

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

для труднодоступных районов на основе инновационных паровых турбогенераторов

НЫНЕШНИЕ ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ МОДЕЛЬНЫХ РЯДОВ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК (МИНИ-ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ) МОДУЛЬНОГО ТИПА, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ И РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ С ЦЕЛЬЮ ШИРОКОГО РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ (СОГЛАСНО СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СТРАТЕГИИ) ПОКАЗЫВАЕТ ОЧЕВИДНЫЙ ПЕРЕКОС В СТОРОНУ ИМПОРТНЫХ УСТАНОВОК (США, ЕВРОСОЮЗ), ОСОБЕННО В ПОСЛЕДНИЕ 5 ЛЕТ. В СТАТЬЕ РАССМОТРЕНЫ ПРЕИМУЩЕСТВА И ВОЗМОЖНОСТИ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ, РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ДЛЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНОВ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННЫХ ПАРОВЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, РАЗРАБОТАННОЙ УЧЕНЫМИ НИУ «МЭИ»

УДК 621.1

KEY WORDS: *distributed generation, cogeneration, electricity, steam turbogenerator.*

**Серков С.А.,
Грибин В.Г.,
Румянцев М.Ю.,
Сигачев С.И.,
Грузков С.А.,
НИУ «Московский
энергетический институт»**

Опыт работы в рамках Энергетической стратегии России (далее «стратегия») /1/ показал, что до сих пор не создано производство отечественных автономных энергетических установок распределенной энергетики мощностью от 10 кВт до 60–70 МВт модульного типа. Стратегия ставит целью «максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций». Особую важность стратегия приобретает в настоящее время, когда ряд стран осуществляет жесткую политику санкций в отношении нашей страны. Акценты в научно-технической деятельности в энергетике смещаются в сторону инноваций, импортозамещения и кокурентоспособности отечественных разработок по сравнению с лучшими мировыми образцами. Среди основных проблем в сфере энергетической безопасности в /1/ называется «слабое развитие энергетической инфраструктуры в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке». Среди мер по достижению энергетической безопасности называются обеспечение гарантированности и надежности энергообеспечения экономики и населения страны в полном объеме в обычных условиях и в минимально необходимом

объеме при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций различного характера в частности, за счет создания системы резервов ресурсов и оборудования.

В числе прочих ставится задача развития мини-ТЭЦ распределенной генерации. Рассмотрение существующих тенденций развития модельных рядов когенерационных установок (мини-теплоэлектроцентралей) модульного типа, устанавливаемых и разрабатываемых с целью широкого развития распределенной генерации (согласно существующей стратегии) показывает очевидный перекос в сторону импортных установок (США, Евросоюз), особенно в последние 5 лет. Малая электроэнергетика России сегодня характеризуется следующими показателями /9/:

