
УДК 621.455;621.039.526

СОВМЕСТНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2020 г. А. С. Коротеев¹, К. В. Готовцев¹, Л. Э. Захаренков¹, А. В. Каревский^{1, *}, А. С. Ловцов¹, Ю. А. Ошев¹, М. Ю. Селиванов¹, А. В. Семенкин¹, А. Е. Солодухин¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша”, Москва, Россия

*e-mail: kerc@elnet.msk.ru

Поступила в редакцию 04.12.2019 г.

После доработки 13.01.2020 г.

Принята к публикации 14.01.2020 г.

Расширение масштабов космической деятельности в околоземном пространстве и дальнем космосе требует повышения уровня энергодвигательного обеспечения. Для выполнения транспортных операций рассматривается создание и применение в космосе космических аппаратов с мощными энергодвигательными установками на базе систем преобразования энергии в замкнутом газотурбинном контуре и высокоэффективных электроракетных двигателей. В статье рассматривается подход к организации экспериментальной отработки энергодвигательных установок, предусматривающий проведение достаточного объема предварительных стыковочных испытаний их ключевых составных частей с использованием функциональных имитаторов и макетов. Такой подход был апробирован в ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” при проведении экспериментальных исследований совместной работы электроракетных двигателей и газотурбинной системы преобразования энергии. Результаты выполненных исследований продемонстрировали возможность устойчивого совместного функционирования электроракетных двигателей и газотурбинной системы преобразования энергии на характерных для работы космических энергодвигательных установок переходных и стационарных режимах.

Ключевые слова: газотурбинная система преобразования энергии, турбокомпрессор-генератор, экспериментальная отработка, электроракетный двигатель, энергодвигательная установка

DOI: 10.31857/S0002331020010069

ВВЕДЕНИЕ

Разработка проектов, в которых предусматривается использование космических транспортных средств на базе мощных энергодвигательных установок (ЭДУ), в том числе с ядерными источниками энергии, ведутся с самых первых этапов практического освоения космического пространства. В настоящее время в мире наблюдается рост числа таких проектов [1–4], активный интерес к которым обуславливается возрастающими технологическими и конструктивными возможностями по созданию основных составных частей мощной ЭДУ (от сотен киловатт до десятков мегаватт).

В качестве одного из перспективных вариантов реализации рассматриваются ЭДУ, включающие в свой состав источник тепла в виде ядерного реактора, систему преоб-



Рис. 1. Схема ЭДУ с газотурбинной системой преобразования энергии и ядерным реактором.

разования тепловой энергии в электрическую в замкнутом газотурбинном цикле (цикле Брайтона) и электроракетные двигатели (ЭРД) [2, 3, 5] (рис. 1).

Основным элементом газотурбинной системы преобразования энергии (СПЭ) является турбокомпрессор-генератор (ТКГ) – агрегат, объединяющий в единой конструкции:

- турбину, обеспечивающую преобразование тепловой энергии рабочего тела (инертный газ или смесь инертных газов), нагретого до высокой температуры в источнике тепла (ядерном реакторе), в механическую энергию вращающегося ротора;
- компрессор, обеспечивающий циркуляцию газообразного рабочего тела по замкнутому контуру с требуемым перепадом давления;
- генератор, обеспечивающий преобразование избыточной механической мощности на валу ТКГ в электрическую энергию переменного тока.

В теплообменнике-холодильнике тепло, неиспользованное в цикле преобразования энергии, передается от газообразного рабочего тела к теплоносителю системы отвода тепла и далее сбрасывается холодильником-излучателем в окружающее космическое пространство. Теплообменник-рекуператор обеспечивает повышение КПД преобразования энергии в замкнутом цикле за счет передачи (рекуперации) тепла от рабочего тела, идущего с выхода турбины на вход в теплообменник-холодильник, к рабочему телу, идущего с выхода компрессора на вход в ядерный реактор.

Электрическая энергия переменного тока, вырабатываемая СПЭ, с помощью аппаратуры системы преобразования и распределения электроэнергии (СПРЭЭ) трансформируется в электроэнергию постоянного тока требуемых номиналов напряжений, которая используется для обеспечения работы ЭРД.

Разработка проекта транспортно-энергетического модуля и первое экспериментальное исследование работы такой системы было проведено на прототипе малой мощности (2 кВт) в рамках проекта “Prometheus” [6].

Подобная энергодвигательная установка рассматривалась также в международном проекте DEMOCRITOS, который проводился с 2015 по 2017 гг. в продолжение успешных совместных Российско-Европейских работ в рамках проекта МEGАНИТ [7, 8] и был нацелен на анализ видов и содержания экспериментальных работ, необходимых для развития технологий ядерных энергодвигательных установок мегаваттного уровня мощности [9].

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ГАЗОТУРБИННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Разработка, создание и эксплуатация мощных ЭДУ связаны с необходимостью взаимной увязки функционирования их составных частей, каждая из которых представляет из себя сложное техническое устройство. При этом основные составные части энергодвигательных установок – система газотурбинного преобразования энергии, электроракетные двигатели, а также система преобразования и распределения электроэнергии – функционально выступают по отношению друг к другу как “черные ящики” с набором внешних интерфейсов. Так, для системы газотурбинного преобразования энергии СПРЭЭ и ЭРД являются нагрузкой с набором входных электрических интерфейсов (внутренним сопротивлением, емкостью, индуктивностью) безотносительно к тем физическим процессам, которые в них происходят при преобразовании и потреблении электрической энергии; аналогично, для электроракетных двигателей система газотурбинного преобразования энергии и СПРЭЭ является источниками электроэнергии с требуемыми выходными электрическими интерфейсами (мощностью, напряжением, частотой) безотносительно к тому, посредством каких процессов эта электроэнергия вырабатывается и преобразуется. Это позволяет до момента начала совместных испытаний проводить полный цикл экспериментальной отработки каждой из упомянутых составных частей автономно, с использованием соответствующих имитаторов. Так, при отработке системы газотурбинного преобразования энергии электроракетные двигатели могут быть заменены имитаторами в виде набора регулируемых резистивных элементов, а при отработке ЭРД вместо системы газотурбинного преобразования энергии и аппаратуры СПРЭЭ могут быть использованы источники электропитания соответствующей мощности и номиналов напряжений.

В то же самое время, при совместной работе в составе ЭДУ, газотурбинная СПЭ является для ЭРД источником электропитания ограниченной мощности, вследствие чего изменение режимов работы ЭРД будет оказывать влияние на параметры СПЭ. Так, при отключении или ступенчатом снижении мощности ЭРД происходит нарушение баланса мощностей в ТКГ, приводящее к увеличению частоты вращения его ротора. Увеличение частоты вращения выше допустимого значения может привести как к механическому разрушению ТКГ, так и к выходу из строя аппаратуры СПРЭЭ из-за повышения напряжения на клеммах электрогенератора. И, наоборот, подключение или ступенчатое повышение мощности ЭРД, а также характерные для ионных электроракетных двигателей самопроизвольные пробой в высоковольтных цепях может привести к снижению частоты вращения ротора ТКГ и, как следствие, к снижению напряжения, подаваемого генератором на аппаратуру СПРЭЭ. Снижение выходного напряжения аппаратуры СПРЭЭ может привести к работе части или всех ЭРД на нерасчетных (аномальных) режимах, что может вызвать развитие аварийной ситуации в газотурбинного СПЭ, связанной с частичной или полной потерей электрической нагрузки.

СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ ЭРД ПРИ СОВМЕСТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ С ГАЗОТУРБИННОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Для использования в составе СПЭ с газотурбинным преобразованием энергии наиболее часто рассматриваются ТКГ, в составе которых используются электрогенераторы с возбуждением высококоэрцитивными постоянными магнитами, расположенными на роторе [10, 11]. Преимуществами электрогенераторов такого типа являются вы-

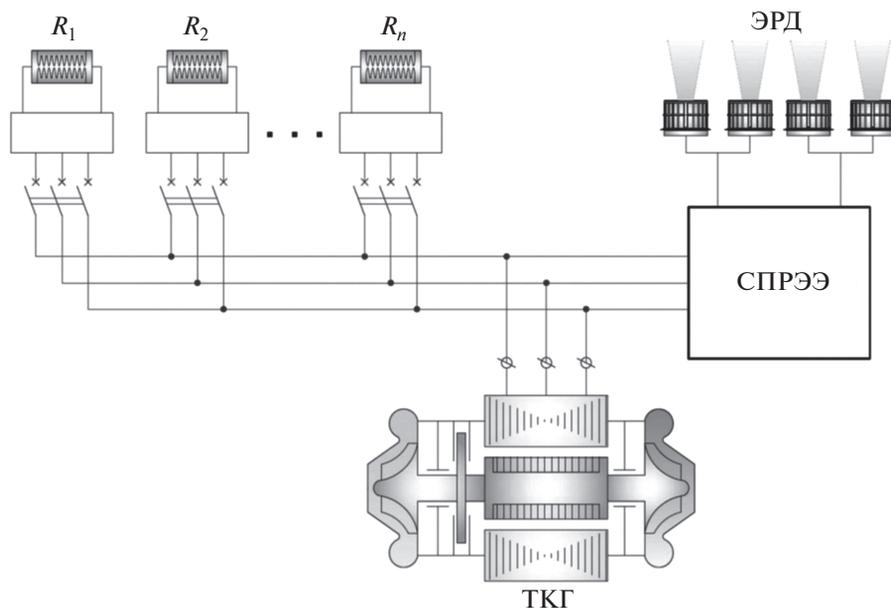


Рис. 2. Схема подключения балластной нагрузки для обеспечения поддержания частоты вращения ротора ТКГ газотурбинной системы преобразования энергии.

сокий КПД, высокая надежность и низкая масса за счет высокой магнитной энергии постоянных магнитов и отсутствия расхода дополнительной энергии на возбуждение. Из-за отсутствия возможности регулирования магнитного потока выходное напряжение электрогенераторов такого типа определяется, в первую очередь, частотой вращения ротора. Как отмечено выше, при подключении и отключении ЭРД или других потребителей электроэнергии, а также при изменении режимов их работы в ТКГ меняется баланс мощностей. Это приводит к торможению или разгону его ротора и, как следствие, к снижению или к увеличению электрического напряжения на клеммах электрогенератора и, соответственно, к изменению напряжения, подаваемого аппаратурой СПРЭЭ на ЭРД. Повышенное напряжение может привести к выходу из строя ЭРД и аппаратуры СПРЭЭ, а пониженное – к выключению ЭРД. Таким образом, поддержание частоты вращения ротора ТКГ при изменении мощности подключенных потребителей электроэнергии для обеспечения требуемого напряжения является важным условием обеспечения длительной стабильной работы ЭРД с заданной тягой и удельным импульсом. Это может быть обеспечено следующими двумя способами.

Первый способ предусматривает регулирование параметров цикла газотурбинного преобразования энергии (температуры рабочего тела перед турбиной путем изменения мощности источника тела, перепуском части рабочего тела между турбиной и компрессором и пр.). Быстродействие такого способа регулирования определяется тепловой инерционностью СПЭ и составляет от нескольких секунд до нескольких минут, в связи с чем он может быть реализован только при плавном программном изменении режимов работы ЭРД или других потребителей электроэнергии.

Второй способ предусматривает использование регулируемой балластной нагрузки (БН), выполненной, например, в виде резистивных элементов, которая подключена к электрической сети параллельно ЭРД (рис. 2). Быстродействие этого способа определяется быстродействием аппаратуры управления и устройств коммутации балластной

нагрузки и может составлять доли секунд, что позволяет его использовать в случае необходимости быстрого изменения режимов работы, а также подключении или отключении ЭРД и других потребителей электроэнергии.

Для реализации второго способа поддержания частоты вращения ротора ТКГ может быть использован принцип изменения проводимости подключаемой балластной нагрузки по закону ПИД-регулятора [12], согласно которому сигнал управления проводимостью балластной нагрузки в данный момент времени $G(t)$ формируется как функция пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих сигнала рассогласования (невязки) $E(t) = n_{\text{зад}} - n(t)$:

$$G(t) = K_p \left(E(t) + K_i \int_0^t E(\tau) d\tau + K_d \frac{dE}{dt} \right), \quad (1)$$

где $n_{\text{зад}}$ и $n(t)$ – соответственно, заданное и текущее значение частоты вращения ротора ТКГ;

K_p, K_i, K_d – соответственно, пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора.

Для реализации в алгоритмах системы управления энергодвигательной установкой уравнение (1) может быть представлено в дискретном виде следующим образом:

$$G(j) = G(j-1) + K_p (E(j) - E(j-1)) + K_i^{\text{discr}} E(j) + K_d^{\text{discr}} (E(j) - 2E(j-1) + E(j-2)), \quad (2)$$

где j – номер текущего шага дискретизации;

$$K_i^{\text{discr}} = K_p K_i T,$$

$$K_d^{\text{discr}} = \frac{K_p K_d}{T}, \text{ здесь } T - \text{временной шаг дискретизации.}$$

Коэффициенты ПИД-регулятора могут быть определены по результатам математического моделирования или при экспериментальной отработке системы газотурбинного преобразования энергии по замкнутому циклу Брайтона.

Сама балластная нагрузка может быть выполнена в виде параллельно подключаемых секций (рис. 2), электрические проводимости которых $G = 1/R$ подобраны по закону $G_{i+1}/G_i = 2$. Это дает возможность реализовать 2^n ступеней регулирования с шагом по мощности $\Delta N_R = U^2 G_1 = U^2/R_1$.

Требуемое быстродействие аппаратуры управления и устройств коммутации балластной нагрузки Δt , в секундах, может быть определено по формуле:

$$\Delta t = 2\pi^2 J_z \frac{n_d^2 - n_0^2}{\Delta N}, \quad (3)$$

где J_z – осевой момент инерции ротора ТКГ, кг м²;

n_d и n_0 – максимально допустимая и номинальная частота вращения ротора ТКГ соответственно, об/мин;

ΔN – величина ступенчатого изменения мощности потребителей электроэнергии.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ЭРД И ГАЗОТУРБИНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Приведенные в предыдущих разделах примеры показывают, что при совместной работе электроракетных двигателей и газотурбинной СПЭ из-за их взаимного влияния друг на друга возможно возникновение нештатных или аварийных ситуаций. В связи с этим в ходе экспериментальной отработки представляется целесообразным

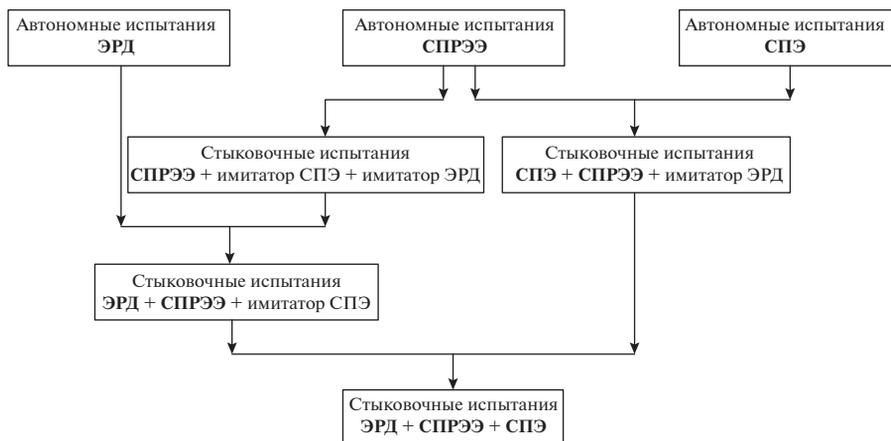


Рис. 3. Организация испытаний газотурбинной системы преобразования энергии и электроракетных двигателей при проведении экспериментальной отработки ЭДУ.

