

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»

**ДИЗЕЛЬНЫЕ И ГАЗОПОРШНЕВЫЕ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТЫ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Учебное электронное издание

Учебное пособие

по дисциплинам «Системы электроснабжения с распределённой
генерацией» и «Изолированные энергосистемы и распределенная
генерация» для студентов, обучающихся по направлению
13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

УДК 621.311

ББК 32.966

Д 448

Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ» в качестве учебного издания

Подготовлено на кафедре электроэнергетических систем ИЭЭ (МЭИ)

Рецензенты: д.т.н., профессор кафедры ЭС «НИУ МЭИ» Жуков В.В.;
к.т.н., доцент кафедры электрических систем ИГЭУ
Голов В.П.

Авторы: Д.Н. Удинцев, С.В. Шульженко, О.Н. Кузнецов, А.А. Самойлов,
М.А. Еремеев.

Д 448 Дизельные и газопоршневые электроагрегаты отечественного производства для объектов распределенной генерации[Электронный ресурс]: учеб. пособие / Д.Н. Удинцев, С.В. Шульженко, О.Н. Кузнецов и др. – Электрон. дан. – М.: Издательство МЭИ, 2023. –1 электрон. опт. диск DVD-R.

Учебное пособие содержит требования нормативных документов к классификации, маркировке, типам исполнения электроагрегатов и электростанций для объектов распределенной генерации. Описаны особенности конструкции генерирующего оборудования для распределенной генерации. Представлен обзор отечественных предприятий, выпускающих источники электроэнергии для работы в составе объектов распределенной генерации. Предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению «Электроэнергетика и электротехника», образовательные программы «Оптимизация структур, параметров и режимов систем электроснабжения и повышение эффективности их функционирования» и «Электроэнергетические системы и сети, их режимы, устойчивость, надежность и качество электрической энергии».

Минимальные системные требования:

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше.

Веб-браузер: Google Chrome, Internet Explorer.

ISBN 978-5-7046-2804-0

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

Оглавление

Введение.....	5
1. Источники электроэнергии для систем электроснабжения,.....	5
содержащих распределенную генерацию.....	5
1.1. Классификация источников электроэнергии.....	5
1.2. Маркировка электроагрегатов	8
1.3. Особенности устройства первичных двигателей.....	10
электроагрегатов	10
1.4. Принцип действия регуляторов частоты и напряжения ЭА.....	12
2. Технические особенности электроагрегатов и электрических	17
станций	17
2.1. Бензиновые и дизельные электроагрегаты и электрические.....	17
станции	17
2.2. Энергетические установки на базе дизельных двухтопливных и газопоршневых двигателей	17
2.3. Классификация поршневых двигателей энергетических	18
установок на газе	18
2.4. Основные особенности двухтопливных дизельных и газопоршневых двигателей.	19
2.5. Расход и качество смазочных масел в газопоршневых двигателях....	21
2.6. Экономические аспекты применения двухтопливных дизелей и газопоршневых двигателей	22
2.7. Производство тепла энергетическими установками на базе	23
дизельных двигателей и газопоршневых двигателей.....	23
3. Обзор основных отечественных производителей источников.....	24
электроэнергии для работы в составе объектов распределенной	24
генерации	24
3.1. Акционерное общество «Трансмашхолдинг»	24
3.2. Открытое акционерное общество «Барнаултрансмаш».....	25
3.3. Публичное акционерное общество «РУМО»	26
3.4. Акционерное общество «Волжский дизель им. Маминых».....	27

3.5. Камский автомобильный завод (КАМАЗ), Ярославский моторный завод (ЯМЗ), Тутаевский моторный завод (ТМЗ).....	28
3.6. Открытое акционерное общество «Звезда-Энергетика».....	29
3.7. Общество с ограниченной ответственностью «НГ-Энерго».....	29
3.8. Общество с ограниченной ответственностью «Кама-Энергетика»....	30
4. Анализ мощностного ряда источников электроэнергии,.....	30
производимых отечественными предприятиями	30
4.1. Производители электроагрегатов полностью или с преобладающим большинством отечественных комплектующих.....	30
4.2. Производители отечественных двигателей	32
4.3. Производители отечественных установок на базе зарубежных двигателей	32
5. Методика выбора объектов генерации	36
5.1. Методика расчета номинальной мощности и количества	36
5.1.1. Анализ существующих методик.....	36
5.1.2. Расчета числа и мощности электроагрегатов, с учетом особенностей режимов работы распределенной генерации	36
6. Анализ отечественных производителей полного агрегата и двигателей для покрытия нагрузок энергоцентров различной мощности	41
7. Выводы	44
Список рекомендованной литературы.....	46
Основной	46
Дополнительный	46
Рекомендуемый	46

Введение

Необходимость развития распределенной генерации (РГ) отражена в Указе Президента РФ от 7 мая 2018 года «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». В п.15 указано, что одним из путей «гарантированного обеспечения доступной электроэнергией...» является «...развитие распределенной генерации...».

В связи с развитием РГ в нашей стране возникла необходимость в подготовке специалистов, проектирующих, строящих и эксплуатирующих данные объекты электроэнергетики. Дисциплины «Системы электроснабжения с распределенной генерацией» и «Изолированные энергосистемы и распределенная генерация» имеют своей целью изучение способов и подходов к построению систем электроснабжения, содержащих распределенную генерацию (РГ), работающих как изолированно, так и параллельно с внешней энергосистемой.

Данное учебное пособие призвано оказать помощь в изучении отечественных источников электроэнергии, предназначенных для работы в составе объектов РГ. Учебное пособие содержит описание принципов работы дизельных и газопоршневых электроагрегатов (ЭА), обзор отечественных предприятий, выпускающих источники электроэнергии для работы в составе объектов РГ, представлены сравнительные характеристики выпускаемой продукции, отмечены их сильные и слабые стороны.

1. Источники электроэнергии для систем электроснабжения, содержащих распределенную генерацию

1.1. Классификация источников электроэнергии

ЭА и электростанции (ЭС) классифицируют в соответствии с табл. 1 [1].

Таблица 1

Классификация источников электроэнергии

Признак классификации	Электроагрегат	Электростанция
По роду тока	Постоянного тока, переменного однофазного тока, переменного трехфазного тока	Постоянного тока, переменного однофазного тока, переменного трехфазного тока
По виду первичного двигателя	Бензиновые (карбюраторные), дизельные, газотурбинные	Бензиновые (карбюраторные), дизельные, газотурбинные
По способу охлаждения первичного двигателя	С воздушной системой охлаждения, с водо-воздушной (радиаторной) системой охлаждения, с водо-водяной (двухконтурной) системой охлаждения	С воздушной системой охлаждения, с водовоздушной (радиаторной) системой охлаждения

По способу защиты от атмосферных воздействий		Капотного исполнения, бескапотного исполнения, контейнерного исполнения, кузовного исполнения
По степени подвижности	Передвижные, в том числе встраиваемые, стационарные	Передвижные
По способу перемещения		Переносные, на прицепе (прицепах), на автомобиле (автомобилях), самоходные, на раме-салазках, блочно-транспортбельные, на железнодорожной платформе (в вагоне)
По числу источников ЭЭ		Одноагрегатные, многоагрегатные, в том числе комбинированные

Сочетание основных параметров ЭА различных типов должно соответствовать данным, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Сочетание основных параметров ЭА различных типов

Тип ЭА	Род тока	Напряжение, В	Частота тока, Гц	Номинальная мощность, кВт
Передвижные бензиновые	переменный однофазный	115	400	0.5; 1
		230	50	0.5; 1; 2; 4
			400	0.5; 2; 4
	переменный трехфазный	230	50	1; 2; 4; 8; 16; 30
			400	4; 8; 16; 30
			50	2; 4; 8; 16; 30
	постоянный	28.5		0.5; 1; 2; 4; 8
		115		2; 4; 8; 16
		230		16; 30
Передвижные дизельные	переменный однофазный	230	400	8
	переменный трехфазный	230	50	4; 8; 16; 30; 60; 100
			400	8; 16; 30; 60; 100; 200
		400	50	4; 8; 16; 30; 60; 100; 200
			400	60; 100; 200
	постоянный	28.5		4; 8
		115		8; 16
		230		16; 30
Стационарные дизельные	переменный трехфазный	230	50	4; 8; 16; 30; 60
		400		8; 16; 30; 60; 100; 200; 315; 500; 630
		6300		500; 630; 1000; 1600; 2000; 3150; 5000
		10500		500; 1000; 1600; 2000; 3150; 5000
	переменный	230	50	30; 60

Передвижные газотурбинные	трехфазный	400		30; 60; 100; 200; 500
		6300		1000; 2000; 3150; 5000
		10500		1000; 2000; 3150; 5000

Сочетание основных параметров ЭС различных типов должно соответствовать данным, приведенным в табл. 3.

Таблица 3

Сочетание основных параметров ЭС различных типов

Тип ЭС	Род тока	Напряжение, В	Частота, Гц	Номинальная мощность, кВт
Бензиновые	переменный однофазный	230	50	0.5; 1; 2; 4
		230	50	4; 8; 16; 30
	переменный трехфазный	230	400	16; 30
		400	50	4; 8; 16; 30
	постоянный	28.5		0.5; 1; 2; 4
		115		2; 4; 8
Дизельные	переменный трехфазный	230	50	8; 16; 30; 60
		230	400	8; 16; 30; 60; 100; 200
		400	50	4; 8; 16; 30; 60; 100; 200; 500; 1000
		400	400	60; 100; 200
		6300	50	1000
		10500	50	1000
	постоянный	115		8; 16
		230		16; 30
Газотурбинные	переменный трехфазный	400	50	30; 60; 100; 200; 500; 1000
		6300		1000; 2000; 3150; 5000
		10500		1000; 2000; 3150; 5000

Сочетание основных параметров дизельных электростанций (ДЭС) мощностью свыше 1000 кВт устанавливается в технических заданиях на их разработку с учетом требований табл. 1. Степени автоматизации электрогенераторных установок (ЭГУ) с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания представлены в табл. 4 [2].

Таблица 4

Степени автоматизации ЭКУ с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания

Объем автоматизации	Степень автоматизации ЭГУ
Стабилизация выходных электрических параметров. Защита электрических цепей	0
Стабилизация выходных электрических параметров. Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита. Автоматическое поддержание нормальной работы после	1

пуска и включения нагрузки, в том числе без обслуживания в течение 4 или 8 часов	
Стабилизация выходных электрических параметров. Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита. Дистанционное и (или) автоматическое управление при пуске, работе и остановке со сроком необслуживаемой работы в течение 16 или 24 часов	2
Стабилизация выходных электрических параметров. Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита. Дистанционное и (или) автоматическое управление всеми технологическими процессами, в том числе при параллельной работе, со сроком необслуживаемой работы в течение 90, 120, 150 или 240 часов	3
Стабилизация выходных электрических параметров. Аварийно-предупредительная сигнализация и аварийная защита. Дистанционное и (или) автоматическое управление всеми технологическими процессами. Дистанционный контроль работоспособности с элементами диагностики неисправностей и рекомендациями по их устранению	4

1.2. Маркировка электроагрегатов

Структура условных обозначений ЭА с указанием порядковых номеров символов (букв и цифр), характеризующих отличительные признаки, представлена на рис. 1 и принимается в соответствии с [3].

X	X	XXX X	X	-X	XXX	-XX	-X	X	X	X	-XX	-X	X	-X	X
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Рис. 1. Структура условных обозначений ЭА

В условном обозначении ЭА отличительные признаки должны обозначаться символами следующим образом:

1 - буква, обозначающая исполнение ЭГУ:

А – ЭА;

2 - буква, обозначающая тип используемого первичного двигателя:

Б – бензиновый;

Г – газотурбинный;

Д – дизельный (ДД);

П – газопоршневой (ГПД);

3 - число, обозначающее номинальную мощность, кВт;

4 - степень подвижности:

Н – переносной;

С – стационарный;

Т - блочно-транспортабельный;

Б – передвижной буксируемый;

Ж – передвижной на железнодорожной платформе (в вагоне);

Ю – передвижной перевозимый;

- 5 – род тока (через дефис):
Т – переменный трехфазный;
П – постоянный;
О – переменный однофазный;
- 6 – число, обозначающее номинальное напряжение, В;
- 7 – число (через дефис), обозначающее номинальную частоту тока, Гц;
- 8 – цифра (через дефис), обозначающая степень автоматизации по ГОСТ 23377. (Нулевую степень автоматизации обозначают цифрой «0»);
- 9 – буква, обозначающая способ охлаждения первичного двигателя:
В – воздушный;
Р – водо-воздушный (радиаторная система охлаждения);
Д – водо-водяной (двухконтурная система охлаждения);
- 10 – буква, обозначающая вариант размещения:
Х – без рамы (на фундаменте);
Р – на раме;
- 11 – буква, обозначающая способ защиты от внешних воздействий:
Х – без капота (открытый);
П – под капотом;
Н – - в контейнере;
К – в кузове на прицепе;
У – встраиваемый;
В – в вагоне;
- 12 – буква и цифра (через дефис), обозначающие класс применения по ГОСТ 23377;
- 13 – - буква (через дефис), обозначающая назначение ЭА:
О – основной;
Р – резервный;
А – аварийный;
- 14 – цифра (число), обозначающая(ее) вариант модификации ЭА (базовое исполнение обозначается цифрой «0»). Конструктивное отличие варианта модификации от базовой конструкции указывается в технических условиях или стандартах на конкретную ЭГУ);
- 15 – буква (буквы) (через дефис), обозначающая(ие) климатическое исполнение ЭА по ГОСТ 15150;
- 16 – цифра, обозначающая категорию размещения ЭА по ГОСТ 15150.

Примеры условных обозначений ЭА:

а) ЭА дизельный, мощностью 60 кВт, стационарный, переменного трехфазного тока, напряжением 400 В, частотой 50 Гц, автоматизированный по третьей степени, с двухконтурной (водо-водяной) системой охла-

ждения дизеля, на раме, без капота, класса применения G2, резервный, первой модификации, климатического исполнения У, категории размещения 2: АД60С-Т400-50-3Д РХ-G2-Р1-У2;

б) ЭА дизельный, мощностью 16 кВт, передвижной перевозимый, переменного трехфазного тока, напряжением 230 В, частотой 400 Гц, автоматизированный по первой степени, с водо-воздушной системой охлаждения, на раме, под капотом, класса применения G3, основной, пятой модификации, климатического исполнения УХЛ, категории размещения 1: АД 16Ю-Т230-400-1РРП-С3-05-УХЛ1.

1.3. Особенности устройства первичных двигателей электроагрегатов

Дизельная электростанция (ДЭС) (газопоршневая или газотурбинная) – одни из наиболее распространенных источников электропитания в удаленных населенных пунктах, не имеющих питания от единой национальной электрической сети (ЕНЭС) России.

Устройство простейшего одноцилиндрового дизельного двигателя показано на рис. 2.

Одной из основных деталей двигателя является блок с цилиндром 2 в котором возвратно-поступательно движется поршень 3 с поршневыми кольцами 4. Поршень крепится к шатуну 5, который соединяет его с коленчатым валом двигателя 8. После воспламенения в цилиндре сжатой топливовоздушной смеси на поршень действует давление газообразных продуктов сгорания и не участвующих в горении газов воздуха, которые через шатун создают крутящий момент на коленчатом валу. К коленчатому валу присоединен маховик 6. Клапаны 1 размещены в головке блока цилиндров и в закрытом состоянии образуют герметичную камеру сгорания. Открытие и закрытие клапанов происходит кулачками распределительного вала 10 через толкатели 11 и коромысла (на рис.2 не имеют цифрового обозначения). Распределительный вал приводится во вращение от коленчатого вала посредством шестерни 9.

В случае же с автомобилем, как правило, мы имеем двигатель, имеющий 4 цилиндра (может быть от 1 до 16 цилиндров) (рис. 3). Кроме того, появляются механизмы передачи вращающего момента двигателя на колёса автомобиля – трансмиссия. Изучив работу двигателя внутреннего сгорания (ДВС), рассмотрим устройство ДЭС. Конструктивные элементы ДЭС представлены на рис. 4.