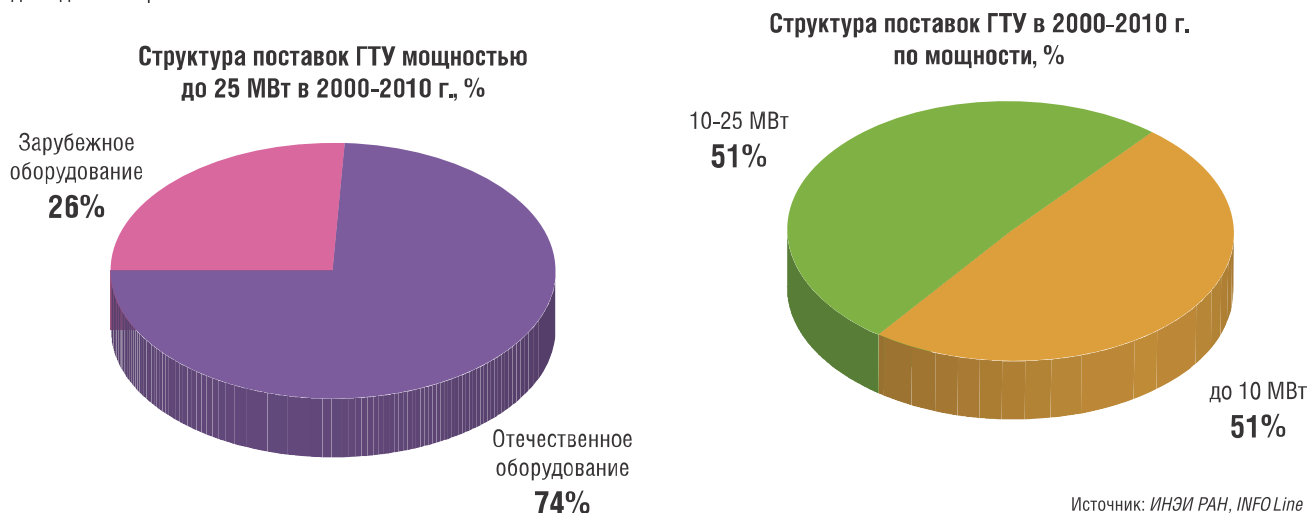
во-первых, в России размещено сегодня примерно 49000 электростанций (98,6% от их общего числа) общей мощностью 17 ГВт (8% от всей установленной мощности электростанций России), работающих как в энергосистемах, так и автономно (средняя установленная мощность – 0,36 МВт);

во-вторых, общая годовая выработка электроэнергии на этих электростанциях достигает 5% от выработки всех электростанций страны;

Основу таких установок составляют **газовые турбины**, в



РИС 1. Структура поставок энергооборудования малой мощности. Доля импортного оборудования из года в год повышалась до недавнего времени



меньшей степени – газопоршневые двигатели. То же относится к известным проектам и опытным установкам, разрабатываемым в России. У энергоустановок на базе поршневых ДВС, интервалы между техническим обслуживанием – 250–500 моточасов. Стоимость капитального ремонта достигает 70–100% от первоначальных затрат на приобретение. Текущий ремонт микротурбин Capstone (одна из ведущих фирм по производству микротурбин) осуществляется на месте установки через 8000 часов (один раз в год). Между тем, такая концепция приводит к очевидным недостаткам:

- высокая стоимость единицы установленной мощности;
- зависимость от зарубежных стран по ремонту и запчастям и высоким ценам на обслуживание;
- необходимость наличия природного газа.

Последнее обстоятельство особенно существенное – при строительстве объектов распределенной энергетики, как правило, имеем дело с населенными пунктами, удаленными от единой энергетической и газотранспортной системы. В таких регионах проживает свыше 20 млн. человек. Привозное топливо резко удорожает стоимость единицы произведенной тепловой и электрической энергии.

К сожалению, это находится в соответствии с тезисом стратегии: «Большое развитие получают

установки распределенной генерации электроэнергии в виде **газотурбинных** установок мощностью от 10 кВт до 60–70 МВт».

Вместе с тем, возможно развитие технологий использования возобновляемых источников энергии, а также многофункциональных энергетических комплексов для автономного энергообеспечения потребителей в районах, не подключенных к сетям централизованного энергоснабжения, например, на базе производства и использования топлива, получаемого из различных видов биомассы. Автономная энергетика, обеспеченная местными топливными ресурсами, является не только насущной необходимостью, но и крупным заказчиком инвестиций и НИОКР. Сейчас в России сформирован многомиллиардный рынок оборудования и услуг в данной сфере. Однако, как отмечается в /9/, вследствие кризиса промышленности 90-х и отсутствия соответствующего предложения от национальных производителей, большая часть средств ушла за рубеж – за турбины и газопоршневые агрегаты производства США, ФРГ, Голландии и пр.