проведение достаточного объема предварительных стыковочных испытаний с использованием функциональных имитаторов как СПЭ, так и ЭРД. Экспериментальные данные, полученные в рамках данных предварительных стыковочных испытаний, позволят оптимизировать логику управления, процедуру и последовательность проведения совместных испытаний газотурбинной СПЭ и электроракетных двигателей, минимизировать технический риск возникновения нештатных и аварийных ситуаций в ходе их проведения. Данное обстоятельство особенно актуально для ЭДУ с ядерными источниками энергии. В связи с этим при проведении экспериментальной отработки ЭДУ представляется целесообразной следующая логика организации испытаний ЭРД и газотурбинной системы преобразования энергии [13] (рис. 3).

1) Автономные испытания составных частей ЭДУ: газотурбинной системы преобразования энергии, аппаратуры СПРЭЭ и электроракетных двигателей.

Задачи, решаемые при автономных испытаниях – проверка работоспособности составных частей, отработка алгоритмов их управления, имитация нештатных ситуаций, экспериментальное определение характеристик агрегатов.

При автономных испытаниях газотурбинной системы преобразования энергии используются:

- тепловой имитатор штатного источника нагрева рабочего тела (ядерного реактора);
- тепловой имитатор системы отвода тепла (ТИСОТ);
- имитатор ЭРД, который в общем случае может быть выполнен в виде регулируемой электрической нагрузки.

При автономных испытаниях аппаратуры СПРЭЭ используются:

- имитатор СПЭ (в части характеристик вырабатываемой электроэнергии) в виде источника электропитания, подающего на вход аппаратуры СПРЭЭ электроэнергию с параметрами (частота, напряжение), близкими к параметрам штатного электрогенератора;
- электрический имитатор ЭРД в виде регулируемой нагрузки.

При автономных испытаниях ЭРД используются стендовые источники электропитания постоянного тока с напряжением, соответствующим выходному напряжению аппаратуры СПРЭЭ.

2) Предварительные совместные испытания отдельных составных частей ЭДУ:

- система газотурбинного преобразования энергии + аппаратура СПРЭЭ + имитатор ЭРД;

– имитатор СПЭ (источник электропитания статического типа или динамический источник электропитания) + аппаратура СПРЭЭ + ЭРД.

Задачи испытаний – экспериментальное определение взаимного влияния отдельных составных частей ЭДУ, уточнение требований к быстродействию аппаратуры системы управления, имитация нештатных ситуаций

3) Комплексные испытания ЭДУ в составе: газотурбинная система преобразования энергии + аппаратура СПРЭЭ + ЭРД.

Задачи испытаний – комплексная проверка устойчивой работы составных частей при их совместном функционировании в составе ЭДУ на характерных режимах работы, в том числе, при подключении и отключении ЭРД, на режимах стационарной и переменной мощности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ГАЗОТУРБИННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Для апробации описанной выше логики организации проведения экспериментальной отработки ЭДУ в ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” выполнены экспериментальные исследования совместного функционирования электроракетных двигателей и газотурбинной системы преобразования энергии. Экспериментальная база для проведения этих исследований включала два испытательных стенда: стенд для испытаний мощных высокооборотных агрегатов и стенд для испытаний ЭРД, которые расположены в соседних помещениях и соединены силовой высоковольтной кабельной сетью, обеспечивающей передачу вырабатываемой мощности от генератора ТКГ к ЭРД.

На стенде для испытаний мощных высокооборотных агрегатов [14] располагаются все ключевые составные части газотурбинной системы преобразования энергии, тракты которых посредством трубопроводов объединены в замкнутый контур (рис. 4).

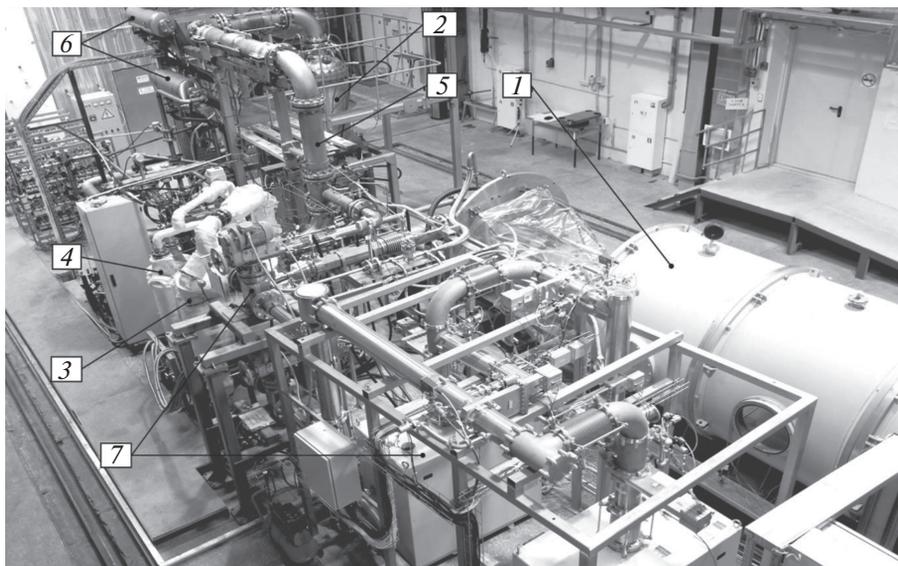


Рис. 4. Стенд для испытаний мощных высокооборотных агрегатов: 1 – камера с турбокомпрессор-генератором; 2 – электрический нагреватель газа; 3 – теплообменник-рекуператор; 4 – теплообменник-холодильник; 5 – трубопроводы; 6 – агрегаты системы отвода тепла; 7 – агрегаты системы вакуумирования.

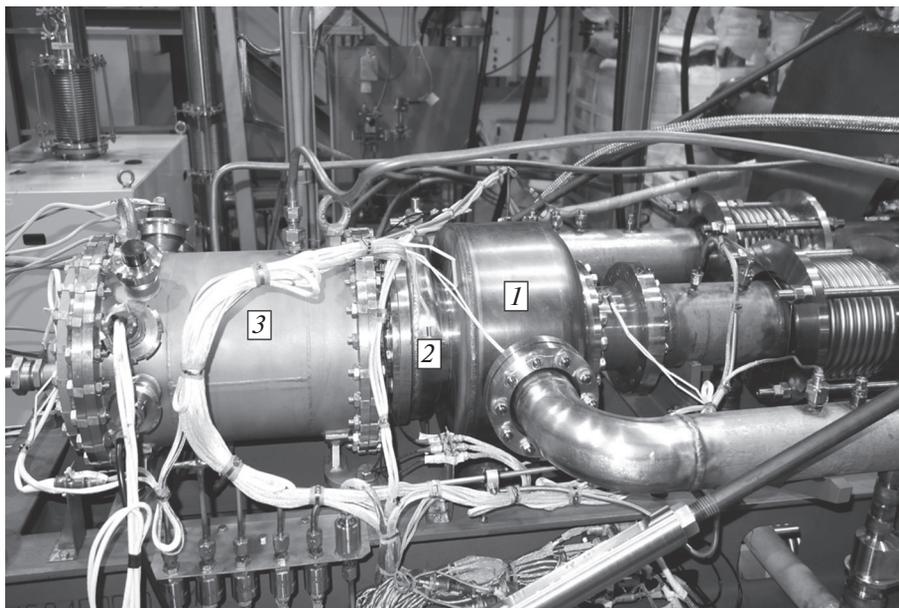


Рис. 5. Турбокомпрессор-генератор: 1 – турбина; 2 – компрессор; 3 – электрический генератор.