В ДЭС крутящий момент передаётся через муфту на вал генератора переменного тока. Т.е. коленчатый вал вращает непосредственно ротор генератора, что создает электродвижущую силу (ЭДС) и ток требуемой частоты.

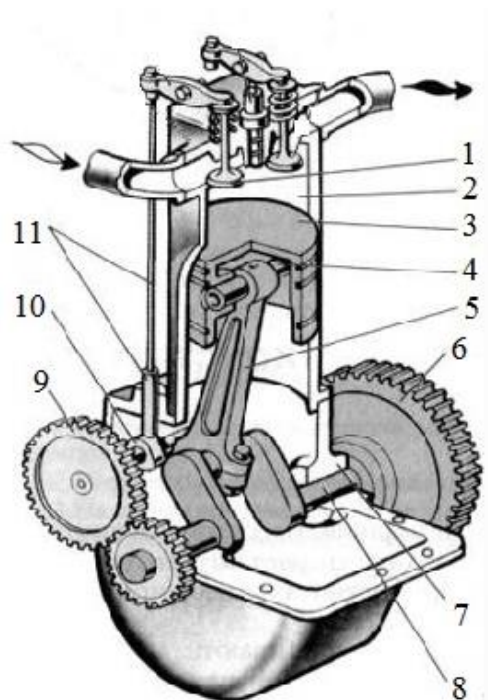


Рис. 2. Строение простейшего одноцилиндрового двигателя

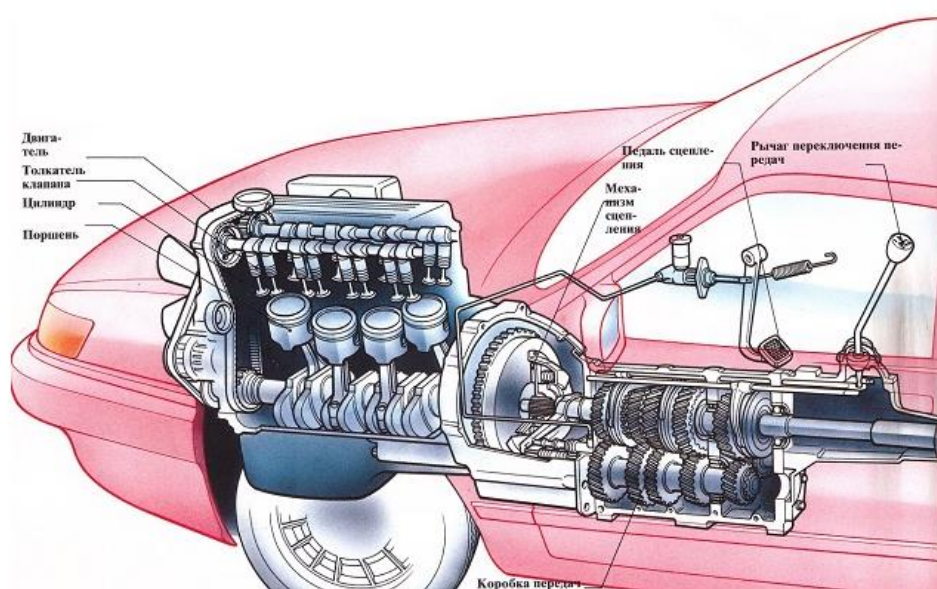


Рис. 3. Двигатель автомобиля

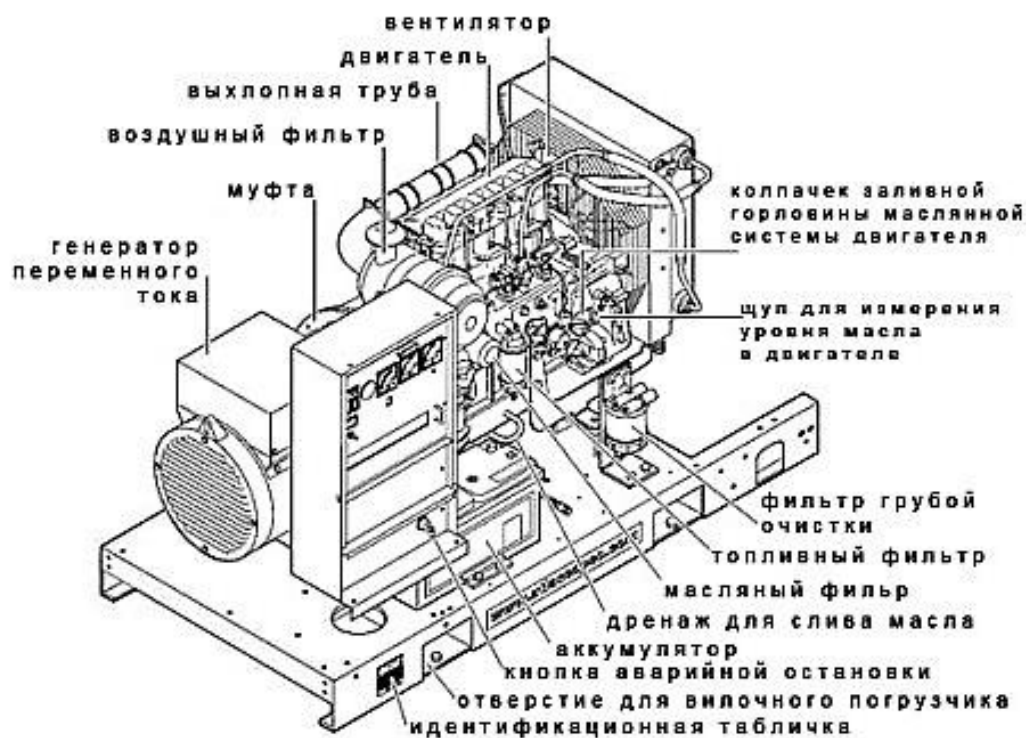


Рис. 4. Конструктивные элементы ДЭС

Дизельный двигатель в составе ДЭС должен обеспечить равномерность вращения вала и при значительных изменениях отбираемой мощности, поэтому в комплект оборудования ДЭС дополнительно входит электронный или механический регулятор оборотов (регулятор частоты вращения). Кроме того, ДЭС комплектуется фильтрами тонкой очистки горючей смеси (топливный и воздушный), фильтром тонкой очистки масла, датчиками для измерения параметров функционирования элементов двигателя [9].

1.4. Принцип действия регуляторов частоты и напряжения ЭА

Крутящий момент от вала двигателя 2 передается на вал 1 регулятора через зубчатую передачу 3 (рис. 5). При увеличении частоты вращения грузики 5 поворачиваются вокруг осей и своими кулачками давят на стержень 7, который, сжимает пружину 6 и через рычаг 8 и тягу 9 прикрывает дроссельную заслонку 10, уменьшая подачу топливовоздушной в двигатель.

При уменьшении частоты вращения пружина 6, разжимаясь, стержнем 7 через рычаг и тягу открывает дроссельную заслонку, увеличивая подачу топливовоздушной, что приводит к увеличению частоты вращения. Подобными регуляторами снабжались двигатели типа УД, 2СД, «Москвич-408» устанавливаемые на ЭА отечественного производства.

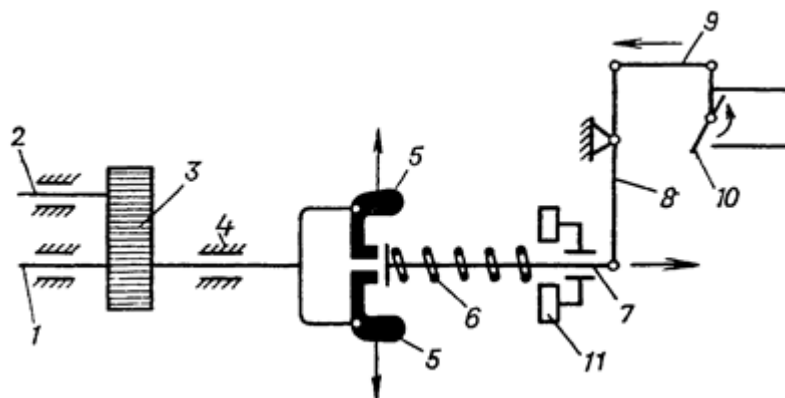


Рис. 5. Схема центробежного автоматического регулятора частоты вращения:
1 – вал регулятора; 2 – вал двигателя; 3 – зубчатая передача; 4 – подшипник; 5 – грузики с кулачками; 6 – пружина; 7 – стержень; 8 – рычаг; 9 – тяга; 10 – дроссельная заслонка; 11 – гайка с наружной резьбой

Генераторы серии ГАБ выполнены на частоту вращения 3000 оборотов/мин и имеют два явно выраженных полюса на роторе. Генератор выполнен с самовозбуждением. Обмотка возбуждения получает питание от дополнительной обмотки статора генератора через выпрямитель, щетки и контактные кольца. Процесс начального самовозбуждения синхронного генератора аналогичен процессу начального самовозбуждения генератора постоянного тока. Для усиления остаточного магнитного потока в генераторах ГАБ установлены постоянные магниты.

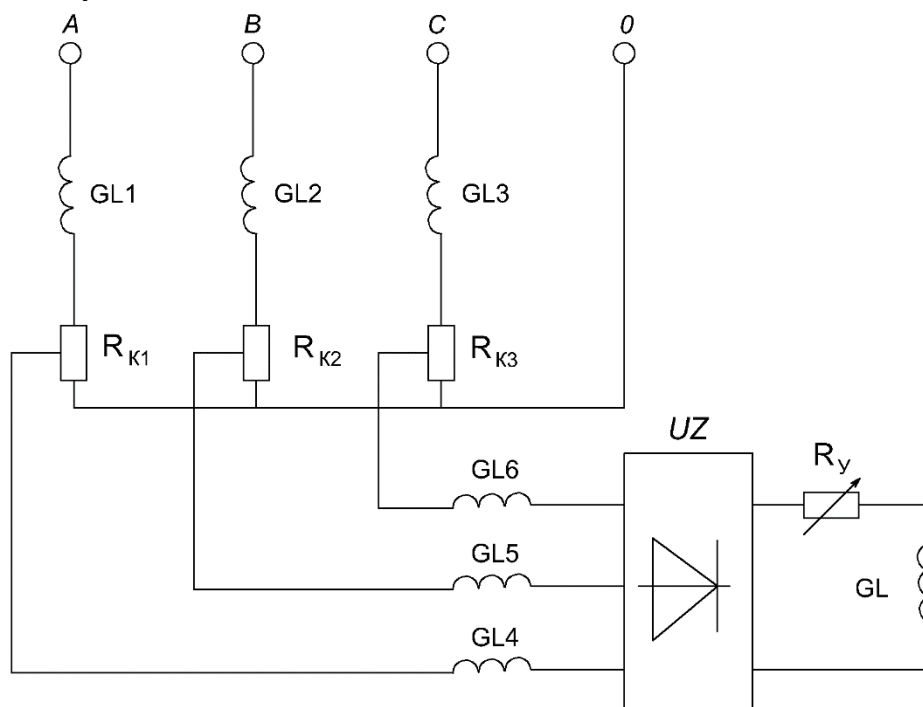


Рис. 6. Схема возбуждения синхронного генератора серии ГАБ

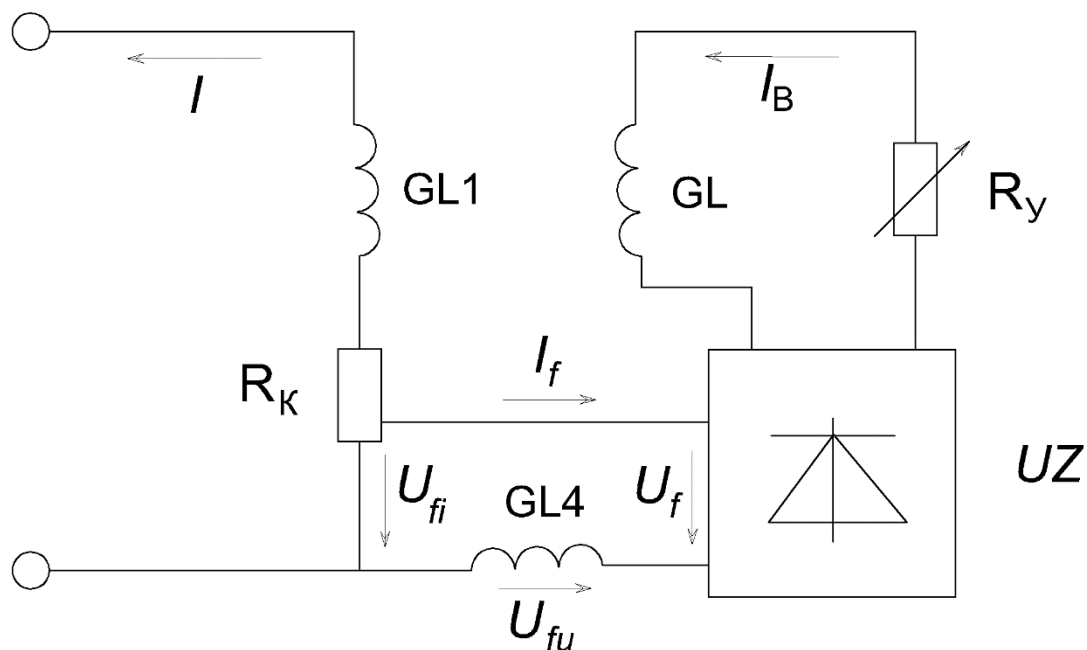


Рис. 7. Однофазная схема возбуждения синхронного генератора серии ГАБ

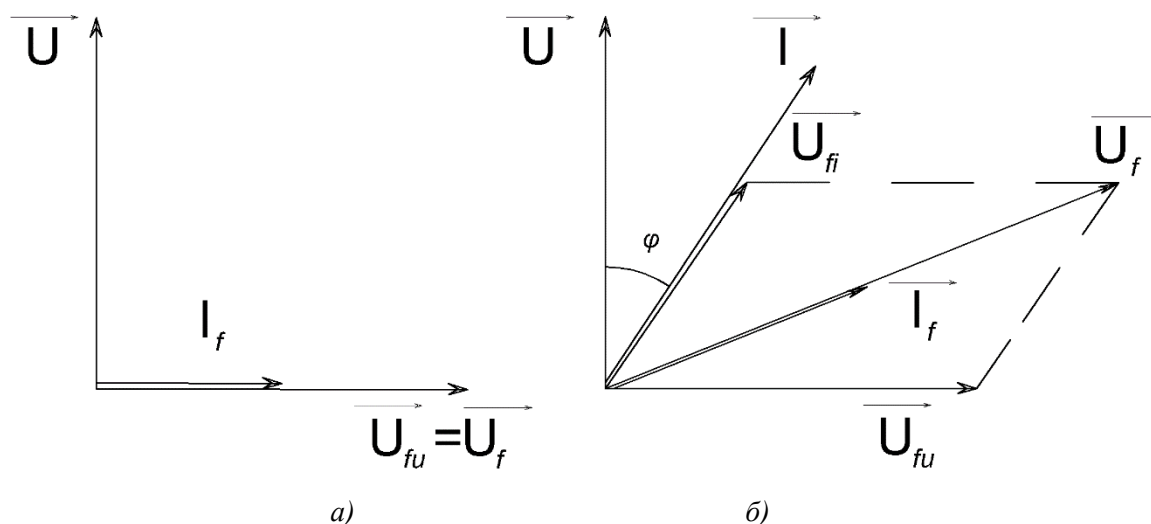


Рис. 8. Векторные диаграммы синхронного генератора серии ГАБ: *a* – при работе на холостом ходу; *б* – при работе под нагрузкой

Схема возбуждения синхронного генератора ГАБ (рис. 6) включает: силовые обмотки статора $GL1... GL3$; компаундирующие резисторы $R_{к1}...R_{к3}$; дополнительные обмотки статора $GL4...GL6$; выпрямитель UZ ; обмотку возбуждения генератора GL и реостат уставки напряжения R_y .