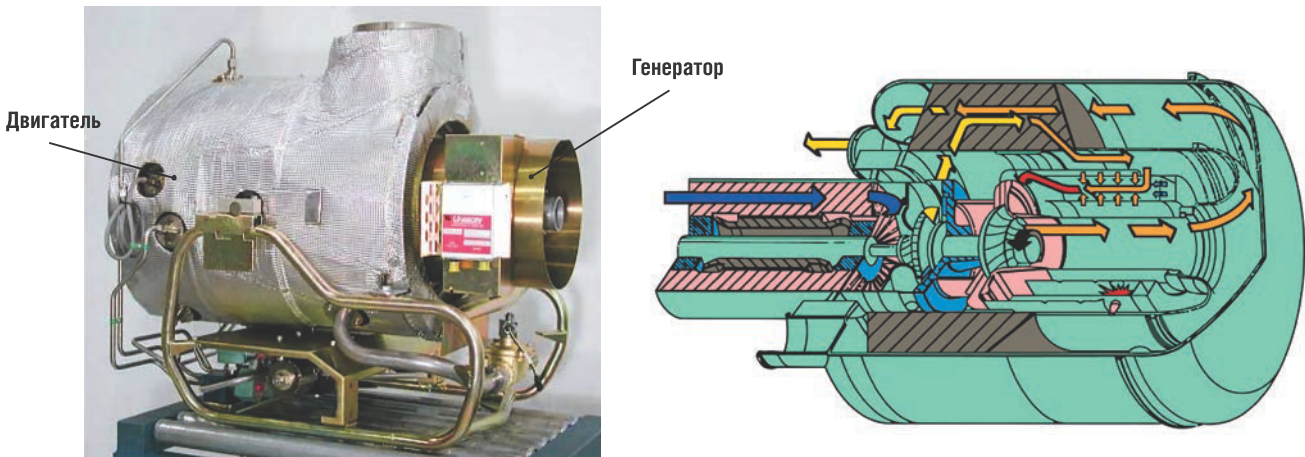
Экономические реалии требуют максимального использования собственных разработок – недорогих, эффективных, доступных, обеспеченных гарантированной ремонтной поддержкой.

Значительная часть России расположена вне централизованных систем производства электрической и тепловой энергии, при этом в распоряжении имеется значительное количество древесины, в том числе не товарного качества. Одно из решений проблемы – производство и эксплуатация отечественных паротурбинных мультитопливных энергетических установок малой мощности. Такие установки распределенной когенерации мощностью 50–100 кВт, объединенные в кластеры, позволят решить задачу снабжения теплом и электроэнергией небольших поселков, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке. Эксплуатация распределенной энергетики на базе местного возобновляемого биотоплива (дрова, опилки, отходы переработки древесины и т.п.) взамен на завоз дорогого топлива может дать значительную экономию средств и повысить качество жизни.

Решение задачи обусловлено следующими факторами, особенно важными для Российской Федерации:

1. На огромной территории страны имеются районы, прежде всего в Сибири и на Крайнем Севере, а также отдельно расположенные технические объекты, которые из-за удаленности от промышленных центров или малого энергопотребления, не охвачены централизованным энергоснабжением. Во многих удаленных районах для выработки

РИС 2. Турбогенератор фирмы «Capstone» малой мощности



энергии на малых электростанциях используется нефтепродукты, сжиженный газ. Распространение получили автономные энергоустановки на базе газовых микротурбин производства фирмы «Capstone» (США) [6, 9], внешний вид и конструкция которых изображен на рис. 2.

Подобные электростанции обладают высокими капитальными затратами (стоимость одного кВт установленной мощности многократно превышает таковую для традиционных ТЭЦ и ТЭС), невысоким ресурсом, обусловленным высокими температурами в проточной части, требуют возрастающих затрат на поддержание их работоспособности, проведение капитального ремонта,

на транспортировку и хранение топлива. Особо отметим трудности импортных поставок оборудования и запчастей с учетом реалий рынка. Имеются и другие схемы малых энергетических установок на базе газовых турбин (Рис. 3).

В значительной части эти недостатки относятся к газопоршневым установкам, например, «Caterpillar» (США). Высокие капитальные затраты также сдерживают развитие ветровых и солнечных энергоустановок. В ряде случаев их эксплуатация из-за климатических условий Сибири и Крайнего севера невозможна.