В состав стенда также входят агрегаты технологических систем, обеспечивающие подготовку и проведение испытаний, в том числе:

- агрегаты системы вакуумирования, обеспечивающие откачку внутреннего объема замкнутого контура газотурбинного преобразования энергии перед его заполнением газообразным рабочим телом (аргоном);

- агрегаты системы отвода тепла, обеспечивающие отвод неиспользованного в замкнутом цикле преобразования энергии тепла, а также охлаждение отдельных агрегатов замкнутого контура;

- аппаратура электрической системы обеспечения запуска (СОЗ), обеспечивающая раскрутку ротора ТКГ при работе его генератора в режиме электродвигателя (моторном режиме) до момента появления на роторе ТКГ избыточной мощности и перехода в режим генерации электроэнергии.

Турбокомпрессор-генератор (рис. 5), являющийся ключевым элементом газотурбинной системы преобразования энергии, включает в свой состав центробежный компрессор, центростремительную турбину и трехфазный синхронный электрический генератор с установленными на роторе постоянными магнитами. Ротор ТКГ установлен в бесконтактных лепестковых газодинамических подшипниках, обеспечивающих длительную (сотни и тысячи часов) работу при частотах вращения в несколько десятков тысяч оборотов в минуту без наличия каких-либо дополнительных систем смазки. При работе ТКГ располагается в камере, в которой, при необходимости, для защиты конструкционных материалов от окисления при высоких температурах может быть создана защитная атмосфера (инертный газ или вакуум). Кроме того, в случае возникновения аварийной ситуации, связанной с разрушением ротора ТКГ, стенки камеры являются физическим барьером для разлетающихся с высокой скоростью элементов.

Нагрев рабочего тела замкнутого контура осуществляется в стендовом электрическом нагревателе газа регулируемой мощности [15] (рис. 6), имитирующем работу штатного источника тепла. Газ нагревается во внутренней полости при течении по

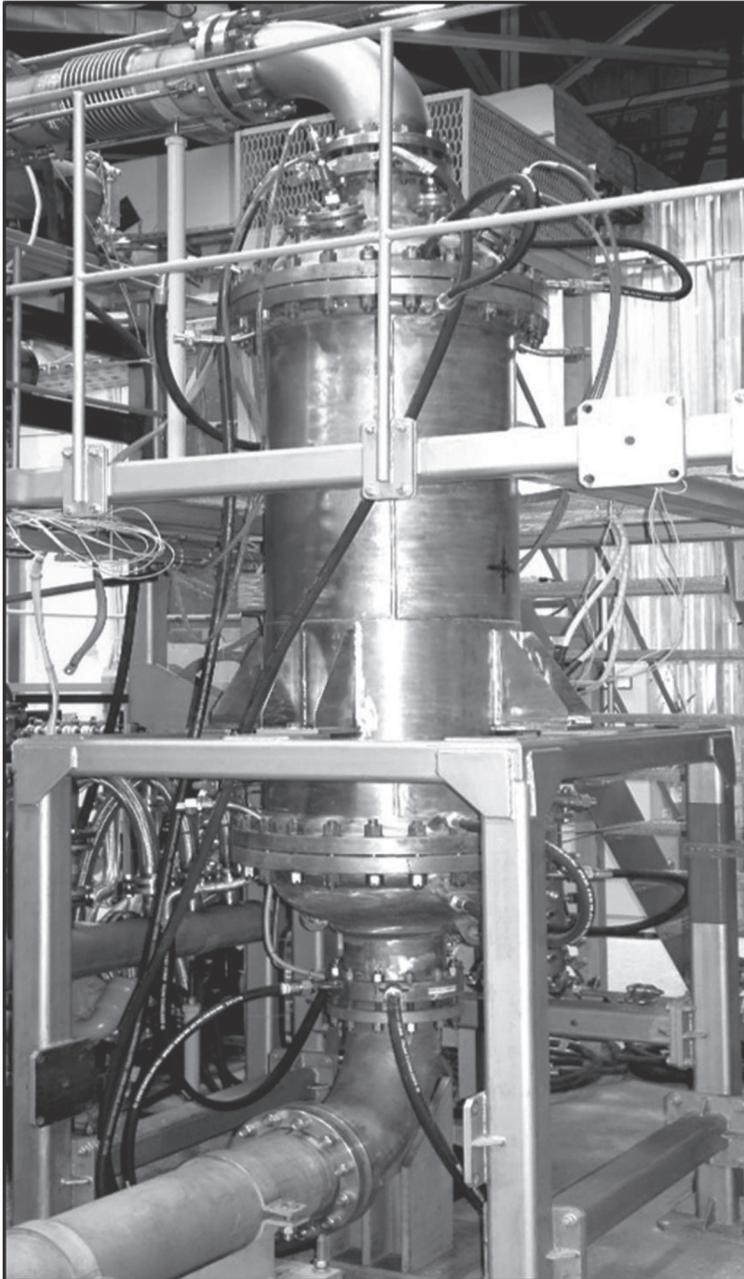


Рис. 6. Электрический нагреватель газа.

трубкам из ниобиевого сплава, через которые пропускается электрический ток. Для минимизации утечек тепла между внутренней полостью и наружным охлаждаемым корпусом нагревателя установлены металлические экраны и слой высокотемпературного теплоизоляционного материала.

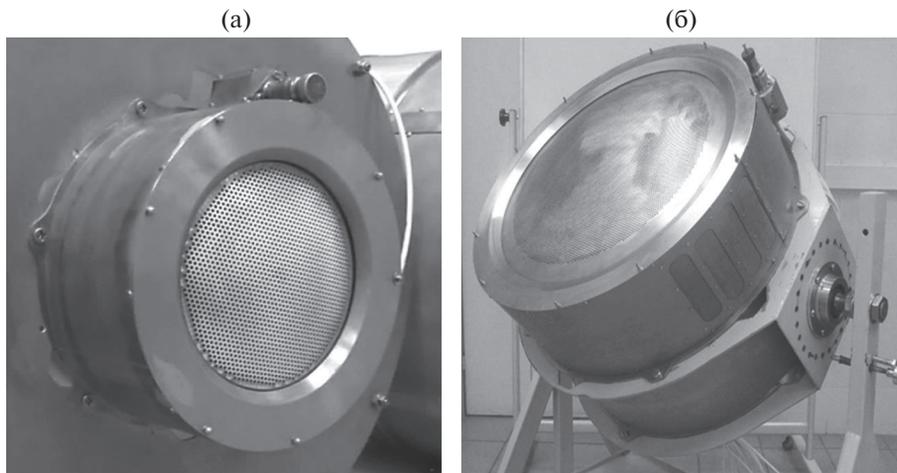


Рис. 7. Электроракетные двигатели (а) ИД-200 и (б) ИД-500.

Утилизация вырабатываемой электроэнергии, а также поддержание заданной частоты вращения ротора ТКГ осуществляется регулируемой балластной нагрузкой. Подключение секций БН осуществляется по закону ПИД-регулятора (см. выше), реализованному в системе управления [16].