Автоматическое регулирование напряжения осуществляется с помощью системы амплитудно-фазового компаундирования (АФК), которая выполнена на компаундирующих резисторах $R_{к1}...R_{к3}$ и дополнительных обмотках $GL4...GL6$. С каждой фазы синхронного генератора (рис. 6) на выпрямитель UZ подается компаундное (составное) напряжение U , которое имеет две составляющие (рис. 7):

- 1) падение напряжения, пропорциональное току нагрузки \vec{U}_{fI} ;
 - 2) напряжение, пропорциональное напряжению генератора \vec{U}_{fu} .
- За счет смещения дополнительной обмотки относительно силовой на 90° вектор \vec{U}_{fu} будет отставать от вектора \vec{U} на 90° (рис. 8).

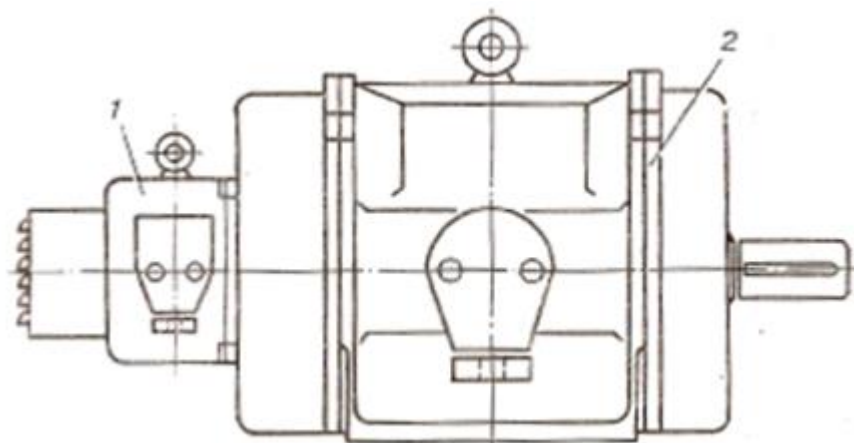


Рис. 9. Синхронный генератор: 1 – возбудитель; 2 – генератор

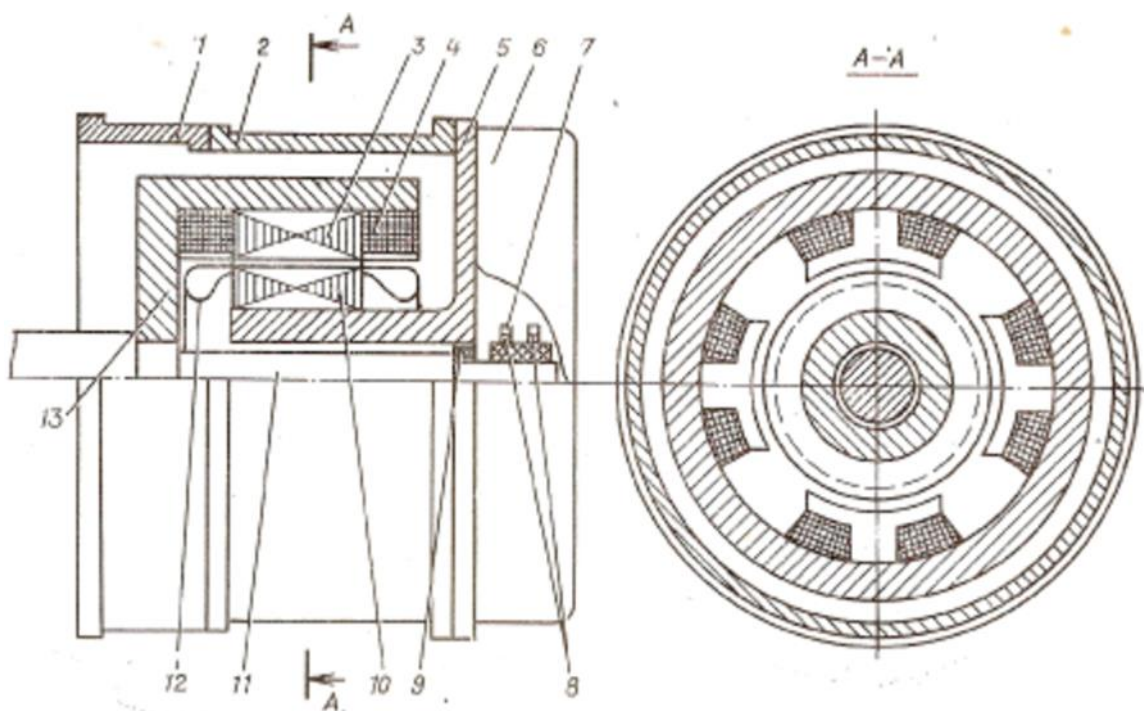


Рис. 10. Маховичный синхронный генератор: 1 – фланец генератора; 2 – соединительный корпус; 3 – полюс; 4 – обмотка возбуждения; 5 – корпус (станина); 6 – колпак; 7 – щетка; 8 – контактные кольца; 9 – подшипник; 10 – сердечник статора; 11 – вал; 12 – обмотка якоря; 12 – ротор

На электростанции ЭСД-50ВС установлен генератор ДГС 92-4М (дизель-генератор синхронный, габарит – 9, условная длина – 2, полюсов – 4, модернизированный). Конструктивно генератор выполнен из двух электрических машин: синхронного генератора 2 (рис. 9) и возбудителя 1 в виде генератора постоянного тока. Корпуса возбудителя прикреплён к

подшипниковому щиту генератора, а якорь возбудителя посажен на конец вала синхронного генератора.

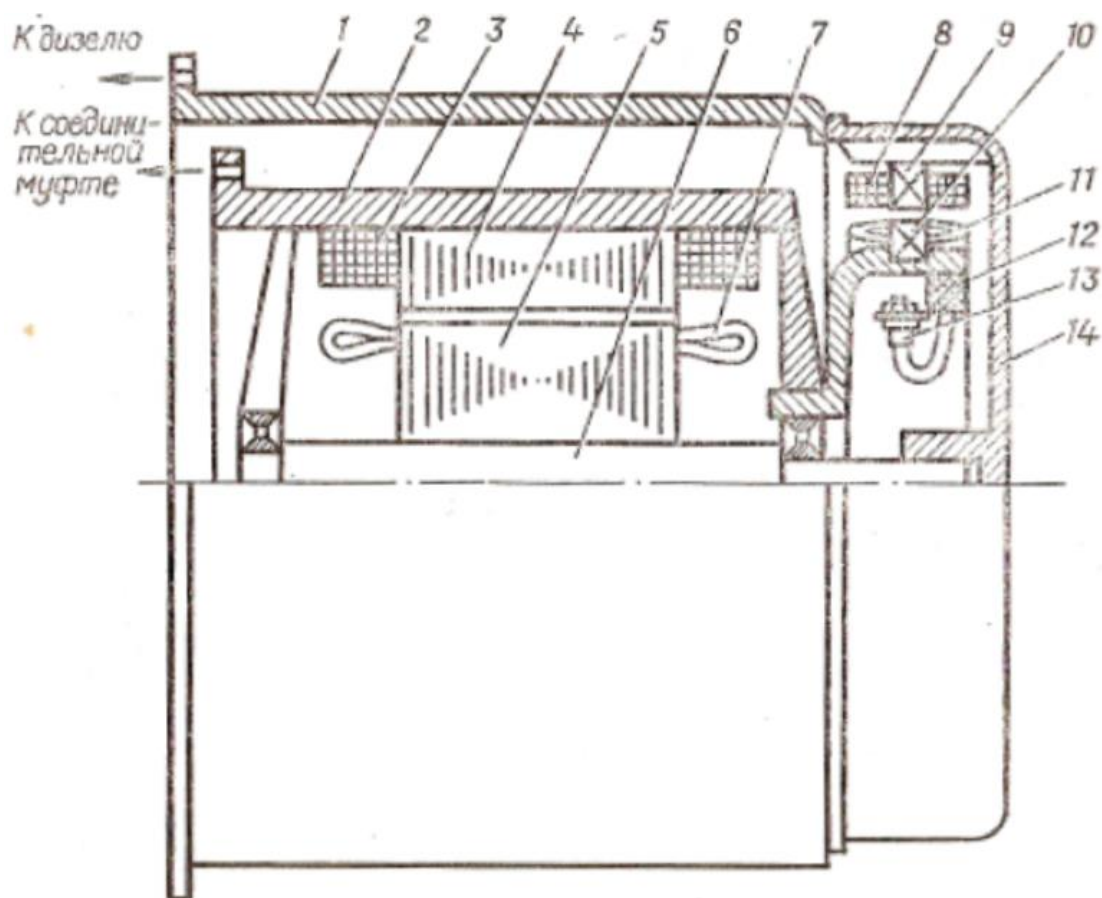


Рис. 11. Маховичный синхронный генератор ГСМ: 1 – корпус генератора; 2 – индуктор (ротор); 3 – обмотка возбуждения; 4 – полюс; 5 – якорь (статор); 6 – вал; 7 – обмотка якоря; 8 – обмотка возбуждения возбудителя; 9 – полюс возбудителя; 10 – якорь (ротор) возбудителя; 11 – обмотка якоря возбудителя; 12 – обойма; 13 – диод; 14 – корпус возбудителя

В дизельных ЭА АД-60 и АД-100 применен бесщеточный генератор ГСМ (генератор синхронный маховичный (рис. 10, 11)). В отличие от генераторов серии ГАБ он не имеет скользящих электрических контактов. Генератор состоит из двух машин: маховичного синхронного генератора и синхронного возбудителя с выпрямителем. Маховичный синхронный генератор состоит из неподвижного якоря (статора) 5 с обмоткой 7, вращающегося индуктора (ротора) 2 с прикрепленными к нему четырьмя полюсами 4 и обмоткой 3 возбуждения. Синхронный возбудитель выполнен по обращенной схеме: якорь 10 с обмоткой 11 установлен на роторе синхронного генератора; индуктор с шестнадцатью полюсами 9 и двумя обмотками 8 возбуждения возбудителя прикреплен к корпусу 14. Диоды 13 выпрямителя установлены на пластмассовой обойме 12 и вращаются вместе с якорем возбудителя и индуктором генератора. Такая конструкция позво-

лила исключить контактные кольца и щетки, подверженные в ходе эксплуатации наибольшему износу. Синхронный генератор выполнен на частоту 50 Гц, а возбудитель – на частоту 200 Гц.

2. Технические особенности электроагрегатов и электрических станций

2.1. Бензиновые и дизельные электроагрегаты и электрические станции

Бензиновые ЭС имеют небольшую мощность, высокий удельный расход топлива, исключают параллельную работу. К преимуществам относятся возможность работы при низких температурах, невысокая стоимость.

Одним из крупнейших отечественных производителей ДЭС является ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод). Эти установки предназначены для получения трехфазного электрического тока напряжением 400 В, частотой 50 Гц. Диапазон мощностей 60–400 кВт.

В качестве основных источников электроснабжения применяются для автономных объектов (удалённые населённые пункты, фермерские хозяйства, вахтовые посёлки, буровые установки и т.п.).

В качестве резервных источников электроснабжения могут применяться на объектах, требующих повышенной надёжности энергообеспечения (учреждения здравоохранения, школы, банки, гостиницы и т.п.).

2.2. Энергетические установки на базе дизельных двухтопливных и газопоршневых двигателей

В настоящее время наметилась тенденция на строительство децентрализованных комбинированных источников электро- и теплоснабжения, устанавливаемых как в существующих отопительных котельных, так и на вновь строящихся источниках тепла [4]. Создание таких энергоустановок имеет ряд преимуществ. Среди них основными являются короткие сроки строительства, повышение надёжности теплоснабжения потребителей, снижение инерционности теплового регулирования и потерь в тепловых сетях, относительно сетей, подключённых к крупным источникам тепла.

В последнее время использование газа в ДВС получило большое распространение. Обусловлено это тремя основными причинами: увеличением разницы в стоимости жидкого топлива и газа; значительно меньшими вредными выбросами двигателей на газовом топливе по сравнению с жидким топливом; постоянно увеличивающейся сетью газоснабжения.

Использование локальных систем производства электрической и тепловой энергии с использованием поршневых двигателей, работающих на природном газе или пропане, является одним из возможных решений данной задачи. Их применение в ряде случаев обеспечит менее обременительное развитие энергетической инфраструктуры, и приводит к положительным изменениям в экономике. Преимуществами ЭС с поршневыми газовыми двигателями являются:

- 1) низкая стоимость установленной мощности за 1 кВт;
- 2) высокая безопасность производства ЭЭ, обусловленная отсутствием высоких температур, давлений, моментов инерции;
- 3) срок службы поршневых двигателей на газовом топливе - до 300 000 часов, или 37 лет, при эксплуатации по 8 000 часов в год делает мини-ТЭЦ надежнейшим источником бесперебойного энергообеспечения;
- 4) экологическая приемлемость;
- 5) высокая мобильность;
- 6) широкий диапазон рабочих режимов – от 15–20% до 110% (пиковый режим при кратковременной работе) номинальной мощности при пропорциональном расходе топлива.

Основным недостатком поршневых машин является ограниченная мощность. Как правило, это до 5 МВт для одной машины. Исключения – финская фирма *Wartsila*, выпускающая уникальные газопоршневые энергетические установки с единичной электрической мощностью свыше 16 МВт. Средний промышленный потребитель в России имеет установленную мощность в 1–2 МВт [4]. При необходимости могут быть установлено несколько параллельно работающих агрегатов. Имеются примеры установки до 40 агрегатов в одной локальной системе.

Энергетические поршневые установки на газе окупают себя в течение 3–5 лет. А автономность мини-ТЭЦ на их базе, производящих ЭЭ и тепло на месте потребления, повышает надежность энергоснабжения. Малые генерирующие системы позволяют решить острый вопрос неравномерного суточного потребления ЭЭ, неразрешимый для крупных генерирующих установок.

2.3. Классификация поршневых двигателей энергетических установок на газе

Среди ДЭС, использующих газ в качестве топлива, можно выделить 3 группы.

1. Дизельные двигатели, переведенные на частичное сжигание газа. Это – так называемые двухтопливные дизели. Количество потребляемого ими жидкого топлива может меняться от 100% до 10–15%. Остальная часть топлива – природный газ, который смешивается с воздухом на входе в двигатель. При этом воспламенение топливной смеси может происходить либо самостоятельно (от повышения температуры), либо от постороннего источника воспламенения (свеча зажигания).

2. ГПД, в которых основным топливом является газ, а небольшая доля жидкого топлива – пилотное топливо (*pilot fuel*) впрыскивается для инициации воспламенения газозоудшной смеси в цилиндр, либо (значительно чаще) в специальную форкамеру. Воспламенение пилотного топлива может происходить также двумя способами, упомянутыми выше.

3. ГПД, работающие только на газовом топливе и не использующие пилотное топливо. Отличаются пониженной степенью сжатия и, как правило, меньшей экономичностью. Источник воспламенения топливоздуш- ной смеси – свеча зажигания.

2.4. Основные особенности двухтопливных дизельных и газопоршне- вых двигателей.

Использование в энергогенерирующем секторе двухтопливных ди- зелей и ГПД требует выполнения ряда специфических требований к топ- ливу и смазочным маслам.

А. Тепловая экономичность двухтопливных дизельных двигателей и ГПД

На рис.12 приведены данные фирмы *Caterpillar* по влиянию относи- тельной нагрузки однотипных двигателей на жидком и газовом топливе на тепловую экономичность, полученные для двигателей серии *379DF-399DF*. Обращает внимание различный характер изменения КПД при сни- жении нагрузки, более благоприятный для двигателей на жидком топливе, однако, отличия не носят принципиального характера. Подобный же ха- рактер зависимости КПД от относительной нагрузки получен и для двига- телей фирмы *Perkins*.

Б. Весовые характеристики двухтопливных дизельных двигателей, ГПД и энергетических установок на их базе

Несмотря на огромное разнообразие конструктивных решений, и фирм-изготовителей дизельных двигателей ДД и ГПД, их главная харак- теристика – зависимость удельного весового показателя [кг/кВт] от еди- ничной мощности двигателя находится (за небольшим исключением) в до- вольно узких пределах и подчиняется хорошо прослеживаемой закономер- ности. На рис. 13 представлена эта зависимость для ведущих мировых и российских производителей ДД и ГПД.