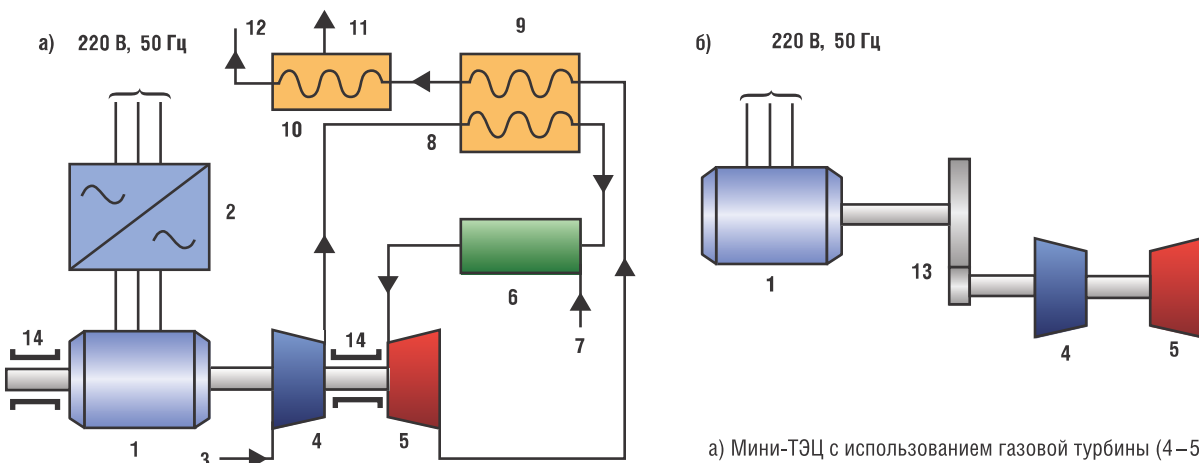
2. В условиях климатических и техногенных катастроф, в чрезвычайных ситуациях

надёжность электро- и теплоснабжения потребителей уже не может быть обеспечена только средствами централизованных систем электроснабжения. Требуются надёжные мобильные установки быстрого развертывания, работающие на местном низкореективном топливе.

3. Крупные централизованные системы электроснабжения являются более уязвимыми, чем автономные системы малой мощности, в случае возникновения террористической или военной угроз.

4. Эффективные и надёжные установки малой мощности являются важнейшим функциональным

РИС 3. Примеры малых энергетических установок на базе газовых турбин



а) Мини-ТЭЦ с использованием газовой турбины (4–5), генератора (1), преобразователя частоты (2) вместо редуктора, регенератора (8–9) и сетевого подогревателя (10–11). 3,12 – вход и выход воздуха и продуктов сгорания, 14 – подшипники. 7 – подача топлива в камеру сгорания 6
б) Мини-ТЭЦ на базе газовой турбины. Здесь 13 – редуктор



элементом специальных объектов, обеспечивающих обороноспособность страны.

Данная работа проводится в соответствии с перечнем приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и критических технологий.

Поставленная задача – создавать отечественные образцы установок распределенной генерации, не уступающие, а по ряду параметров превосходящие зарубежные аналоги. Выход на промышленное производство таких установок решает несколько социальных задач:

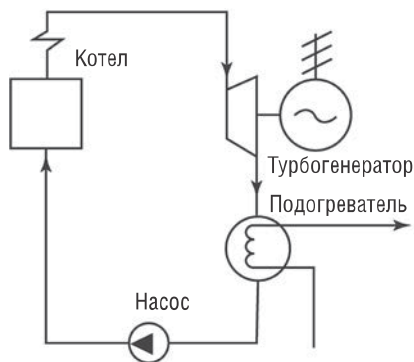
- 1) Обеспечение теплом и электроэнергией населения Сибири и Дальнего Востока.
- 2) Создание рабочих мест на предприятиях, связанных с производством и эксплуатацией систем когенерации.
- 3) Использование местного недорогого топлива при экологически чистых технологиях.
- 4) Повышение энергетической независимости страны.
- 5) Импортозамещение.