Контроль и регистрация параметров замкнутого контура преобразования энергии и его агрегатов (температуры, давления, расходы, частота вращения ротора ТКГ, вибрации и пр.), а также дистанционное управление режимами испытаний осуществляется автоматизированной системой управления и регистрации параметров, построенной на базе высокопроизводительных модулей аналого-цифрового преобразования и персональных компьютеров.

В состав аппаратуры СПРЭЭ, используемой при проведении исследований, входили:

- трехфазный повышающий трансформатор;
- выпрямитель, преобразующий трехфазное напряжение переменного тока, вырабатываемое электрогенератором и повышаемое трансформатором, в напряжение постоянного тока (до 4500 В), подаваемое далее по высоковольтному кабелю на стенд для испытаний ЭРД.

Основным элементом стенда для испытаний ЭРД является криогенная вакуумная установка КВУ-90 с вакуумной камерой объемом 90 м^3 [17]. Параметры системы вакуумирования установки КВУ-90 позволяют проводить длительные испытания различных типов ЭРД мощностью до 35 кВт.

При проведении исследований использовались ионные двигатели ИД-200 мощностью 5 кВт и ИД-500 мощностью 35 кВт (см. рис. 7) разработки ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” [18, 19]. Рабочее тело двигателей (газообразный ксенон) подавалось от стеновых систем через блоки управления расходом. Подача высоковольтного напряжения постоянного тока от аппаратуры СПРЭЭ на двигатели осуществлялась блоком коммутации высоковольтных цепей, который одновременно обеспечивал защиту электрических цепей и аппаратуры при длительных пробоях в ионно-оптической системе двигателей.

В ходе исследований в автоматическом режиме осуществлялась регистрация параметров двигателей (расход рабочего тела, токи и напряжения), а также электрических параметров на входе и на выходе аппаратуры СПРЭЭ.

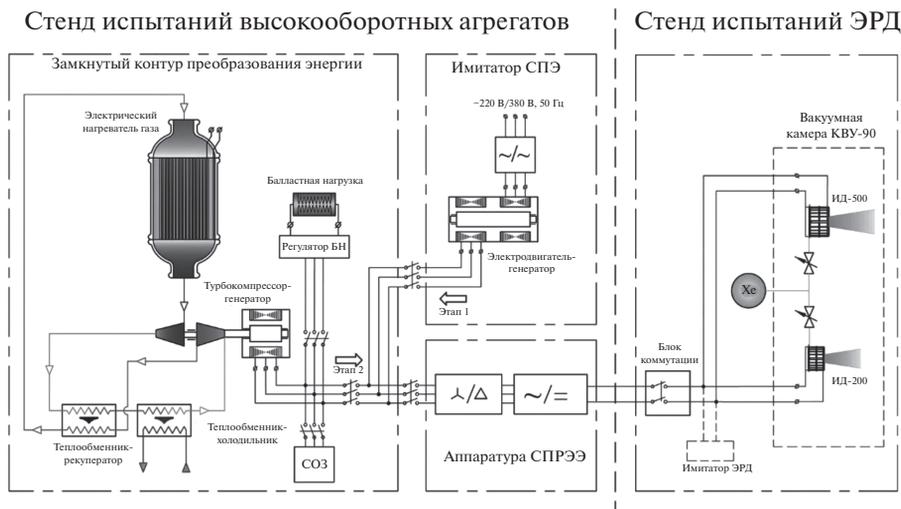


Рис. 8. Схема проведения экспериментальных исследований.

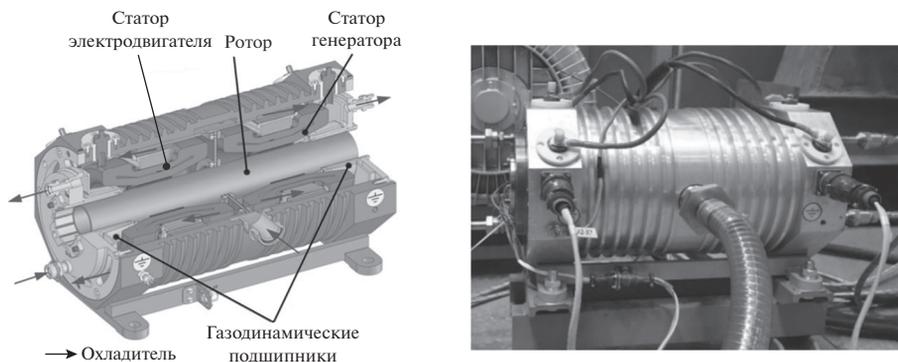


Рис. 9. Электрический имитатор СПЭ на основе электродвигателя-генератора.

Схема экспериментальных исследований совместной работы электроракетных двигателей и газотурбинной системы преобразования энергии предусматривала проведение двух последовательных этапов (рис. 8):

Этап 1 – стыковочные испытания ЭРД и аппаратуры СПРЭЭ с генерацией электроэнергии имитатором СПЭ;

Этап 2 – испытания с генерацией электроэнергии в замкнутом контуре газотурбинного преобразования энергии и подключением аппаратуры СПРЭЭ и ЭРД.

На Этапе 1 исследований в качестве источника электроэнергии для работы аппаратуры СПРЭЭ и ЭРД был задействован имитатор СПЭ (рис. 9) на основе электродвигателя-генератора (ЭДГ). ЭДГ представляет из себя электрическую машину, объединяющую в единой конструкции электрический двигатель и электрический генератор с отдельными статорными обмотками и с общим ротором, который вращается в лепестковых газодинамических подшипниках с частотой, соответствующей частоте вращения ТКГ замкнутого контура преобразования энергии. Статорные обмотки двига-

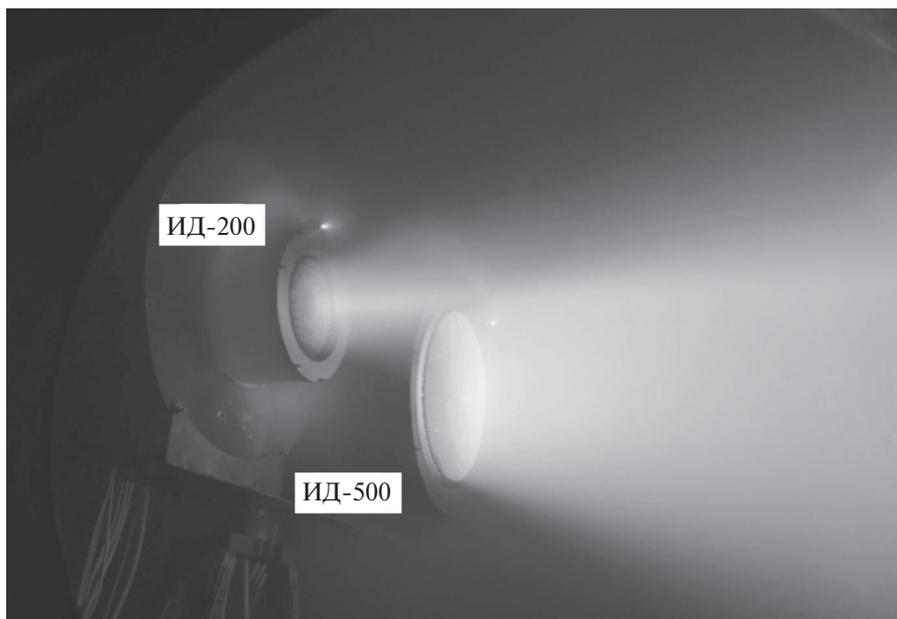


Рис. 10. Работа кластера ионных двигателей от электромеханического имитатора контура преобразования энергии и аппаратуры СПРЭЭ.

