, www.ses.net.ru



РМЭФ

РМЭФ



РОССИЙСКИЙ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ

РМЭФ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ФОРУМ

26-28 МАРТА 2025

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

 **ЭНЕРГЕТИКА И
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ЭКСПОФОРУМ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1

ENERGYFORUM.RU
rief@expoforum.ru
+7 (812) 240 40 40, доб. 2626



ENERGETIKA-RESTEC.RU
visit@energetika-restec.ru
+7 (812) 320 63 63, доб. 743



18+

@ENERGYFORUMSPB
САМАЯ АКТУАЛЬНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ О РМЭФ -
В TELEGRAM-КАНАЛЕ!