Применение паровых, а не газовых турбин приводит к уменьшению рабочей температуры по сравнению с зарубежными аналогами и позволяет иметь большой ресурс, т.е. уменьшает расходы на ремонт и эксплуатацию.

Отсутствие ползучести в паровой турбине небольшой мощности и малые размеры ротора позволяют изготавливать большинство элементов энергоустановок из сравнительно недорогих конструкционных материалов и сталей на неспециализированных производствах при наличии универсальных станков с ЧПУ.

Использование подобных энергоустановок в качестве судового двигателя позволяет более эффективно осваивать сибирские реки, поскольку топливом может служить валежник, бурелом и т.п. Большое значение имеет применение установок или кластеров в горных районах, где отсутствует централизованное энергоснабжение. Для функционирования небольших

РИС 3. Примерная тепловая схема малой ТЭЦ (второй поток для простоты не показан)



поликлиник, школ, больниц мощности 50–100 кВт оказывается вполне достаточно. Обслуживающий персонал не требует высокой квалификации и специального образования. Установки модульные и не требуют специалистов при монтаже. Для транспортировки не нужен спецтранспорт.

Применение парового турбогенератора сопряжено с анализом возможных тепловых схем. Очевидно, что схемы для поставленных задач бездеаэрационные. Это оправдано 2-мя обстоятельствами: 1) необходимая компактность установки; 2) невысокая стоимость ремонта проточной части. Рассматриваются схемы без промперегрева и регенерации, что также продиктовано компактностью агрегата и его дешевизной. Экономия на капитальных затратах, как следствие, приводит к некоторому снижению к.п.д., что, однако, оправдывается существенной

дешевизной топлива, в ключая биотопливо. Так, по данным НИУ «МЭИ» (далее МЭИ), стоимость 1 т гранул, получаемых от переработки дров, коры, опилок и другого подобного древесного сырья, составляет 2000 руб. при удельной теплоте сгорания 3,5–4 тыс. ккал/кг. Схема с водяным конденсатором не исключается, но в первом приближении также не рассматривается для упрощения эксплуатации.

Основной рабочей схемой является тепловая схема турбины с противодавлением около 5 бар. (рис.3) . На выходе устанавливается сетевой подогреватель, который обеспечивает потребителя. Электрическая мощность двухпоточной турбины 60 кВт. Ясно, что выбор двухпоточной конструкции необходим, так как опоры должны быть разгружены от осевых усилий, но это неизбежно ведет к малым высотам лопаток. Проточная часть паровой турбины может включать, например, типичную осерадиальную ступень, возможно, с регулируемым сопловым аппаратом, (рис. 4), после чего может устанавливаться одна или несколько осевых ступеней (не исключая двухвентильную) – на рисунке не показаны. В условиях Сибири и Севера особое внимание должно быть уделено пуску и останову при низких температурах. В дальнейшем планируется исследование цикла для «незамерзающих» теплоносителей, пока же сошлемся на большой опыт эксплуатации в свое время паровозов (слив

РИС 4. Слева – схема первой ступени одного потока малой паровой турбины (последующие ступени осевые, для простоты не показаны) . Справа-техническое решение для газовой турбины (разработана на Горьковском автозаводе и в «Московском государственном машиностроительном университете (МАМИ)» (Университет машиностроения) /9/

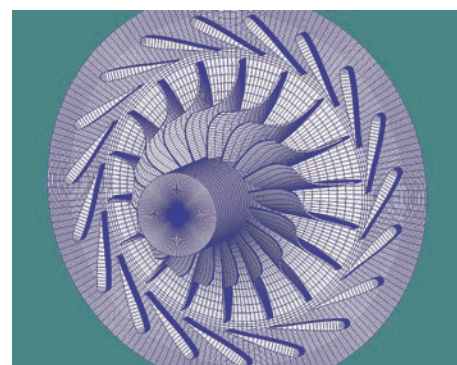
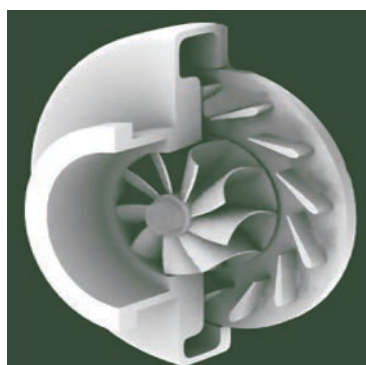