теля ЭДГ подключаются через преобразователь к внешней электрической сети, а в генераторной части ЭДГ механическая энергия вращающегося ротора преобразуется в электрическую энергию трехфазного переменного тока. Такой электромеханический имитатор в отличие, например, от статических преобразователей электроэнергии на основе широтно-импульсной модуляции обеспечивает подачу на аппаратуру СПРЭЭ электрической энергии переменного тока, параметры которой идентичны параметрам электроэнергии, вырабатываемой ТКГ при работе замкнутого контура преобразования энергии. В тоже время, в отличие от ТКГ, частота вращения ротора ЭДГ при подключении и отключении нагрузки поддерживается постоянной, что позволяет исследовать совместную работу аппаратуры СПРЭЭ и ЭРД без влияния дополнительных эффектов, связанных с изменением частоты и величины напряжения переменного тока, подаваемого на аппаратуру СПРЭЭ.

С использованием электромеханического имитатора СПЭ на Этапе 1:

- выполнены исследования работы аппаратуры СПРЭЭ и блока коммутации высоковольтных цепей при коротких замыканиях различной длительности в высоковольтных цепях питания ЭРД, имитирующих периодически возникающие пробои в ионно-оптической системе при работе ионных двигателей (в ходе этих исследований вместо ЭРД использовался его имитатор в виде резистивной нагрузки, см. рис. 8);

- определены длительности переходных процессов, а также характер изменений токов и напряжений в электрических цепях переменного (на входе в аппаратуру СПРЭЭ) и постоянного (после аппаратуры СПРЭЭ) тока при включении и отключении ЭРД;

- продемонстрирована возможность совместного устойчивого функционирования аппаратуры СПРЭЭ с одним двигателем, а также с кластером из двух одновременно работающих ионных двигателей (рис. 10).

На Этапе 2 выработка электроэнергии осуществлялась генератором ТКГ в замкнутом контуре газотурбинной системы преобразования энергии. Для исключения про-

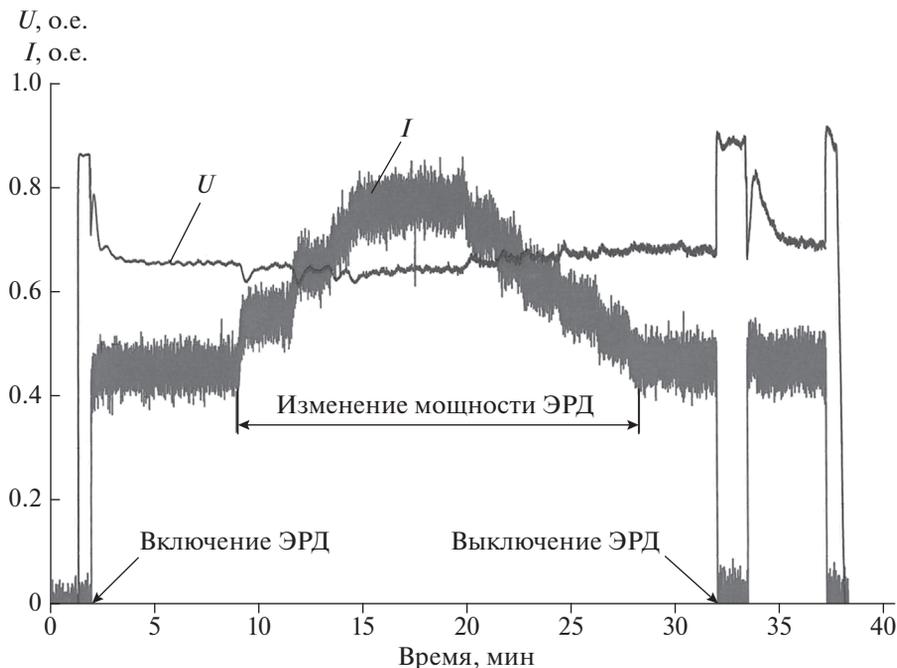


Рис. 11. Ток разряда (I) и напряжение постоянного тока (U) ЭРД (здесь и далее значения параметров по оси ординат приведены в безразмерных относительных единицах, о.е.).

цессов, которые могут возникнуть при работе кластера [20, 21] из нескольких одновременно работающих ЭРД и оказать влияние на функционирование замкнутого контура преобразования энергии и аппаратуру СПРЭЭ, в исследованиях был задействован только один двигатель ИД-200.

Выход на режим генерации электрической мощности осуществлялся при вращении ротора ТКГ от СОЗ с постепенным повышением температуры нагрева рабочего тела замкнутого контура на входе в турбину. После перехода на режим генерации электрической мощности СОЗ автоматически отключалась и подключалась регулируемая балластная нагрузка, обеспечивающая поддержание заданной частоты вращения ротора ТКГ. Достижение электрической мощности замкнутого контура преобразования энергии, необходимой для работы ЭРД, обеспечивалось повышением температуры рабочего тела на входе в турбину до 1150 К.

Циклограмма совместной работы ЭРД и замкнутого контура газотурбинной системы преобразования энергии, реализованная в ходе исследований, включала следующие характерные для функционирования космических ЭДУ режимы (рис. 11): включение ЭРД, работа на стационарном режиме, работа при изменении мощности ЭРД посредством изменения расхода ксенона и тока разряда, выключение ЭРД. Также были выполнены повторное включение и выключение ЭРД с последующим замером тяги.

Перед включением ЭРД вся электрическая мощность, вырабатываемая генератором ТКГ замкнутого контура газотурбинной системы преобразования энергии, утилизируется балластной нагрузкой. В момент включения ЭРД происходит ступенчатое увеличение мощности, подключенной к генератору ТКГ, что приводит к торможению его ротора (рис. 12а; здесь и далее отметки времени соответствуют циклограмме на рис. 11). Автоматический регулятор БН, исходя из невязки между заданной и текущей

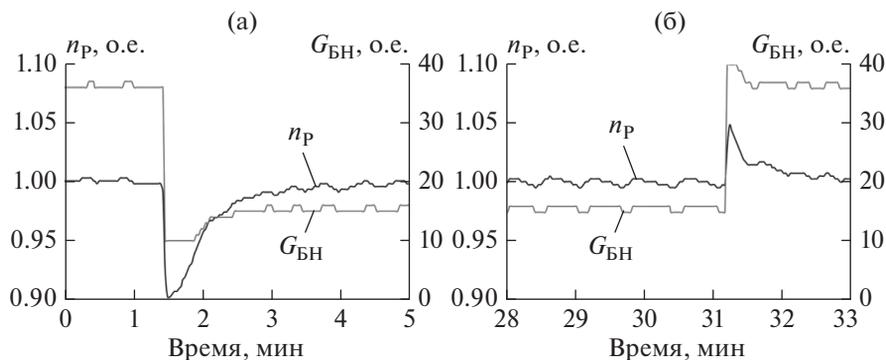


Рис. 12. Изменение частоты вращения ротора ТКГ (n_p) и проводимости балластной нагрузки ($G_{БН}$) при включении (а) и выключении (б) ЭРД.

частотой вращения, осуществляет снижение проводимости и, соответственно, мощности подключенной балластной нагрузки до тех пор, пока не прекратится снижение частоты вращения ротора ТКГ. После начала роста частоты вращения осуществляется постепенное увеличение проводимости и, соответственно, мощности подключенной балластной нагрузки до тех пор, пока частота вращения ротора ТКГ не достигнет заданного значения. Далее проводимость подключенной балластной нагрузки поддерживается на уровне, на котором суммарная электрическая мощность БН и включенного ЭРД соответствовала мощности, вырабатываемой генератором, что обеспечивало поддержание заданной частоты вращения ротора ТКГ.