Анализ кривой позволяет сделать следующие выводы.

А. Удельный весовой показатель описывается степенной зависимо- стью с пологой правой ветвью. Такая зависимость обычно наблюдается в конструкциях, где увеличение единичной мощности двигателя произво- дится соответствующим увеличением числа цилиндров, что не приводит к существенному уменьшению удельного веса. Из довольно узкого диапа- зона разброса точек сильно выпадают (в сторону увеличения) только по- казатели ДД ОАО «Пенздизельмаш», которые традиционно отличаются массивностью конструкции. Справедливости ради, следует отметить, что эти ДД и по надежности и продолжительности межремонтного периода также значительно превосходят другие ДД.

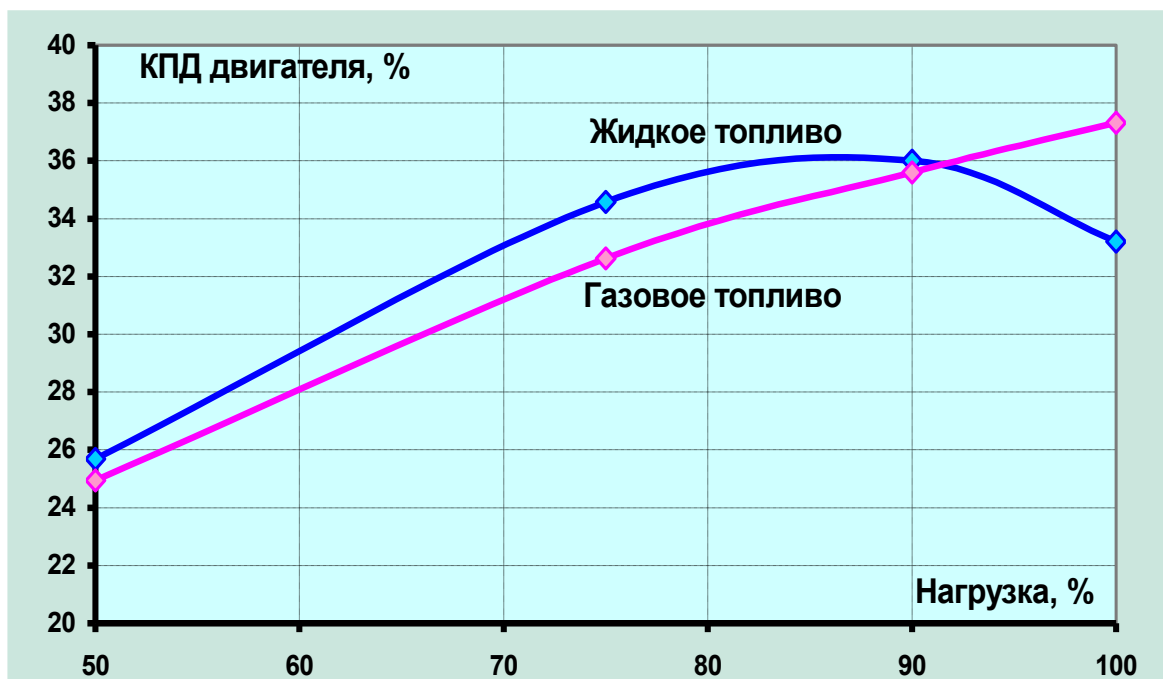


Рис. 12. Соотношение КПД двигателей на жидком и газообразном топливе (усредненные данные по серии 379DF – 399DF Caterpillar) [5]

Б. Удельный весовой показатель ГПД несколько ниже, чем у соответствующих жидкотопливных и двухтопливных ДД. Объясняется это тем, что оборудование, обеспечивающее подачу газа в двигатель, значительно легче, чем комплекс агрегатов, связанных с хранением и подачей жидкого топлива.

В. Поведение аналогичного удельного весового показателя для электрогенераторов (в сборе с двигателем) приведено на рис.13. Сопоставление зависимостей на обоих графиках показывает, что большая часть веса электрогенератора связана с электрогенерирующим оборудованием, особенно это проявляется при мощности менее 1000 кВт. Следует также отметить, что суммарный вес ЭА сильно зависит от степени его автоматизации и объема поставки, и вызванные этим отклонения удельного весового показателя могут достигать 20–30%.

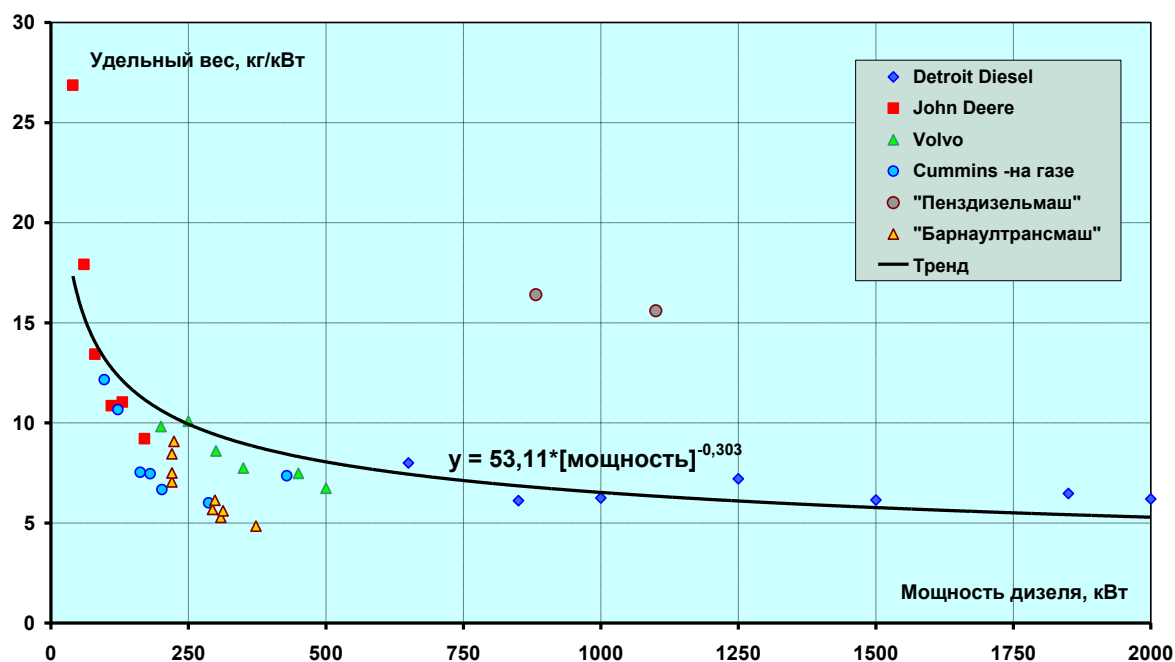


Рис. 13. Зависимость удельного весового показателя [кг/кВт] от единичной мощности двигателя [5]

Для иллюстрации на рис. 14 приведен тренд удельного весового показателя обычного ДД, а также показатели дизельного электрического генератора (ДЭГ) *Wartsila*, производящих электроэнергию и тепло.

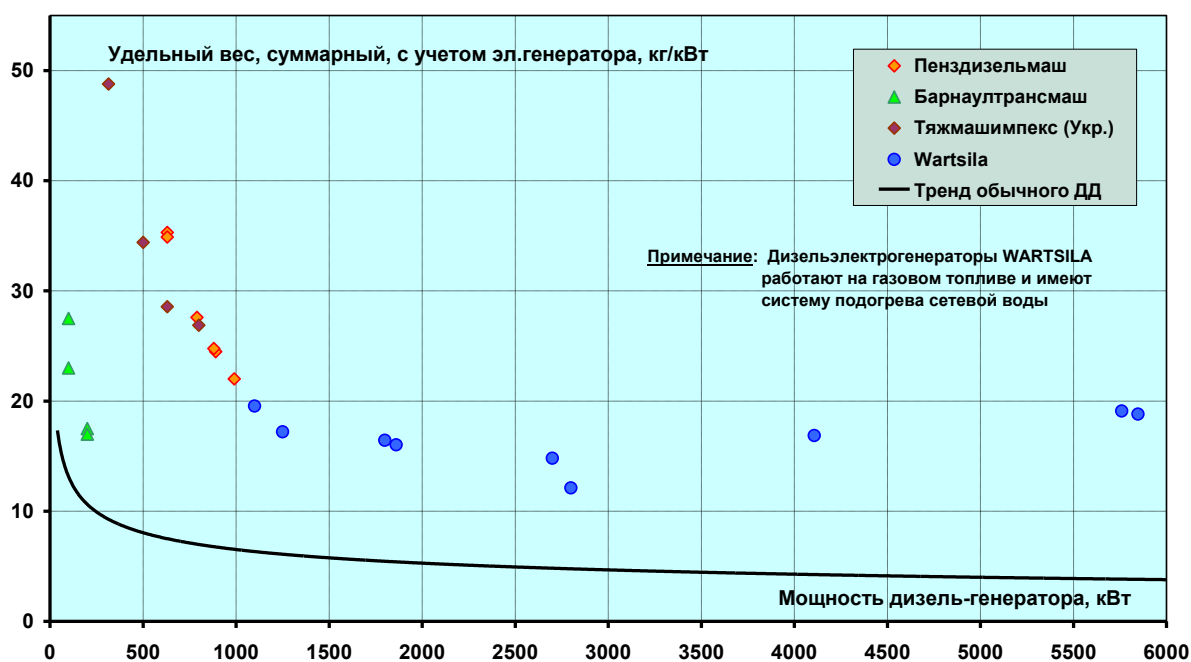


Рис. 14. Зависимость удельного весового показателя [кг/кВт] от единичной мощности двигателя для различных электрогенераторов [5]

2.5. Расход и качество смазочных масел в газопоршневых двигателях

Одной из особенностей ГПД и ДД является повышенная потребность в смазочном масле. По сравнению с альтернативными источниками энергии – газовыми и паровыми турбинами – удельный расход смазочного масла [г/кВт·ч] у ДД на порядок выше. Таким образом, проблема смазки

для ГПД и ДД превращается не только в техническую, но и в экономическую проблему.

Зависимость удельного расхода смазочного масла от мощности двигателя для широкого класса ДД и ГПД, приведены на рис. 15 в виде кривой, на которой также нанесены точки, характеризующие уровень удельного расхода смазочного масла для некоторых двигателей Российского производства.

В области мощностей 50–200 кВт расход масла может достигнуть 2,5–3 г/кВт·ч, что в стоимостном выражении составляет существенную долю в общих эксплуатационных затратах, особенно, если двигатель работает на дешевом газовом топливе.

Что касается требований к физико-техническим свойствам смазочных масел, то для различных типов ДД эти требования не являются специфическими; выбор типа масла диктуется, главным образом, текущей температурой окружающей среды. Зарубежные фирмы подходят к выбору смазочных масел более строго и предписывают применение только указанных для каждого конкретного двигателя сортов, что существенно удорожает стоимость эксплуатации энергетической установки.

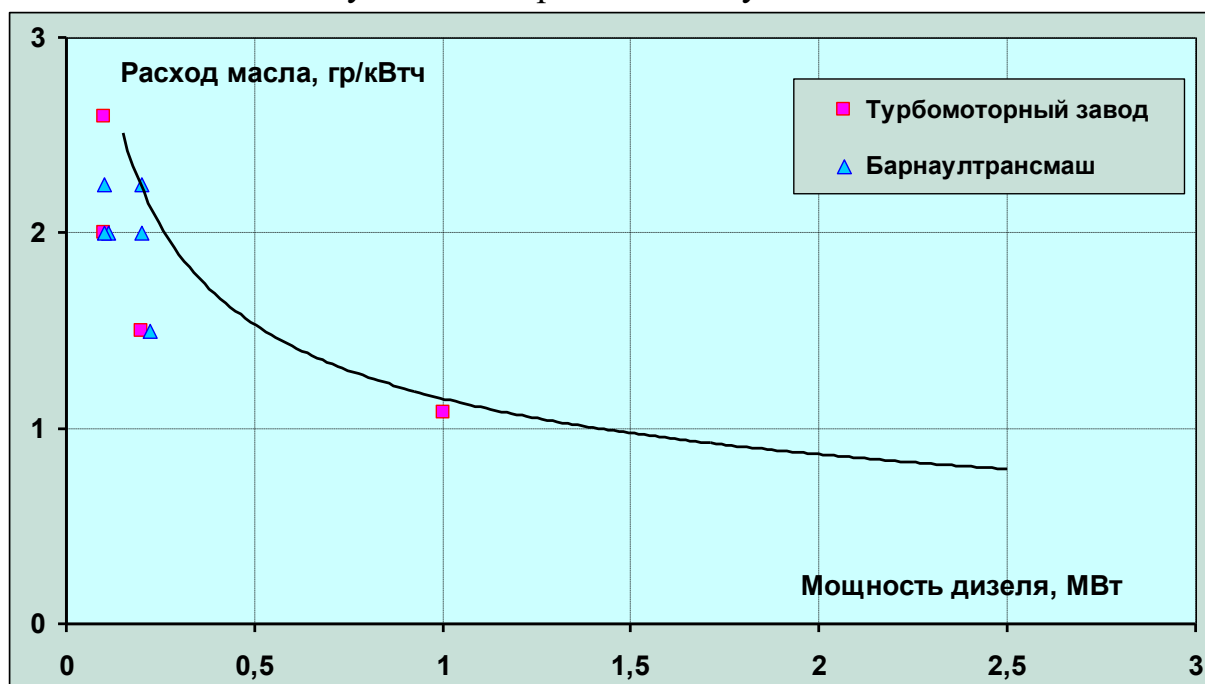


Рис. 15. Удельный расход смазочного масла в зависимости от мощности ДД и ГПД [5]

2.6. Экономические аспекты применения двухтопливных дизелей и газопоршневых двигателей

Один из главных факторов, ограничивающих применение обычных ДД, – высокая цена жидкого топлива. В современных условиях России эти ограничения проявляются особенно явно, поскольку внутренняя цена жидкого топлива достигает 75–90% от мирового уровня, в то время как стои-

мость ЭЭ – ниже. Это обстоятельство резко повышает конкурентоспособность альтернативных двигателей – двухтопливных дизелей и особенно ГПД.

В зависимости от местных условий России, отношение стоимости 1 кВт·ч ЭЭ, выработанной на ЭА на дизельном топливе и природном (магистральном) газе, составляет 10–30.

В этой ситуации для двух упомянутых типов двигателей на себестоимость энергии помимо эксплуатационных затрат, амортизационных и других отчислений, большое влияние оказывают стоимость дизельного топлива, используемого для инициализации процесса горения в двухтопливном дизеле, стоимость расходуемого смазочного масла (так называемый угар масла).

2.7. Производство тепла энергетическими установками на базе дизельных двигателей и газопоршневых двигателей

Энергетические установки на базе поршневых двигателей, работающих на природном газе или пропане являются на сегодня одними из наиболее эффективных инструментов для выработки ЭЭ, позволяющих попутно утилизировать и использовать тепло, выделяемое в двигателе внутреннего сгорания. Коэффициент использования теплотворной способности газового топлива в этих установках достигает 75–94%, а максимальное приближение их к объектам потребления выработанной энергии позволяет избежать потерь на транспортировке, что еще больше повышает эффективность таких установок.

Основные источники тепла в дизельном двигателе:

- тепло уходящих газов;
- отводимое в контуре охлаждения цилиндров двигателя;
- отводимое при охлаждении масла;
- отводимое от корпуса двигателя.

Обычно принимается следующее распределение энергии сгорания газа: 33–45% преобразуется в механическую работу (ЭЭ), до 39% отводится системой охлаждения двигателя, 30% уходит с выхлопными газами, 10–5% теряется в виде теплового излучения. Рис. 16 иллюстрирует возможную схему использования тепла энергетической установки на базе ГПД, работающего на природном газе или пропане.