РИС 5. Общий процесс в h-s диаграмме для рассматриваемой паровой турбины малой мощности. Начало процесса расширения пара при 450° С, 15 бар. Окончание процесса при 5 бар

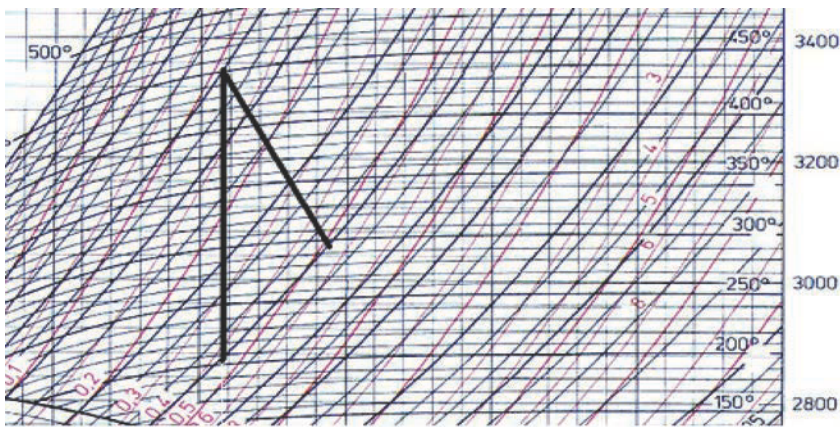
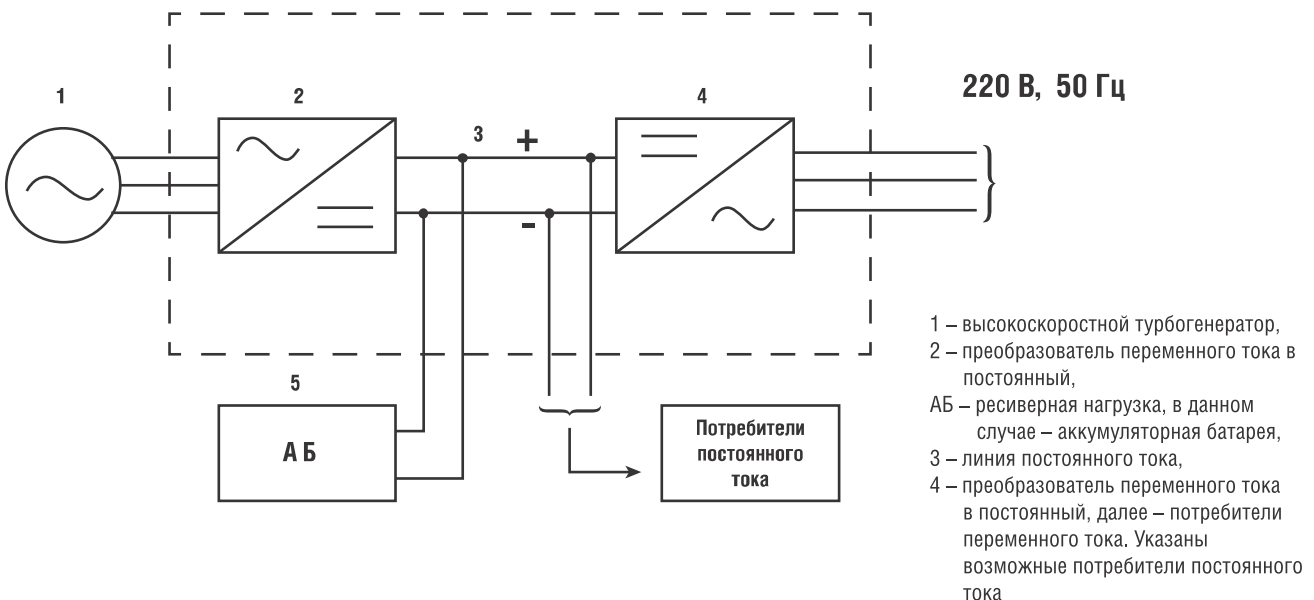