В момент включения ЭРД происходит ступенчатое снижение мощности, подключенной к электрогенератору ТКГ, что приводит к разгону его ротора (рис. 12б). Автоматический регулятор БН ступенчато увеличивает проводимость и, соответственно, мощность подключенной балластной нагрузки до тех пор, пока не прекратится повышение частоты вращения ротора ТКГ. После начала снижения частоты вращения осуществляется постепенное уменьшение проводимости и, соответственно, мощности подключенной балластной нагрузки до тех пор, пока частота вращения ротора ТКГ не достигнет заданного значения.

Работа автоматического регулятора БН по поддержанию частоты вращения ротора ТКГ при изменении мощности ЭРД, осуществляемой изменением расхода ксенона через двигатель, иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 13.

Данные рис. 12 и 13 показывают высокую эффективность реализованного способа поддержания заданной частоты вращения ротора ТКГ с использованием регулируемой балластной нагрузки. Так, при включении и выключении ЭРД на уровне электрической мощности, составляющей $\approx 50\%$ от вырабатываемой замкнутым контуром преобразования энергии, начальное отклонение частоты вращения ротора ТКГ от заданного значения составляет не более $\pm 10\%$, а длительность переходных процессов по восстановлению заданной частоты – не более 2-х минут. При изменении мощности ЭРД максимальное отклонение частоты вращения ротора ТКГ от заданного значения составляет не более $\pm 3\%$, а на стационарных режимах – не более $\pm 0.5\%$; в таких же пределах изменяется и напряжение постоянного тока, подаваемое аппаратурой СПРЭЭ на ЭРД.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность устойчивой совместной работы замкнутого контура газотурбинного преобразования энергии, аппаратуры СПРЭЭ и ЭРД (рис. 14) на стационарных и на переходных режимах, в том чис-

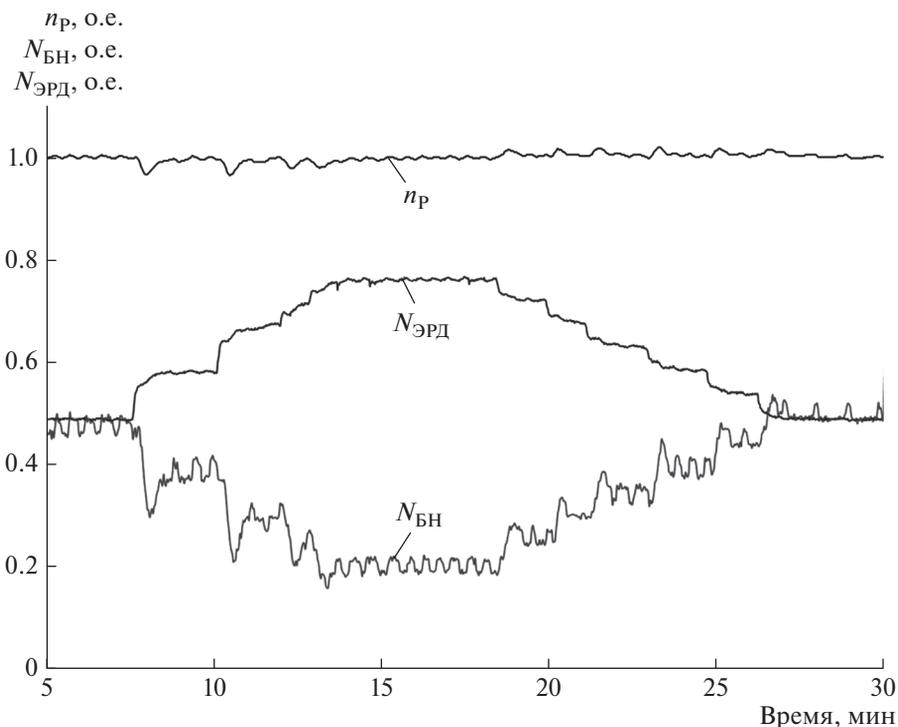


Рис. 13. Изменение мощности на балластной нагрузке ($N_{\text{БН}}$) и частоты вращения ротора ТКГ (n_p) при изменении мощности ЭРД ($N_{\text{ЭРД}}$).

ле при включении и отключении ЭРД. Реализованный при этом способ поддержания частоты вращения ротора ТКГ и, соответственно, напряжения вырабатываемого переменного тока посредством регулируемой балластной нагрузки показал свою эффективность и не внес никаких дополнительных особенностей в работу ЭРД и аппаратуры СПРЭЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка, создание и эксплуатация мощных энергодвигательных установок связаны с необходимостью взаимной увязки функционирования их основных составных частей — газотурбинной системы преобразования энергии, электроракетных двигателей, а также аппаратуры системы преобразования и распределения электрической энергии. Эти составные части являются сложными техническими системами, которые могут оказывать взаимное влияние на работу друг друга, что, в случае недостаточного учета этого влияния, может привести к неустойчивой работе ЭДУ в целом. В связи с этим в ходе экспериментальной отработки целесообразно проведение достаточного объема предварительных стыковочных испытаний с использованием функциональных имитаторов как газотурбинной системы преобразования энергии, так и ЭРД. Полученные в ходе таких испытаний экспериментальные данные, в том числе по их возможному взаимному влиянию, позволят оптимизировать логику управления, процедуру и последовательность проведения совместных испытаний системы газотурбинного преобразования энергии и электроракетных двигателей, минимизировать

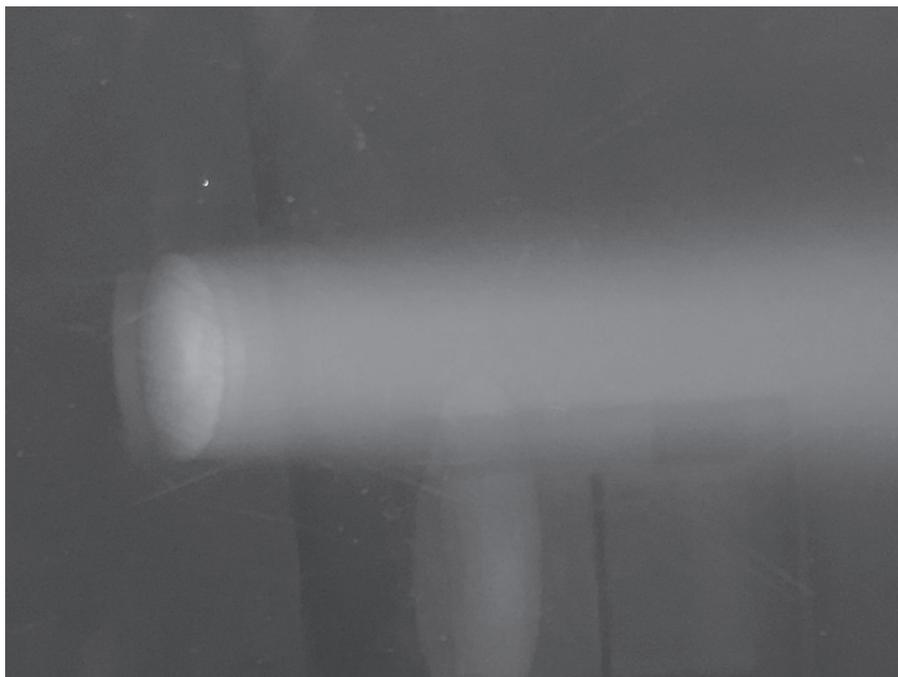


Рис. 14. Работа ЭРД от замкнутого контура газотурбинного преобразования энергии и аппаратуры СПРЭЭ.

технический риск возникновения нештатных и аварийных ситуаций в ходе их проведения, что особенно актуально для мощных ЭДУ с ядерными источниками энергии.