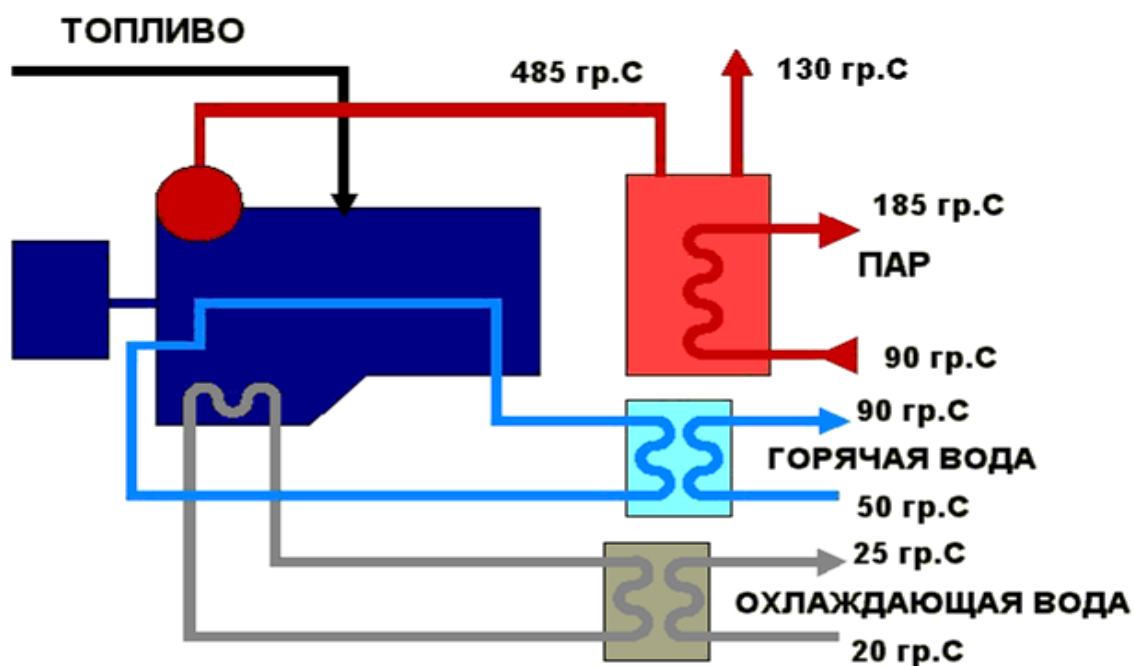


Рис. 16. Схема использования тепла энергетической установки на базе ГПД, работающего на природном газе или пропане

Тепло в контуре охлаждения цилиндров двигателя используется для нагрева сетевой воды в обычном для этих целей диапазоне температур; высокопотенциальное тепло уходящих газов – служит для генерации технологического пара (насыщенного и перегретого). Обычно, давление пара определяется потребностями производства и составляет 7–20 атм., однако, известны установки, где в теплообменниках поршневого двигателя генерируется пар до 70 атм.

3. Обзор основных отечественных производителей источников электроэнергии для работы в составе объектов распределенной генерации

3.1. Акционерное общество «Трансмашхолдинг»

АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ) является одной из крупнейших компаний в области транспортного машиностроения. Предприятия холдинга производят в большинстве подвижные составы, но также и дизель-генераторы. Одно из предприятий выпускает 2 типа ГПД.

Его структуру составляют: Коломенский завод, Брянский машиностроительный завод, Пензадизельмаш. Все они связаны с производством дизель-генераторов и газопоршневых установок помимо производства рельсового транспорта.

Коломенский завод из Московской области производит двухтопливные ЭС и когенерационные установки. Двухтопливные ЭС ОАО «Коломенский завод» выпускаются в трех модификациях: двухтопливные автономные ЭА: 1000 и 1650 кВт; двухтопливные блочно-транспортабельные ЭС: 1000 и 1500 кВт.

На этом заводе изготавливают многотопливные стационарные ЭА с необходимым оборудованием, предназначенные для выработки электрической и тепловой энергии с размещением в помещениях заказчика. ЭА способны работать автономно, параллельно с сетью и другими электростанциями.

В качестве топлива могут быть использованы природный, попутный нефтяной, биогаз, шахтный и генераторный газы, дизельное топливо или «сырая» нефть. ГПД обеспечивает автоматический переход на жидкое топливо при нарушениях в подаче газа без отключения нагрузки с сохранением электрических параметров.

Новые блочно-транспортабельные многотопливные ЭС серии ЭД-1000 предназначены для основного или резервного снабжения объектов общепромышленного или специального назначения, а также населенных пунктов электрической и тепловой энергией. В качестве силовых установок на ЭС применены многотопливные дизели типа Д49 (ЧН26/26) с газотурбинным наддувом, которые отличаются высокой степенью унификации, низкими удельными расходами топлива и масла, высокими показателями надежности и долговечности. Качество двигателей Д49 подтверждено российскими и международными сертификатами.

Эти ЭС обеспечивают устойчивую работу при температуре окружающего воздуха от +40 до -50°C; на высоте до 3000 м над уровнем моря, в условия снежных бурь и запыленности до 0,5 Г/м³. Они могут работать автономно, параллельно с сетью или с другими подобными станциями соизмеримой мощности.

Работа двухтопливных силовых агрегатов возможна: в газодизельном цикле, в котором основным топливом (85–90%) является газ, а в качестве запального (10–15%) используется дизельное топливо; в газонефтяном цикле, в котором основным топливом является (85–90%) газ, а в качестве запального (10–15%) используется «сырая» нефть.

Брянский машиностроительный завод производит только дизель-генераторы и в данном пособии не рассматривается.

В ОАО «Пензенский дизельный завод» с 2001 г. все проектные и экспериментальные работы по созданию ГПД ЭА прекращены и до сих пор не возобновляются.

Таким образом, предприятия АО «Трансмашхолдинг» производят агрегаты мощностью 1000, 1500 и 1650 кВт полностью из отечественных комплектующих, то есть локализацией производства составляет 100%.

3.2. Открытое акционерное общество «Барнаултрансмаш»

ОАО «Барнаултрансмаш» является одним из крупнейших производителей ДД и ГПД в России. Предприятие производит стационарные источники МТП мощностью 100, 200 и 250 кВт. МТП – это стационарный источник переменного 3-х фазного тока и тепловой энергии, используется в качестве основного и резервного источника энергии. Эта мини-ТЭЦ выпускается на базе автоматизированного ГПД ЭА. В качестве первичного

двигателя используется ГПД, работающий на газовом топливе с внешним смесеобразованием, электрическим (искровым) зажиганием. Система охлаждения агрегата жидкостная, циркуляционная под давлением с применением терморегуляторов, охлаждением воды и масла в радиаторах. Двигатель снабжен вентилятором, приводимым от коленчатого вала.

Все модификации мини-ТЭЦ имеют: автоматическое и ручное регулирование напряжения и частоты тока, автоматическое регулирование температуры охлаждающей жидкости, автоматическую подзарядку аккумуляторных батарей, автоматическую защиту силового генератора от короткого замыкания и перегрузки по току. Конструкция ЭА мини-ТЭЦ обеспечивает возможность параллельной работы с идентичными по характеристикам агрегатами и промышленной электросетью.

Предлагается два вида поставок, в зависимости от степени автоматизации:

«1» степень автоматизации: местное, ручное управление (пуск, останов, прием нагрузки), визуальный контроль параметров, аварийно-предупредительную сигнализацию по основным параметрам;

«2» степень автоматизации: автоматический пуск, включая пуск по исчезновению (падению) напряжения в контролируемой сети, автоматический прием нагрузки, автоматический контроль по параметрам – перегрев охлаждающей жидкости и масла, падение давления масла и разнос, а также индикацию состояния и визуальный контроль параметров агрегата. Имеется местное ручное управление. Основные технические характеристики ГПД МТП представлены в табл. 5.

Таблица 5

Основные технические характеристики ГПУ МТП

Наименование	Значение		
	МТП-100/150	МТП-200/300	МТП-315/400
Номинальная электрическая мощность, кВт	100	200	250
Номинальная тепловая мощность, кВт (Гкал/ч)	100 (0,12)	200 (0,23)	250 (0,29)
Основное топливо	Магистральный природный газ по ГОСТ 5542–87		
Часовой расход топлива не более, нм ³ /ч	35	70	80
Масса ЭА (без щита управления и УБ), кг	2800	4400	5000
Гарантийная наработка, час	6000	6000	4000
Назначенный ресурс до капитального ремонта, час	20000	20000	12000

3.3. Публичное акционерное общество «РУМО»

Согласно отчету, на 2005 г. это предприятие выпускало только установки номинальной мощностью 1000 кВт. В 2014 г. производство было остановлено, а в 2016 г. предприятие обанкротилось. Однако, в 2018 г. началось возрождение производства под новым юридическим лицом, быстро реструктуризировалось и уже к 2020 г. стало получать новые заказы.

В настоящее время предприятие активно развивается, ведутся работы над обновлением сайта компании в Интернете.

Согласно полученным данным, ПАО «РУМО» производит отечественные агрегаты номинальной мощностью 600, 800, 1000, 2500, 3350 кВт. Предлагается три типа исполнения: на раме, в кожухе или блочно-модульные. Представлены модели РУМО-402, 404, 421, 423. Изготовителем двигателя является само предприятие. Изготовитель генератора – НРО ЗАО «Электромаш». Изготовитель системы автоматизированного управления (САУ) – ПАО «РУМО». Таким образом, ЭА собирается полностью из комплектующих отечественного производства.

3.4. Акционерное общество «Волжский дизель им. Маминых»

Акционерное общество «Волжский дизель им. Маминых» (ВДМ) (АО «Волгодизельмаш») – одно из крупнейших отечественных предприятий, специализирующихся на производстве надежных дизельных агрегатов, которые имеют широкую сферу применения в промышленности. Завод ВДМ производит также и газопоршневое оборудование. ГПД ЭС от ВДМ имеет гибкие требования к топливу, экономична, проста в эксплуатации.

Это предприятие производит свои двигатели, генераторы же используются зарубежные. Используются также установки для переработки попутного нефтяного газа (ПНГ). С использованием этого оборудования утилизация ПНГ перестанет быть проблемой и принесет очевидную пользу: установка для переработки ПНГ позволит получить тепло и ЭЭ.

В табл. 6 представлены основные технические характеристики ГПД ЭС от данного предприятия.

Таблица 6

Основные технические характеристики производимых ВДМ ГПД ЭС

Наименование	Значение			
	ГЭ10	ГЭ20	ГЭ30	ГЭ50
Номинальная электрическая мощность, кВт	500	600	800	1000
Максимальная тепловая мощность системы утилизации тепла при работе двигатель-генератора при номинальной мощности	500	600	800	1000

Основное топливо	Топливный газ, согласованный с заводом-изготовителем ЭС			
Часовой расход топлива не более, $\text{нм}^3/\text{ч}$	150	168	240	280
Тип двигателя	4-х тактный, с рядным расположением цилиндров, водяного охлаждения с газотурбинным наддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, с искровым форкамерно-факельным зажиганием			
Гарантийная наработка, час	10000			
Назначенный ресурс до капитального ремонта, час	80000			

Важный параметр для расчета по методике – наброс нагрузки осуществляется в три ступени: 1 ступень 0–33% номинальной мощности, 2 ступень 33–66% номинальной мощности, 3 ступень 66–100% номинальной мощности.

3.5. Камский автомобильный завод (КАМАЗ), Ярославский моторный завод (ЯМЗ), Тутаевский моторный завод (ТМЗ)

ПАО «КАМАЗ» — советская, затем российская компания, производитель дизельных грузовых автомобилей и дизелей, действующий с 1976 г. Основное производство расположено в городе Набережные Челны.

ПАО «Автодизель», ЯМЗ — советское и российское машиностроительное предприятие в городе Ярославле. Выпускает дизельные двигатели.

Таблица 7

Номинальные мощности двигателей для ГПД ЭС от КАМАЗ, ЯМЗ, ТМЗ, кВт

Предприятие	КАМАЗ	ЯМЗ	ТМЗ
Номинальная мощность двигателя, кВт	100	60	200
	160	100	250
	200	150	500
	300	200	750
	400	315	1000
	600	350	—
	800	1050	-
	1000	—	—

ПАО «Тутаевский моторный завод» (ТМЗ) — российское машиностроительное предприятие в г. Тутаев, производитель дизелей.

Данные производители не изготавливают газопоршневые установки. Однако на базе их двигателей изготавливаются ГПД ЭС многими компаниями, среди которых ПК Рыбинсккомплекс, *Gazecos* и другие.

Номинальные мощности производимых двигателей представлены в табл. 7.

3.6. Открытое акционерное общество «Звезда-Энергетика»

ОАО «Звезда-Энергетика» является ведущей отечественной компанией, которая предлагает свои услуги по продаже и строительству ГПД ЭС, доля ОАО «Звезда-Энергетика» составляет 7,8%. Для сравнения - ОАО «РУМО» – 1,70% и АО «ВД им. Маминых» – 1,1%. Успех ОАО «Звезда-Энергетика» в конкурентной борьбе по сравнению с остальными российскими производителями вызван тем, что данная компания активно и успешно сотрудничает с ведущими иностранными изготовителями ГПД ЭС и отечественными потребителями (ОАО «Газпром», ОАО «НК «Башнефть» и т.д.), предлагая комплексные инженерные решения для ведущих отраслей экономики РФ.

ГПД ЭС ОАО «Звезда-Энергетика» используют следующие топливные газы:

- при отборе из магистральных газопроводов, после переработки природного газа на газоперерабатывающем заводе до требований согласно ГОСТ 5140–93 и ГОСТ 5542–87 с содержанием метана не менее 65%, отделением тяжелых фракций; теплотворной способностью не ниже 30 МДж, метановое число в пределах 52–98;
- природный газ, соответствующий по своему фракционному составу требованиям для применения в ГПД;
- попутный нефтяной газ, соответствующий по фракционному составу с метановым индексом до 42.

По найденной информации, компания использует только зарубежные двигатели и на их основе предлагает комплексное решение для строительства ГПД ЭС.

Из опросного листа на сайте компании [10] следует, что номинальный ряд представлен следующими номинальными мощностями ГПД: 68, 220, 315, 475, 800, 1160, 1370, 1540, 1750 кВт. Мощности указаны для установок на природном газе.

Номинальное напряжение 0,4; 6,3; 10,5 кВ. Но возможно выполнение других номинальных значений.

Базовая комплектация включает в себя ГПД, электрогенератор, панель управления, виброамортизаторы, системы управления и другое вспомогательное оборудование.

3.7. Общество с ограниченной ответственностью «НГ-Энерго»

Молодая российская компания, основанная в 2004 г., ведущая деятельность в проектировании, производстве, эксплуатации и поставках комплексов РГ.

Производитель заключил контракты с зарубежными поставщиками двигателей *Cummins*, *Hyundai* и *Jenbacher INNIO* и полностью полагается на их оборудование. Производитель генераторной установки – *Cummins*.

Производитель имеет широкий ряд номинальных мощностей ГПД ЭС: 330, 635, 851, 901, 1067, 1160, 1203, 1400, 1501, 2000, 2676, 2779, 3242, 3354, 3707, 4169, 4404, 5587, 6518, 7254, 8381, 9312, 10335, 11505, 18465 кВт. Данный производитель в основном сосредоточен на установках мощностью свыше 1 МВт.

3.8. Общество с ограниченной ответственностью «Кама-Энергетика»

ООО «КАМА-Энергетика» проектирует и производит ГПД ЭС на базе двигателей КАМАЗ, *MOTEURS BAUDOUIN*, *IVECO*, *MAN* и *LIEBHERR*, которые предназначены для одновременного снабжения потребителей электрической и тепловой энергией. Установки производятся как на базе отечественных двигателей (КАМАЗ), так и на базе зарубежных.

Номинальные мощности установок на базе КАМАЗ: 100, 160, 200, 300, 400, 600, 800, 1000 кВт.

Номинальные мощности на базе зарубежных первичных двигателей: 500, 700, 1400, 1500, 1700, 2000 кВт.