РИС 6. Структурная схема парового турбогенератора



РИС 7. Преобразование электрического тока



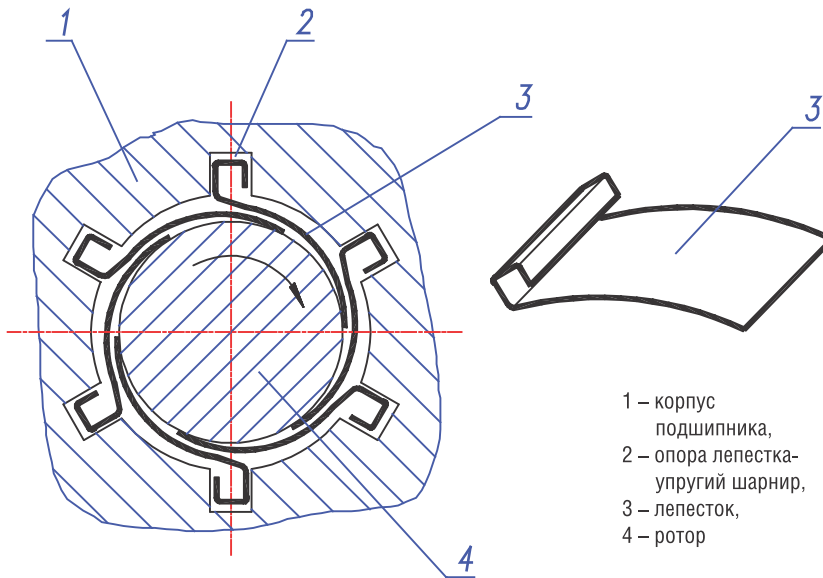
воды, заливка перед пуском теплой воды). Рассмотрение процесса при данных условиях показывает, что расширение происходит в зоне перегретого пара (рис.5). Тепловая нагрузка представляет собой сетевой подогреватель, работающий, например, в режиме отопления. Тепловая нагрузка примерно в 2 раза больше по мощности электрической. Заметим, что тепловой нагрузкой может служить также энергетическая установка с низкотемпературным циклом Ренкина.

Предварительный анализ показывает, что ротор с центральным расположением генератора и симметричными разнонаправленными равными потоками пара может быть выполнен жестким, что облегчает пуск и балансировку, а также эксплуатацию воздушных подшипников. Возможно также выполнение регулируемого направляющего аппарата осевых ступеней, но это усложняет конструкцию.

Для выполнения поставленных задач турбогенератор выполняется по новым технологиям, обеспечивающих долговечность и высокую эффективность опор, достоверные расчеты проточной части, сохранение высокой частоты вращения ротора при отказе от редуктора, современную конструкцию высокочастотного генератора. Использование современной элементной базы позволяет создать надежный,



РИС 8. Лепестковые газовые высокоскоростные подшипники



- 1 – корпус подшипника,
2 – опора лепестка-упругий шарнир,
3 – лепесток,
4 – ротор

компактный и доступный по цене преобразователь частоты. Это позволяет отказаться от сложной системы регулирования частоты вращения ротора и редуктора. Структурная схема турбогенератора показана на рис.6. Центральный модуль – высокоскоростная паровая турбомашина.

В МЭИ много лет разрабатываются и производятся высокоскоростные генераторы и силовая электроника (Рис. 7).