Такая последовательность испытаний была апробирована в ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” при проведении экспериментальных исследований совместной работы электродвигателей, газотурбинной системы преобразования, а также аппаратуры СПРЭЭ. Проведенные исследования продемонстрировали возможность устойчивого совместного функционирования ЭРД, газотурбинной системы преобразования энергии и аппаратуры СПРЭЭ на характерных для работы космических ЭДУ переходных и стационарных режимах. Реализованный при этом способ поддержания частоты вращения ротора турбокомпрессора-генератора и, соответственно, напряжения вырабатываемого переменного тока посредством регулируемой балластной нагрузки показал свою эффективность и не внес никаких дополнительных особенностей в работу ЭРД и аппаратуры СПРЭЭ.

В дальнейшем работы могут быть продолжены в направлении исследования процессов, возникающих при совместном функционировании газотурбинной системы преобразования энергии, аппаратуры СПРЭЭ и кластера из нескольких одновременно работающих ЭРД, в том числе в течение длительного (десятки и сотни часов) времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротеев А.С. и др.* Ядерная энергодвигательная установка космического аппарата // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 5. С. 45–59.
2. Prometheus Project Final Report // National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, CA Pasadena 982–R120461, 2005.

3. *McGuire M.L., Martini M.C., Packard T.W., Weglian J.E., and Gilland J.H.* Use of high-power Brayton nuclear electric propulsion (NEP) for a 2033 Mars round-trip mission // NASA/TM Paper No. 2006–214106.
4. *Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.-M., Worms J.-C., Detsis E., Lassoudiere, F., Granjon R., Gaia E., Tosi M.C., Koroteev A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Tinsley T., Hodgson Z., Guimarães L.N.F.* Step-by-step Realization of the International Nuclear Power and Propulsion System (INPPS) Mission // 66th International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel, 2015, IAC–15–C4.7–C3.5.
5. *Zakharenkov L.E., Semenkin A.V., Solodukhin A.E.* Concept of Electric Propulsion Realization for High Power Space Tug // Достижения в физике реактивного движения. Сер. “Eucass advances in aerospace sciences book series”, Progress in propulsion physics. Vol. 8, Moscow: TORUS PRESS, 2016. С. 165–180.
6. *Hervol D., Mason L., Birchenough A., Pinero L.* Experimental Investigations From the Operation of a 2 kW Brayton Power Conversion Unit and a Xenon Ion Thruster // NASA/TM–2004–212960.
7. *Jansen F., Detsis E., Bauer W., Cliquet E., Gaia E., Hodgson Z., Koroteev A.S., Masson F., Semenkin A.V., Tinsley T., Tosi M.C., Ruault J.-M., Worms J.-C.* MEGAHIT Roadmap. http://cordis.europa.eu/result/rcn/169848_en.html.
8. *Jansen F., Bauer W., Masson F., Ruault J.-M., Worms J.-C., Detsis E., Lassoudiere F., Granjon R., Gaia E., Tosi M.C., Koroteev, A.S., Semenkin A.V., Tinsley T., Hodgson Z., Koppel Ch., Guimarães L.N.F.* DEMOCRITOS Demonstrators for Realization of Nuclear Electric Propulsion of the European Roadmaps MEGAHIT & DiPoP // Special Issue of Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (JSASS) for the Joint Conference 30th ISTS, 34th IEPC & 6th NSAT, submitted (2015).
9. *Oriol S., Masson F., Tinsley T., Stainsby R., Hodgson Z., Detsis E., Worms J.-C., Koroteev A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E., Jansen F., Bauer W., Ferraris S., Tosi M. C., Muszynski M., Lassoudiere F.* DEMOCRITOS: Development Logic for a Demonstrator Preparing Nuclear-Electric Spacecraft // Nuclear and Emerging Technologies for Space, Huntsville, Alabama, February 22–25, 2016.
10. *Birchenough A., Hervol D.* Operational Results From a High Power Alternator Test Bed // NASA/TM–2007–214708.
11. *Baez N., Birchenough A., Lebron-Velilla R.* Description of the Prometheus Program Alternator/Thruster Integration Laboratory (ATIL) // NASA/TM–2005–213895.
12. *Иголкин А.А.* Анализ и синтез мехатронных систем управления энергетических установок [Электронный ресурс]: электрон. учебн. пособие. Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2011.
13. *Koroteev A.S. et al.* Test Bench for Key Components of Megawatt Class International Power and Propulsion System Ground Demonstration // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), Milan, Italy, July 3–7, 2017.
14. Патент 2502975 РФ. МПК G01M 15/00. Стенд для испытаний мощного высокооборотного агрегата/ Заявитель и патентообладатель Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша” (ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”). №2013103632/06; заявл. 29.01.2013; опубл. 27.12.2013 // Бюл. № 36.
15. Патент на полезную модель 119555 РФ. МПК H05B 3/40. Электрический нагреватель газа/ Заявитель и патентообладатель Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша” (ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”). №2011153459, заявл. 27.12.2011; опубл. 20.08.2012 // Бюл. № 23.
16. Патент 2677258 РФ. МПК H02J 3/12. Способ управления автономной энергоустановкой (варианты) / Заявитель и патентообладатель Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие “Исследовательский центр им. М.В. Келдыша” (ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”). № 2017135636, заявл. 05.10.2017; опубл. 16.01.2019. // Бюл. № 2.
17. *Gorshkov O.A., Ilyin A.A., Rizakhanov R.N.* New Large Facility for High-Power Electric Propulsion Tests // Proceedings of the 6th Propulsion for Space Transportation of the XXI Century Symposium, Paper S20_2, Versailles, France, 2002.
18. *Koroteev A.S., Lovtsov A.S., Muravlev V.A., Selivanov M.Y., Shagayda A.A.* Development of Ion Thruster IT-500 // The European Physical Journal D - Atomic, Molecular and Optical Physics, 2017. v. 71. № 5. p. 311.
19. *Lovtsov A.S., Shagayda A.A., Muravlev V.A., Selivanov M.Y.* Ion Thrusters Development for a Transport and Power Generation Module Project // IEPC–2015–291, 2015.
20. *Zakharenkov L.E., Semenkin A.V., Garkusha V.I., Lebedev Y.V.* Study of the 3-TAL Thruster Assembly Operation // IEPC–2005–185, 2005.
21. *Zakharenkov L.E., Semenkin A.V.* Multi-thruster Electric Propulsion System architecture and ways of simultaneously operating thrusters interaction // EUCASS, 2011, ID 651.

Joint Operation of Electric Propulsion and Closed Brayton Cycle Power Conversion Unit as Parts of Space Power and Propulsion System

A. S. Koroteev^a, K. V. Gotovtsev^a, L. E. Zakharenkov^a, A. V. Karevskiy^{a, *}, A. S. Lovtsov^a,
Yu. A. Oshev^a, M. Yu. Selivanov^a, A. V. Semenin^a, and A. E. Solodukhin^a

¹*SSC Keldysh Research Centre, Moscow, Russia*

**e-mail: kerc@elnet.msk.ru*

Expansion of near-Earth and deep space activity requires increasing spacecraft power and thrust level. For these missions the use of space vehicles with high power nuclear system based on closed Brayton cycle power conversion unit and highly efficient electric propulsion is considered. This paper presents an approach to organization of power and propulsion systems experimental testing. This approach provides adequate amount of preliminary integration tests of power and propulsion system main components using their functional simulators and mock-ups. It was approved in the State Scientific Centre of RF Keldysh Research Centre during experimental study of joint operation of closed Brayton cycle power conversion unit and electric propulsion. Results of carried out studies demonstrated the possibility of stable joint operation of electric propulsion and closed Brayton cycle power conversion unit, both at steady and transient modes, which are typical for space power and propulsion systems.

Keywords: closed Brayton cycle power conversion unit, turboalternator- compressor, electric propulsion, experimental testing, power and propulsion system