В представленном обзоре представлены наиболее крупные отечественные компании, охватывающие значительную часть российского рынка ГПД установок.

4. Анализ мощностного ряда источников электроэнергии, производимых отечественными предприятиями

Как можно видеть из предыдущей главы, у всех производителей разный подход к формированию структуры энергоцентров (ЭЦ) на базе дизельных и газотурбинных установок и оборудования для него. Условно можно разделить компании на 3 типа.

А. Полностью изготавливающие ЭА (включая двигатель и вспомогательное оборудование, в том числе генератор).

Б. Производящие только двигатели.

В. Использующие зарубежное оборудование (при этом стоит помнить, что есть такие компании, как ООО «КАМА-Энергетика», которые используют как отечественное, так и зарубежное оборудование, а также компании – «пекеджеры», выпускающие оборудование на базе двигателей и генераторов других компаний.

4.1. Производители электроагрегатов полностью или с преобладающим большинством отечественных комплектующих

Таковыми являются ПАО «РУМО», ПАО Холдинговая компания «Барнаултрансмаш» и АО «Трансмашхолдинг». Производители охватывают диапазон мощностей от 100 кВт до 3350 кВт.

На рис. 17 прослеживается отсутствие номинальных мощностей 300, 400, 500 кВт. В малом диапазоне это особенно критично, т.к. в РГ при автономном энергоснабжении надежность ЭЦ с набором агрегатов малой мощности выше, чем ЭЦ с малым количеством установок.

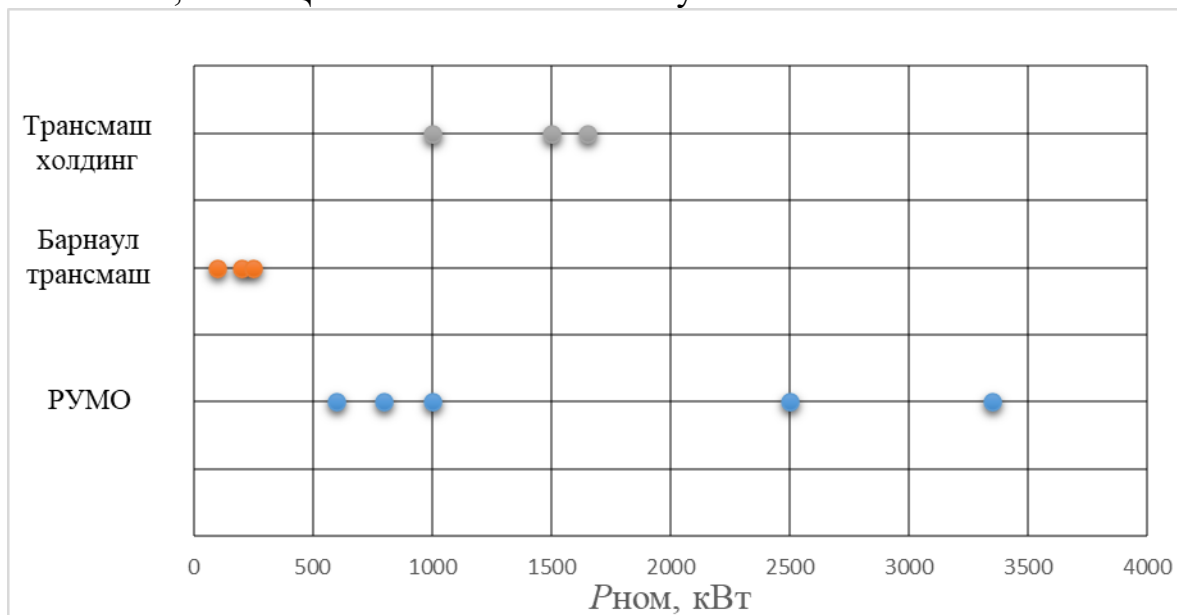


Рис. 17. Отечественные производители ГПД – полный агрегат

Помимо этого, наблюдается разрыв между номинальной мощностью от 1000 до 1500 кВт, от 1650 до 2500 кВт. Самой мощной установкой из полностью отечественного оборудования является агрегат от ПАО «РУМО» мощностью 3350 кВт. Но оно ниже в 6 раз по сравнению с самой мощной установкой от ООО «НГ-Энерго».

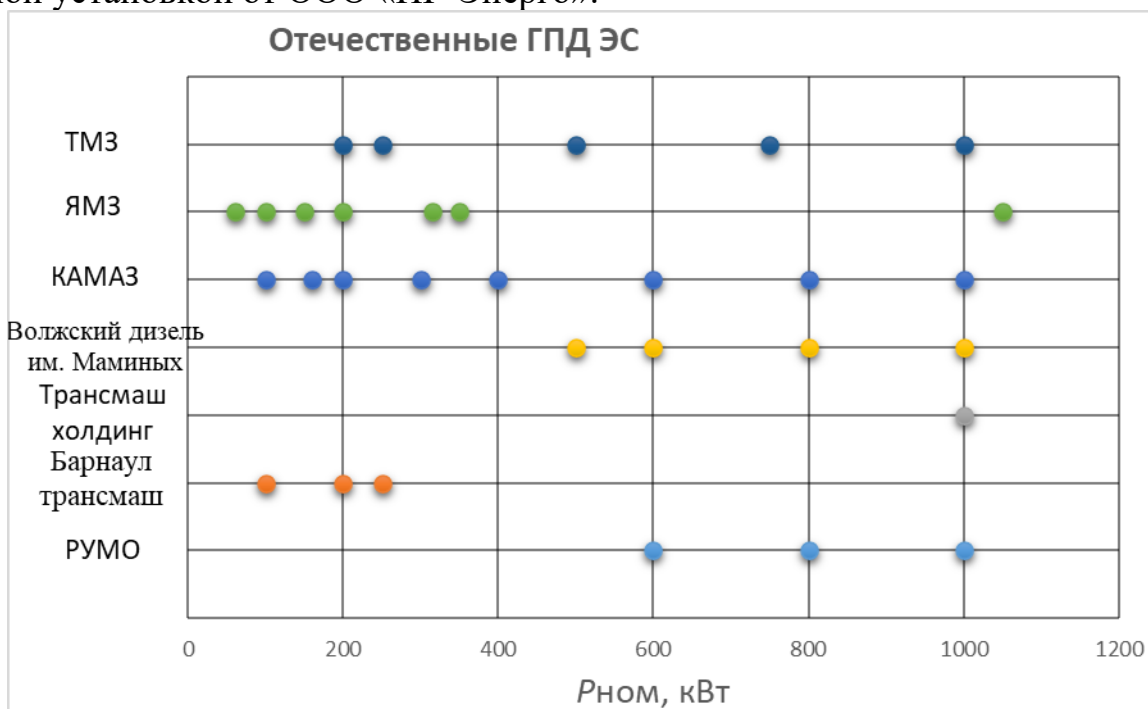


Рис. 18. Отечественные производители ГПД ЭА и отечественные производители двигателей

4.2. Производители отечественных двигателей

Компании КАМАЗ, ЯМЗ, ТМЗ Волжский дизель им. Маминых производят только двигатели. Однако на базе этих двигателей компании-поставщики (например, *Gazecos*) выпускают ГПДЭС уже «под ключ». Для наглядности граница проведена по номинальной мощности 1200 кВт, чтобы были видны «свободные зоны» между номинальным рядом мощностей. Таким образом на рис. 18 не отображены 2 агрегата РУМО мощностью 2500 и 3350 кВт, а также 2 агрегата Трансмашхолдинга мощностью 1500 и 1650 кВт.

4.3. Производители отечественных установок на базе зарубежных двигателей

ОАО «Звезда-Энергетика», ООО «Кама-Энергетика», ООО «НГ-Энерго» производят ГПДЭА на базе зарубежных двигателей. Так как ООО «НГ-Энерго» сосредоточены на производстве больших мощностей и выпускают установки номинальной мощности вплоть до 18465 кВт, целесообразно разделить рассматриваемые мощности на 2 типа: диапазон малой мощности и диапазон большой мощности. Проведем условную границу между двумя этими типами по мощности 1600 кВт и рассмотрим два диапазона отдельно. Полный перечень занимаемых номинальных мощностей для диапазона малой мощности отображен на рис. 19. Полный перечень занимаемых номинальных мощностей для диапазона большой мощности отображен на рис. 20.

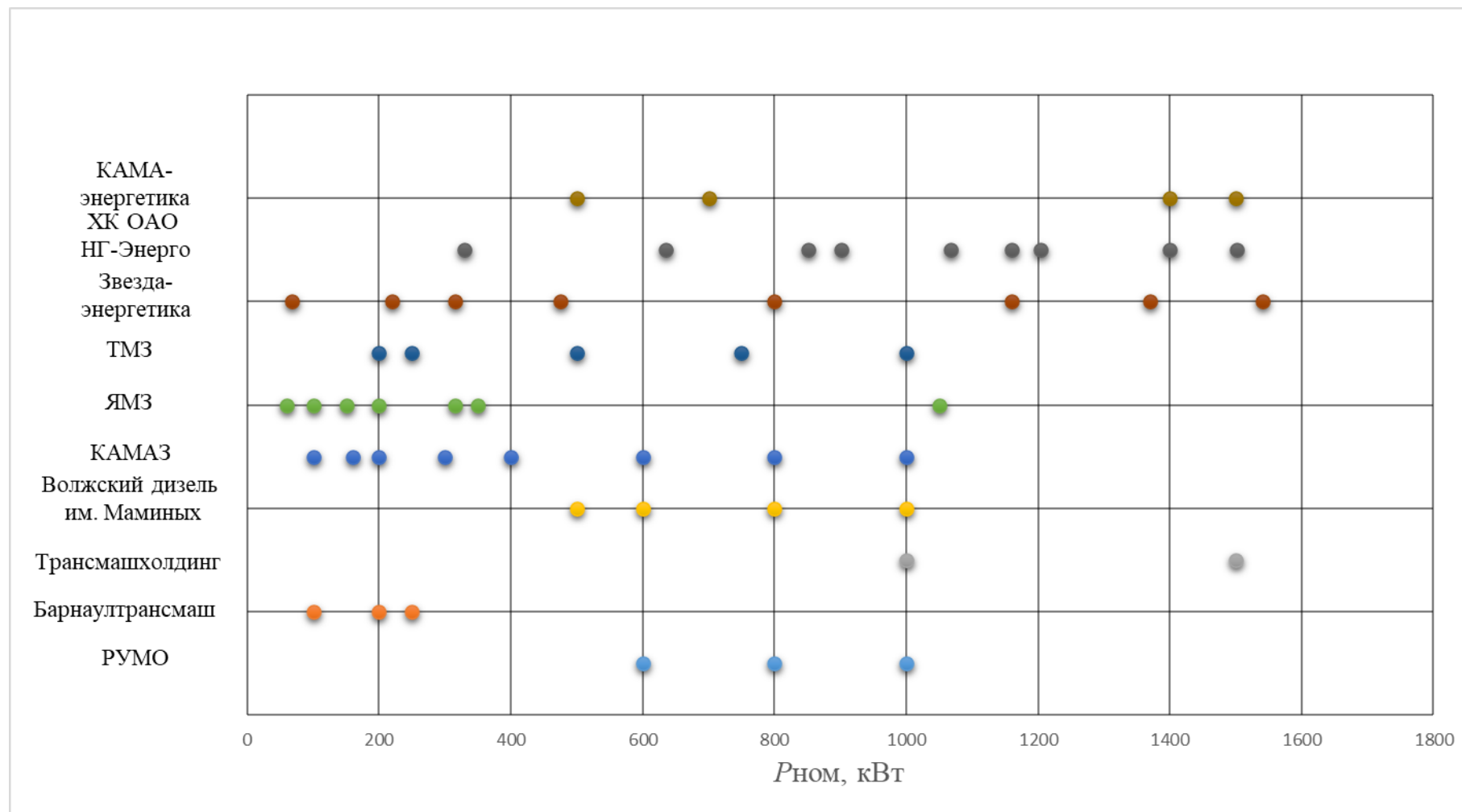


Рис. 19. Отечественные производители ГПД ЭС, отечественные производители ГПД ЭС на базе зарубежных двигателей в диапазоне малой мощности

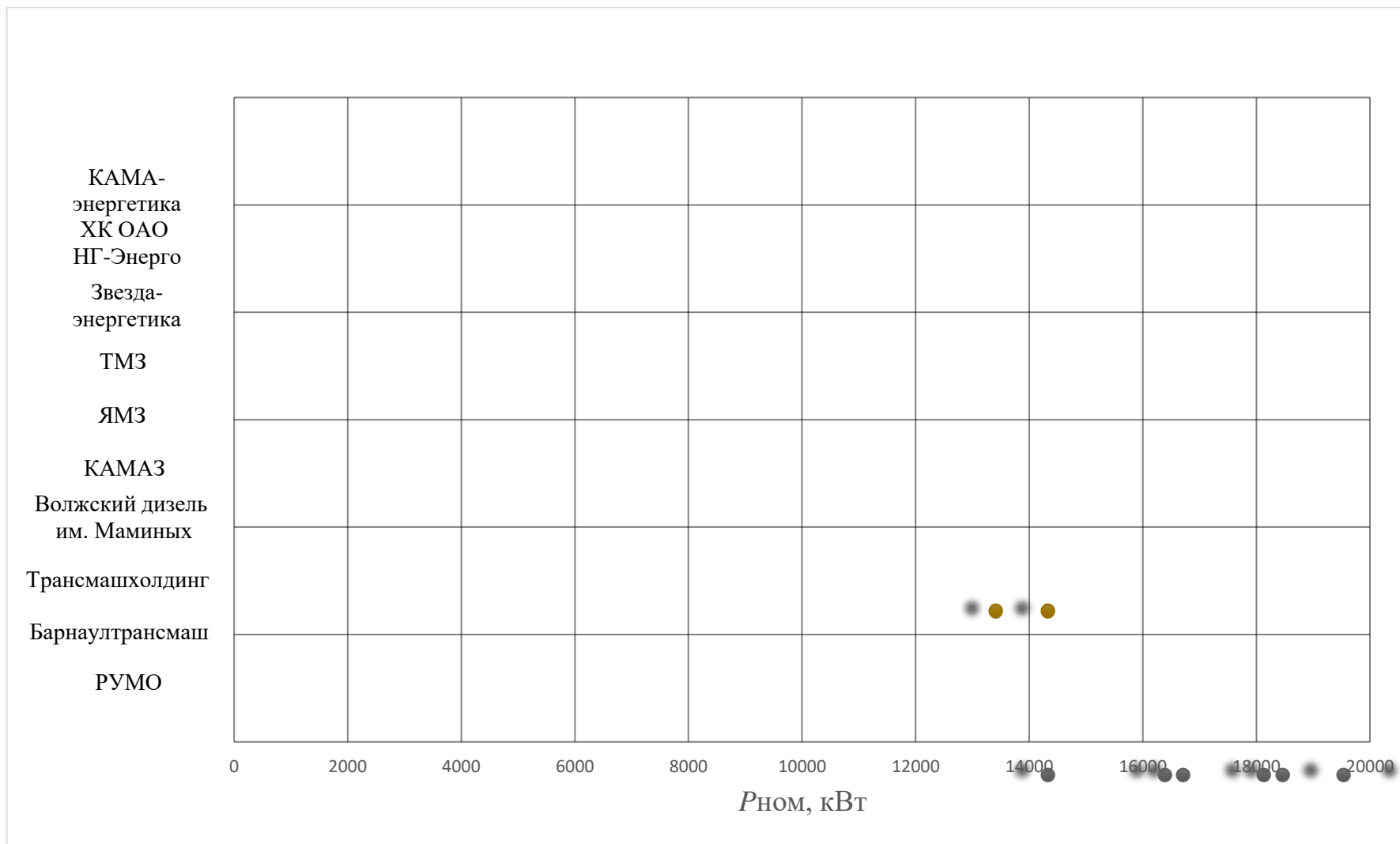


Рис. 20. Отечественные производители ГПД ЭС, отечественные производители ГПД ЭС на базе зарубежных двигателей в диапазоне большой мощности

Сведем данные о всех перечисленных производителях в табл. 8.