Что касается высокоскоростных безмасляных опор – то в МЭИ освоена технология проектирования и изготовления лепестковых газодинамических подшипников, которые показали себя с лучшей стороны при эксплуатации в турбомашинах (Рис. 8).

Таким образом, предлагаемые установки обладают следующими преимуществами перед имеющимися или предлагаемыми на основе газовых турбин:

1. Использование местного топлива (дрова, уголь). Сравнительно высокий коэффициент использования топлива.
2. Малые расходы на ремонт, эксплуатацию.
3. Сравнительно низкая цена, т.е. малые расходы на 1 кВт установленной мощности.
4. Отсутствие импортных узлов и технологий.
5. Простая схема регулирования.

6. Высокий межремонтный ресурс вследствие замены газовой на паровую турбину (резкое снижение температуры рабочего тела).
7. Упрощенная балансировка.
8. Высокая транспортабельность, модульность.
9. Хорошая экология.
10. Отсутствие требований к высокой квалификации персонала.

Планируемые в МЭИ работы по задаче и ожидаемые результаты:

- рассмотрение разных тепловых и прочностных схем решения, анализ результатов, выбор задач исследований – научное обоснование компоновочной схемы установки и кластеров, формирование ТЗ на разработку экспериментального образца, разработка расчётных моделей системы, расчёт и проектирование опытной установки и электронного преобразователя, разработка технологических решений для станков с ЧПУ.
- изготовление и сборка экспериментального образца установки (без котла), разработка программы предварительных испытаний и стендового оборудования для ТЭЦ МЭИ, предварительные испытания образца.
- анализ результатов испытаний, комплектование установки внешними элементами (котёл, электроавтоматика, элементы

защиты и т.д.), создание экспериментального полигона микротурбинных технологий на базе МЭИ. Разработка модельного ряда ЭУММ. Разработка документации для серийного изготовления установок в собственном корпусе и с собственным котлом – подготовка к серийному производству ЭУММ. Эксплуатационные проверки работы. Отработка характеристик регулирования.

- создание стратегии развития технологической платформы распределенной когенерации для различных регионов.

Предлагаемая концепция использования паровых турбогенераторов как основы энергетических установок малой мощности с использованием современных технологий позволяет в значительной степени решить доступными средствами задачу распределенной когенерации. ●

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.09 г. №1715-Р.
2. Щегляев А.В. Паровые турбины. М. 1987.
3. Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е., Осерадиальные турбины малой мощности. М. 1960.
4. Автономные источники электроэнергии. Пономаренко И.С., Лунин А.И., Аксенов Д.А., Кондратенко Р.О., Крупович А.Ю., Першин В.О., Пономаренко О.И., Энергоэксперт, № 6, 2012. С. 30–34.
5. Микрогазотурбинные электроагрегаты – новое направление в малой энергетике. Пожидаев В.М. Академия энергетики, № 4, 2005. с. 26–33.
6. Проспект фирмы Capstone: http://www.capstoneturbine.com/_docs/datasheets/C65%20&%20C65%20CHPLiquid%20Fuels_331038F_lowres.pdf
7. Опыт разработки высокоскоростных электротурбомашин на кафедре ЭКАО МЭИ. / Румянцев М.Ю., Захарова Н.Е., Сигаев С.И. // Вестник Московского Энергетического Института. М.: Изд-во МЭИ, 2007. № 3. С. 45–50.
8. Применение высокоскоростных электротурбомашин малой мощности на летательных аппаратах. / Н.Е.Захарова, М.Ю.Румянцев, С.И.Сигаев, А.В.Сизякин. // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «X Научные чтения, посвященные памяти Н.Е.Жуковского» / Сборник докладов. – М.: Издательский дом Академии имени Н.Е.Жуковского, 2013. с. 307–312.
9. Многоцелевые газовые микротурбины, Инновационный продукт совместной разработки НИЦ «Курчатовский институт» и ЗАО «Многоцелевые двигатели», М. 2015 г., 61 с.

Ключевые слова: *распределенная генерация, когенерация, электроэнергия, паровые турбогенераторы.*