Таблица 8

Номинальные мощности крупнейших отечественных производителей ГПУ

	Наименование производителя									
	Полностью отечественный ЭА			Производители отечественных двигателей				Крупнейшие производители ГПД ЭС на базе зарубежных двигателей		
	РУМО	Барнаул-транс-маш	Транс-маш-холдинг	Волжский дизель им. Маминых	КА-МАЗ	ЯМЗ	ТМЗ	Звезда-Энергетика	НГ-Энерго	Камат-Энергетика *
Мощность агрегата, кВт	600	100	1000	500	100	60	200	68	330	500
	800	200	1500	600	160	100	250	220	635	700
	1000	250	1650	800	200	150	500	315	851	1400
	2500	—	—	1000	300	200	750	475	901	1500
	3350	—	—	—	400	315	1000	800	1067	1700
	—	—	—	—	600	350	—	1160	1160	2000
	—	—	—	—	800	1050	—	1370	1203	—
	—	—	—	—	1000	—	—	1540	1400	—
	—	—	—	—	—	—	—	1750	1501	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	2000	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	2676	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	2779	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	3242	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	3354	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	3707	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	4169	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	5587	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	6518	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	7254	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	8381	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	9312	—

	–	–	–	–	–	–	–	–	10335	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	11505	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	18465	–

* КАМА-энергетика производит ГПД ЭС как на базе отечественных, так и на базе зарубежных двигателей. В данной таблице указаны мощности зарубежных двигателей.

5. Методика выбора объектов генерации

5.1. Методика расчета номинальной мощности и количества

5.1.1. Анализ существующих методик

В настоящее время существует несколько источников, где представлены методики по выбору числа и мощности источников ЭЭ (газотурбинных, газопоршневых, дизельных ЭА и ЭС) в составе ЭЦ.

Проведем обзор существующих расчётов, выбрав наиболее полную и соответствующую современным условиям методику.

Одной из представленных в литературе методик является «Выбор генерирующего оборудования для объектов распределённой генерации» [8]. В представленной методике отображается единственное расчётное выражение по выбору количества ЭА

$$\text{Число ЭА} = \frac{\text{максимальная нагрузка}}{\text{един. мощность ЭА} \cdot \text{коэф. загрузки}}.$$

По сути своей это скорее набор рекомендаций по выбору максимальной мощности и количества ЭА.

Точная и полная методика, включающая набор формул, изложена в стандарте СТО 2-6.2-208-2008 «Выбор количества агрегатов ЭС РАО «Газпром» [12]. Однако, в ней не в полном объеме учтены различные режимы работы ЭЦ в условиях распределенной генерации:

- 1) пусковой ток мощных асинхронных двигателей;
- 2) ток намагничивания трансформаторов;
- 3) набросы нагрузки при срабатывании секционного выключателя и др.

В методике, разработанной в НИУ «МЭИ» были учтены эти особенности [7]. Методика учитывает такие режимы работы, как аварийная остановка одного источника, наброс пиковой нагрузки, режим минимальных нагрузок, работа параллельно с внешней энергосистемой. При этом обеспечивается требуемая надежность электроснабжения потребителей, сводится к минимуму недоотпуск ЭЭ, снижается негативное влияние аварийных режимов работы объектов собственной генерации на работу внешней энергосистемы.

5.1.2. Расчета числа и мощности электроагрегатов, с учетом особенностей режимов работы распределенной генерации

Для расчета необходимы данные, которые нужно запросить у потребителя ЭЭ и производителя источника ЭЭ (далее – ИЭЭ). Основными данными, запрашиваемыми у потребителя ЭЭ являются: номинальная мощность электроприемников; график работы оборудования; перечень электроприемников; требуемая категория надежности и др. Производитель ИЭЭ должен представить: допустимый наброс нагрузки; минимально допустимая нагрузка; допустимая пиковая нагрузка; максимальная длительно допустимая нагрузка; удельный расход топлива и др.

Также, при подключении ЭЦ к внешней сети, необходимо знать ее ограничения по отпуску ЭЭ.

Перед расчетом количества и мощности агрегатов, необходимо знать расчетную нагрузку потребителей. Также необходимо знать пиковую мощность, учитывающую наличие потребителей с большим пусковым током.

Число одновременно работающих в нормальном режиме однотипных ЭА вычисляют по формуле

$$N_{\text{раб(н.р)}}^{\text{ИЭЭ}} \geq \frac{P_{\text{расч}}^{\text{п}}}{P_{\text{ном}}^{\text{ИЭЭ}} \cdot k_{\text{зг}}},$$

где $k_{\text{зг}}$ – заданный коэффициент загрузки генераторов, учитывающий необходимость резерва мощности для покрытия нерегулярных отклонений нагрузки (см. табл. X); $P_{\text{ном}}^{\text{ИЭЭ}}$ – номинальная мощность генераторов.

Таблица 9

Оптимальные уровни загрузки ЭА собственных нужд ЭС

Количество параллельно работающих агрегатов	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оптимальный уровень загрузки ЭА ($k_{\text{зг}}$)	0,5	0,67	0,75	0,8	0,83	0,857	0,875	0,89	0,9

В общем случае номинальная мощность агрегатов выбирается из расчета $(0,2 \dots 0,5)P_{\text{расч}}^{\text{п}}$, где меньшее значение используется для автономных систем, а большее – для систем, работающих параллельно с внешней энергосистемой.

Таким образом, можно определить зависимость мощности единичного источника ЭЭ от мощности ЭЦ. Соответствующие зависимости представлены на рис. 21 и рис. 22.

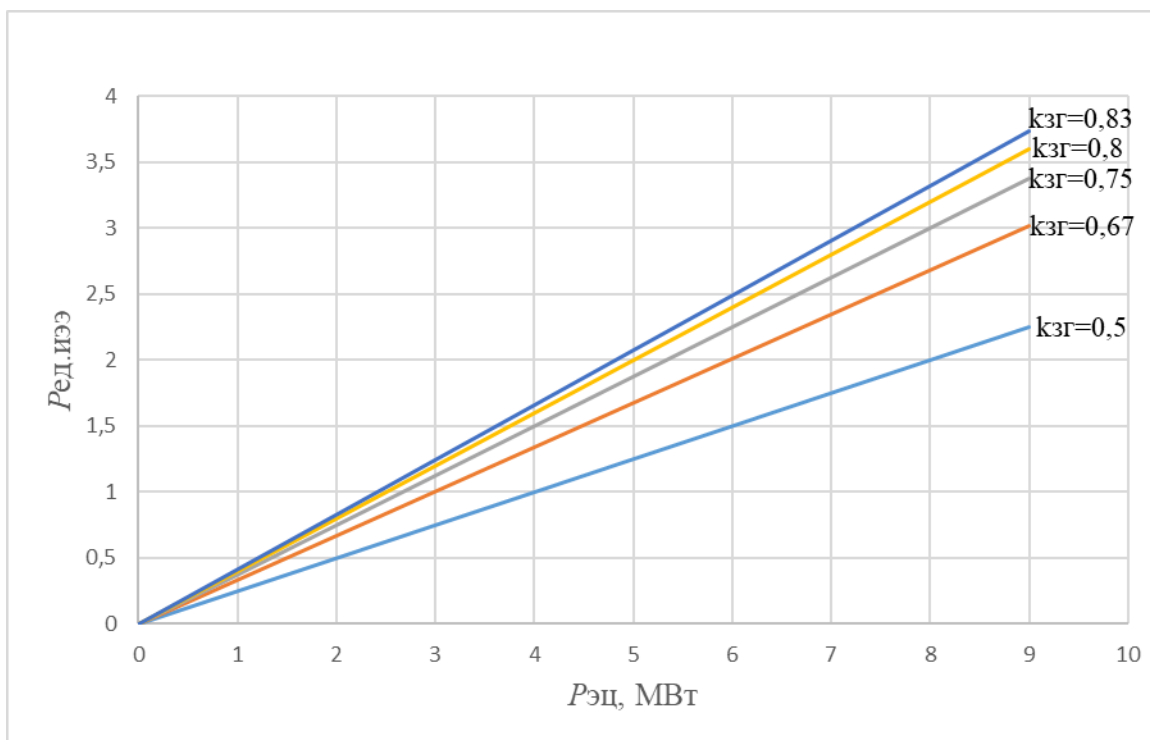


Рис. 21. Предварительный выбор мощности единичного ИЭЭ при параллельной работе с сетью

Вышеописанные расчеты справедливы для предварительного расчета числа и мощности генерирующих установок в ЭЦ с РГ. Более подробные точные расчеты, которые необходимо провести при проектировании ЭУ с учетом допустимого наброса нагрузки и других факторов, указаны в [8].

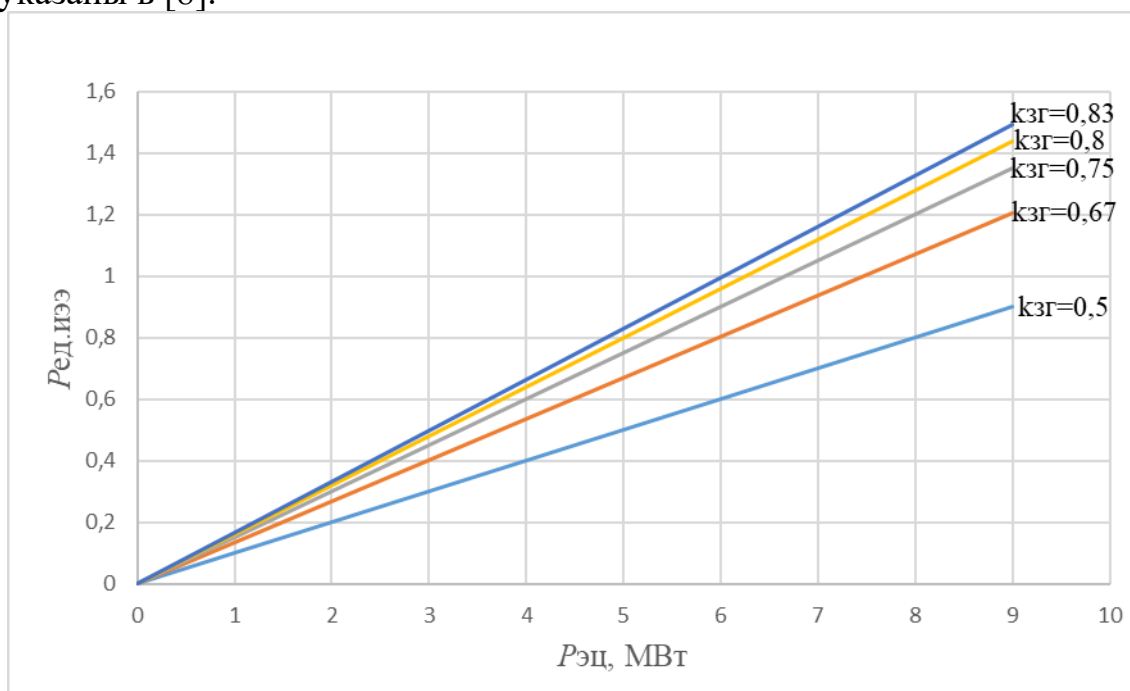


Рис. 22. Предварительный выбор мощности единичного ИЭЭ при автономной работе с сетью

5.2. Допустимое шумовое загрязнение

При решении выбора источника энергии необходимо учитывать не только экономические, но и экологические последствия возможного влияния объектов энергетики при строительстве и эксплуатации. При эксплуатации ЭЦ происходит воздействие на окружающую природную среду:

- потребление органических ресурсов (вода, топливо, воздух);
- загрязнение атмосферы продуктами сгорания топлива;
- физическое воздействие (тепловое загрязнение, электромагнитное загрязнение, вибрация, шум);
- загрязнение почвы отходами; изменение ландшафта;
- отчуждение территорий для строительства ЭЦ и дорог.

Таким образом, при эксплуатации ЭС происходит не только загрязнение атмосферного воздуха продуктами сгорания топлива и тепловыми излучениями, но и акустическое загрязнение окружающей среды. Интенсивное шумовое воздействие на организм человека неблагоприятно влияет на нервную деятельность, способствует развитию утомления, изменениям в сердечно-сосудистой системе и появлению шумовой патологии, среди многообразных проявлений которой ведущим клиническим признаком является медленно прогрессирующее снижение слуха.

Источниками шума в ЭЦ являются двигатели, насосы, компрессоры, приточно-вытяжная вентиляция, механические вибрации. Двигатели создают шум, который вызывается механическими вибрациями, работой систем охлаждения и выхлопов.

Для оценки шумового воздействия ЭС необходимо произвести расчет уровня звукового давления на территории, прилегающей к зданию. Допустимые уровни шумового воздействия регламентируются ГОСТ 31295.2-2005 / ИСО 9613-2:1996 и СНиП 23-03-2003.

Расчет шума выполняется в соответствии со СНиП 23.03.2003 «Защита от шума» [13]. Для начала производят акустический расчет звукового давления L , дБ, для одного или нескольких источников шума

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^m \frac{10^{0,1L_{wi}} \cdot \kappa_i \Phi_i}{\Omega \cdot r_i^2} + \frac{4}{k_B} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{wi}} \right),$$

где L_w – октавный уровень звуковой мощности, дБА; κ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля; Φ – фактор направленности источника шума; Ω – пространственный угол излучения источника; r – расстояние от акустического центра источника шума до расчетной точки, м; k – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении; B – акустическая постоянная помещения, м².

В свою очередь, акустическая постоянная помещения определяется как

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{cp}},$$

где $\alpha_{\text{ср}}$ – средний коэффициент звукопоглощения; A – эквивалентная площадь звукопоглощения, м^2 .

При этом эквивалентная площадь звукопоглощения

$$A = \alpha_i \cdot S_i,$$

где α_i – коэффициент звукопоглощения i – й поверхности; S_i – площадь i – й поверхности, м^2 .

Затем определяется уровень звуковой мощности шума $L_w^{\text{пр}}$, дБ, прошедшей через ограждение на территорию, рассчитывается по формуле

$$L = L_w - \lg B - 10 \lg K + \lg S - R,$$

где L_{wi} – уровень звуковой мощности источника, дБА; B – акустическая постоянная помещения с источником (источниками) шума, м^2 ; K – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении; S – площадь ограждения, м^2 ; R – изоляция воздушного шума ограждением, дБА.

Если ограждающая конструкция состоит из двух частей с различной звукоизоляцией ($R_1 > R_2$), R определяют по формуле

$$R = R_1 - 10 \lg \frac{\frac{S_1}{S_2} + 10^{0,1(R_1 - R_2)}}{1 + \frac{S_1}{S_2}},$$

где S_i – площадь i – й части, м^2 ; R_i – изоляция воздушного шума i – й частью, дБ.

Для расчета, в общем случае, принимают следующие значения: $\Phi = 1$ (для источников с равномерным излучением), $\Omega = 2\pi$ рад (для источника шума, находящегося на полу), $k = 1,25$, $\alpha_{\text{ср}} = 0,15$, $R = 47$ дБА (для стены), $R = 22$ дБА (для металлических ворот), $R = 31,9$ дБА (для стены с воротами для газотурбинных двигателей), $R = 30,7$ дБА (для стены с воротами для газопоршневых и дизельных двигателей) [13].

Расчетное значение уровня шума сравнивается с допустимым уровнем шума на территории согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Кроме того, необходимо рассчитать санитарно-защитную зону (радиус), при которой будут достигаться допустимые уровни шумового воздействия.

Таблица 10

Показатели уровня шума различных установок [14]

Показатель	ГТУ	ПТУ	ПГУ	ГПУ	МТУ
Уровень шума, Дб	65–85	70-80	75-85	80-90	60

6. Анализ отечественных производителей полного агрегата и двигателей для покрытия нагрузок энергоцентров различной мощности

Принимая во внимание изложенное в предыдущих разделах, становится возможным провести анализ о способности отечественных агрегатов обеспечить нагрузки ЭЦ различной мощности для режимов работы параллельно сети и автономно. Для этого обратимся к рис. 21 и 22, а также к табл. 8. Рассмотрим крайние случаи – с минимальной загрузкой агрегата ($k_{зг} = 0,5$) и с максимальной загрузкой ($k_{зг} = 0,9$), оценив таким образом диапазон мощностей ЭЦ, который может обеспечить газопоршневой агрегат согласно формуле

$$N_{\text{раб(н.р)}}^{\text{ИЭЭ}} \geq \frac{P_{\text{расч}}^{\text{п}}}{P_{\text{ном}}^{\text{ИЭЭ}} \cdot k_{зг}}.$$

На рис. 23 и 24 на оси абсцисс указана мощность ЭЦ в МВт, по оси ординат указывается мощность агрегата согласно представленной в данной главе номенклатуре. От мощности агрегата откладывается прямая до пересечения с кривыми, характеризующими степень загрузки агрегата. Затем, проводя вниз от точек пересечения прямые до оси абсцисс, получаем диапазон мощности, который может быть покрыт отечественным агрегатом или двигателем.

Красным обозначены диапазоны, которые перекрываются производителями полного агрегата (ПАО «РУМО», АО «Трансмашхолдинг», ОАО «Барнаултрансмаш»). Синим – диапазоны, покрываемые производителями двигателей (АО «Волжский дизель им. Маминых», ПАО «Автодизель» ЯМЗ, ПАО «ТМЗ», ПАО «КАМАЗ»).

Дадим также обозначения сокращений: БТМ – ОАО «Барнаултрансмаш», ТМХ – АО «Трансмашхолдинг», ВДМ – АО «Волжский дизель им. Маминых»).

Отечественные производители полного агрегата и производители двигателей

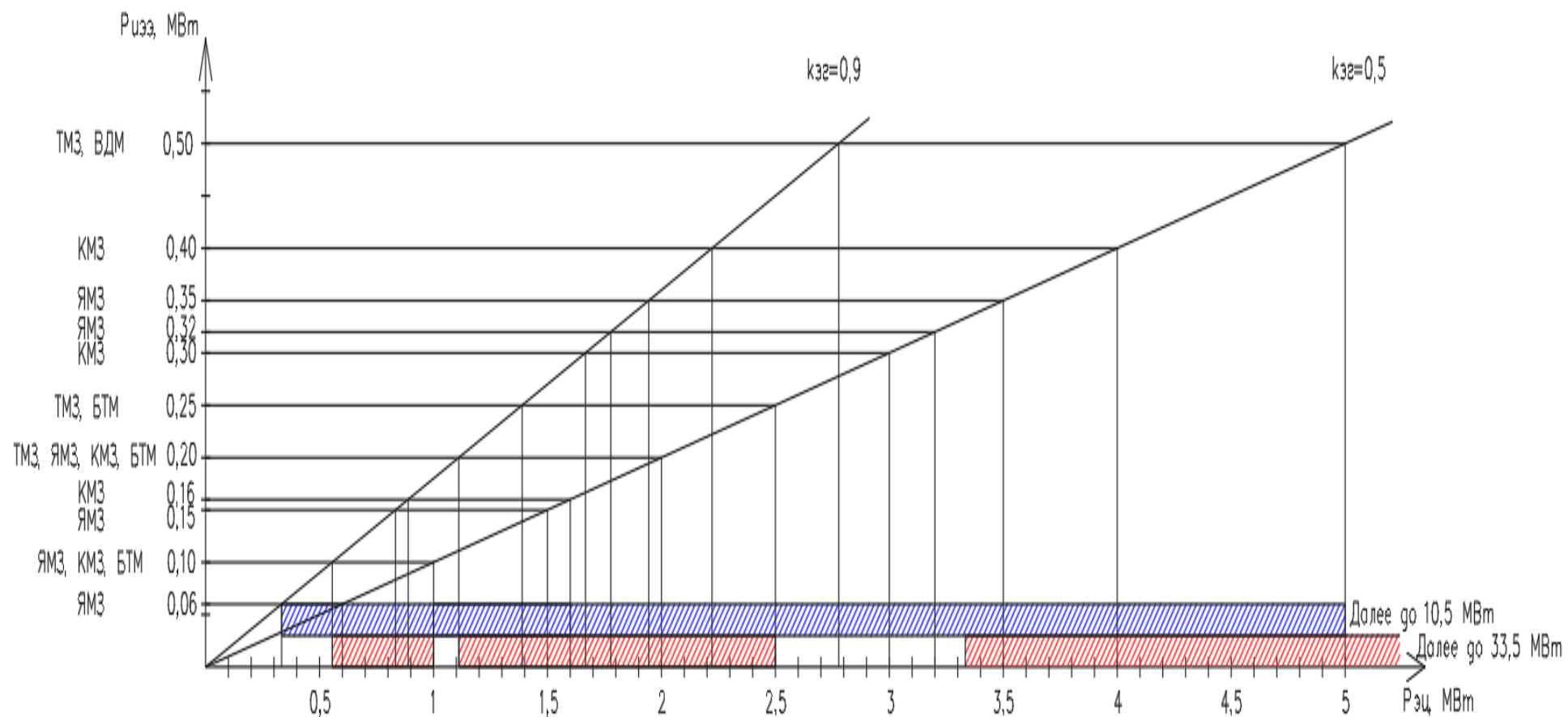


Рис. 23. Диапазоны, покрываемые производителями полного агрегата и производителями двигателей в случае автономной работы ЭЦ

Отечественные производители полного агрегата и производители двигателей

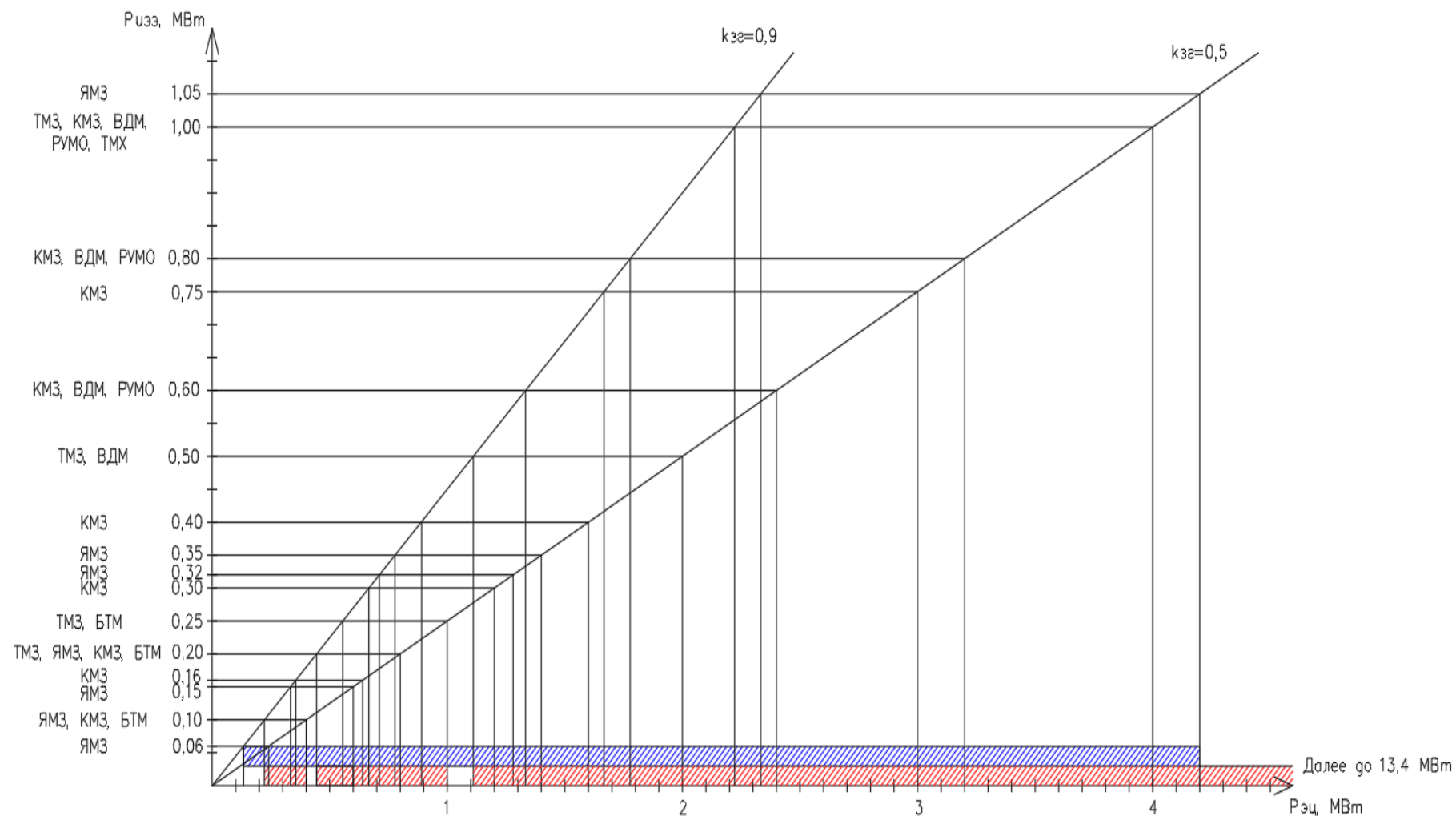


Рис. 24. Диапазоны, покрываемые производителями полного агрегата и производителями двигателей в случае параллельной работы ЭЦ

Анализ представленных выше зависимостей, позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимальная мощность ЭЦ, которую исходя из существующих рекомендаций [10] возможно покрыть отечественным ГПУ – 33,5 МВт.

2. В случае рассмотрения только производителей полного агрегата наблюдаются незначительные непокрытые зоны (от 0 до 0,22, от 0,40 до 0,44 и от 1,00 до 1,11 МВт для случая параллельной работы, а также от 0 до 0,56, от 1,00 до 1,11 и от 2,50 до 3,33 МВт для случая автономной работы). Данные пробелы, тем не менее, покрываются производителями двигателей для ЭА с комплектацией их импортным генератором.

3. В случае рассмотрения также производителей двигателей, покрываются все недостающие зоны, кроме зоны малых мощностей от 0 до 0,133 МВт для случая параллельной работы и зоны от 0 до 0,33 МВт для случая автономной работы агрегатов. В настоящее время отечественными производителями уже сделаны первые шаги для решения этой задачи. Так ПК «Рыбинсккомплекс» доработал для работы на газе дизельный двигатель Д-246.1 Минского моторного завода (ММЗ) номинальной мощностью 42 кВт, устанавливаемый на ЭА мощностью 30 кВт.

7. Выводы

Большинство отечественных установок имеют мощность до 1000 кВт. Существуют значительные разрывы в номинальной мощности, особенно для полностью отечественных производителей.

В целом отечественная промышленность позволяет обеспечить потребности ЭЦ с применением газопоршневых установок в полном объеме в диапазоне мощностей от 133 кВт до 33,5 МВт. Для более энергоемких потребителей также существуют решения с применением газопоршневых установок на базе зарубежных двигателей от отечественных компаний (ОАО «Звезда-энергетика», ООО «НГ-Энерго» и др.). В больших диапазонах мощностей целесообразно использовать газотурбинные установки (ГТУ). Мощности ГТУ отечественного производства начинаются с 2,5 МВт.

Значительная доля отечественных компаний находится на пути устойчивого развития. Представленный ассортимент ИЭЭ позволяет эффективно комплектовать как полностью автономные ЭЦ, так и ЭЦ, работающие параллельно с сетью. На данный момент ведутся работы по расширению мощностного ряда, поскольку представляется перспективным и востребованным повышение концентрации представленных мощностей в диапазоне установленной электрической мощности свыше 1 МВт.

Идут работы по импортозамещению иностранного оборудования в составе вышеописанных энергоустановок.

Иностранные компании имеют большой опыт производства генерирующего оборудования в рыночных условиях, однако отечественные производители со временем обеспечивают всё большую эксплуатационную гиб-

кость при реализации проекта. Также, отечественные производители обеспечивают всё большую эффективность маркетинговых стратегий, и предоставляют возрастающий уровень качества инжиниринговых услуг; уделяют большое внимание информационному освещению своей деятельности, повышая тем самым узнаваемость бренда [14]. Бесспорным преимуществом отечественных производителей по сравнению с иностранными производителями является итоговая более низкая стоимость ввода генерирующего центра в эксплуатацию и тот факт, что многие зарубежные производители могут осуществлять капитальный ремонт и ряд сервисных услуг только в своих странах, а не на месте непосредственной эксплуатации ЭА.

8. Заключение

Данное учебное пособие было создано на основе обработки большого числа публикаций и справочных источников (список приведен ниже). Оно может быть использовано при выполнении расчетных заданий, курсовых работ и проектов, где применяются объекты с распределенной генерацией для дисциплин "Системы электроснабжения с распределенной генерацией" и "Изолированные энергосистемы и распределенная генерация".

Список рекомендованной литературы

Основной

1. ГОСТ 23377–84. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Переиздание с изменением № 1, утвержденным в октябре 1989 г. (ИУС 1-90).
2. ГОСТ 33115–2014. Установки электрогенераторные с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия. Дата введения 2016-06-01.
3. ГОСТ 23162–2014. Установки электрогенераторные с двигателями внутреннего сгорания. Система условных обозначений. Дата введения 2016-06-01.

Дополнительный

4. Об опыте эксплуатации газопоршневых мини-ТЭЦ в ОАО Башкирэнерго / А.А. Салихов, Р. М. Фаткуллин, Р.Р. Абдрахманов и др. // Электрические станции. – № 11. – 2003. – С. 6 – 15.
5. Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей. Часть 1: Энергетические газотурбинные установки / В.Г. Семенов, В.С. Дубенец, Г.Г. Ольховский и др. – М., – 2004.
6. Выбор генерирующего оборудования для объектов распределённой генерации / И.Б. Артемьев, А.М. Синельников // Турбины и Дизели. – 2015. – Март – апрель. – С. 10 – 13.
7. Выбор числа и мощности генерирующего оборудования энергоцентров в автономных системах электроснабжения и в системах с распределённой генерацией / Д.Н. Удинцев, Г.В. Шведов, М.Е. Шошин // Энергетик. – 2020. – №2.
8. Выбор установленной мощности перспективного источника электрической энергии в условиях изолированных энергосистем. / М.В. Бурмейстер, М.А. Еремеев, Р.В. Булатов // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – №1.

Рекомендуемый

9. Устройство и принцип работы дизельного генератора. [Электронный ресурс] <https://vinur.com.ua/aboutus/usefull-info/articles/416-ustrojstvo-i-printsip-raboty-dizelnogo-generatora>
10. Интернет - страница компании «Звезда – энергетика». [Электронный ресурс]. <https://www.energostar.com/feedback/online-ordering.php>. [7]
11. Мини-ТЭЦ с котельной без иллюзий. [Электронный ресурс] URL: <https://meteoenergetic.ru/mini-tec-s-kotelnoy>
12. Выбор количества электроагрегатов электростанций ОАО «Газпром»: СТО 2-6.2-208-2008. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2008.

13. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Защита от шума. Раздел 7. Дата введения 2004-01-01.
14. Анализ российского рынка когенерационных технологий на базе газопоршневых установок. / Л.И. Алексахина, Д.С. Курочкин, Д.В. Михеев, И.С. Шабалин // Transport business in Russia. – 2013. – №6.

Учебное электронное издание

Удинцев Дмитрий Николаевич
Шульженко Сергей Витальевич
Кузнецов Олег Николаевич
Самойлов Андрей Александрович
Еремеев Михаил Анатольевич

**ДИЗЕЛЬНЫЕ И ГАЗОПОРШНЕВЫЕ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТЫ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ
ГЕНЕРАЦИИ**

Учебное пособие

Для организации дистанционного тестирования необходимо подключение ЭВМ к сети Интернет.

Редактор Т.А. Феоктистова

Дата подписания – 09.02.2023

Объем издания – 3 Мбайт

Тираж – 10 электронных оптических дисков DVD-R

Использовать программы, которые работают с форматом pdf

Издательство МЭИ
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14. стр.1
izdatmpei@gmail.com