

## КОНКУРСНАЯ РАБОТА

Для участия в конкурсе «Авиастроитель года» представляется работа, выполненная в 2017г. авторским коллективом:

АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», г. Москва: Клочков В.О., Потапов А.Ю., Могильда А.П., Тур В.В., Перевозов В.В;

Филиал МКБ «Горизонт» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют»: Кужель О.С., Локтев Г.В., Уриатмкопели С.О.;

АО «ОДК», г.Москва: Кудашкин А.В.;

ООО «Электротяжмаш – Привод», Пермский край , г.Лысьва: Гусельников Н.Л.

**«Создание универсального испытательного стенда с использованием Российского импортозамещающего оборудования и проведение испытаний газотурбинных приводов (отечественного и иностранного производства) для кораблей ВМФ России, газоперекачивающих агрегатов и турбогенераторов».**

При производстве новых или после выполнения ремонта газотурбинных приводов, перед передачей Заказчику, необходимо проведение испытаний изделия на стенде.

Традиционно испытательные стенды имеют однозначную направленность на проведение испытаний приводов конкретного типа -корабельных, энергетических или газоперекачивающих - определяемую системой нагружения.

При испытаниях корабельного двигателя нагрузочные характеристики силовой турбины ГТД должны изменяться в «кубическом» соотношении мощности от числа оборотов. Данный закон реализуется при использовании в качестве нагрузочного устройства гидротормоза.

При испытаниях энергетических приводов применяются серийные промышленные турбогенераторы , подключенные к энергосистеме или автономной нагрузке.

При испытаниях приводов для газоперекачивающих агрегатов нагрузочные характеристики силовой турбины ГТД должны изменяться в «квадратичном» соотношении мощности от числа оборотов. Частичная проверка режимов испытаний приводов газоперекачивающих агрегатов, может быть реализована с применением редуктора, обеспечивающего согласование числа оборотов ГТД и турбогенератора или гидротормоза.

Выполняя поручение АО «Объединенной двигателестроительной корпорации», в период 2015-2016 г.г.в АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» был создан универсальный – единственный в Российской Федерации - стенд для испытаний приводов на базе газотурбинных двигателей различного назначения мощностью до 32 МВт и числом оборотов выходного вала ГТД от 700 до 10500 об/мин.

Принятые технические решения при создании универсального стенда с использованием отечественного оборудования позволяют проводить полноразмерные испытания всех газотурбинных приводов (в том числе и иностранного производства), предназначенных для кораблей ВМФ России, приводов газоперекачивающих агрегатов и турбогенераторов.

Было разработано техническое задание на доработку серийно – выпускаемого синхронного турбогенератора с расширенным диапазоном эксплуатационных , теплотехнических и электрических параметров.

После доработки серийного синхронного турбогенератора с электрической мощностью 32000 кВт, выполненной ООО «Электротяжмаш – Привод», при работе на автономную активную балластную нагрузку допускается продолжительная работа в прямом и обратном направлении, при изменении частоты вращения ротора в диапазоне от 3600 до 700 об/мин, с изменением напряжения и частоты по закону регулирования  $U/f=Const$ , что обеспечивает «квадратичный» и «кубичный» законы изменения мощности от числа оборотов. С целью повышения пропускной способности стенда для присоединения испытуемых ГТД используются два рабочих конца вала ротора турбогенератора.

По результатам проведенного комплекса опытно – конструкторских работ АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» подал заявку в «Федеральный институт промышленной собственности» (ФИПС) на изобретение «Стенд для испытаний газотурбинных двигателей» регистрационный № 2016128745 от 14.07.2016 г., по которой 28.06.2017 г. был выдан патент № 2623635.

В соответствии с формулой изобретения в состав нагрузочного устройства стенда входит синхронный реверсивный турбогенератор (вал ротора которого соединяется с валом свободной силовой турбины испытуемого ГТД) с независимой системой возбуждения, имеющей два канала управления возбуждением , один из которых предназначен для управления на режиме «прямой ход», а другой – на режиме «реверс». Система возбуждения подключена к электрической цепи обмоток ротора, а статорные электрические цепи подсоединены к автономной активной нагрузке. В состав стенда входит датчик частоты вращения вала ротора, связанный с системой управления стендом, подключенной к системе возбуждения.

Для обеспечения закона регулирования с изменением величины генерируемой мощности от числа оборотов по любому закону (включая «квадратичный» и «кубичный»), система возбуждения подключена через трансформатор к внешней сети и работает в независимом режиме от величины изменяемой мощности синхронного турбогенератора.

Для этого в стандартной системе возбуждения доработан блок, воздействующий на величину тока ротора (соответственно, на величину напряжения статорной цепи турбогенератора, присоединенной к автономной балластной нагрузке, входящий в состав нагрузочного устройства стенда) в зависимости от числа оборотов силовой турбины с реализацией зависимости  $P \equiv \sqrt[2]{n}$  или  $P \equiv \sqrt[3]{n}$ .

Доработка системы возбуждения нагрузочного устройства стенда выполнена специалистами АО «НИИЭлектромаш» (г.С-Петербург).

В системе возбуждения турбогенератора реализован алгоритм динамического торможения ротора ТГ с подключением активной балластной нагрузки к статору турбогенератора по унифицированному аналоговому сигналу пропорционально частоте вращения турбогенератора. Система возбуждения обеспечивает ввод основных параметров испытаний ( величина номинальной активной мощности в зависимости от числа оборотов при вращении ротора в прямом и обратном направлении, в том числе, переход через «о» числа оборотов).

В состав нагрузочного устройства универсального стенда входит бесступенчатая активная балластная нагрузка. В качестве основного конструктивного элемента балластной нагрузки принята лента из сплава фехрала или никрома с практически постоянной (в диапазоне рабочих температур от +300 до 1000<sup>0</sup>С (600К...1300К) величиной удельного электрического сопротивления.

Величина электрической мощности, излучаемой с единицы поверхности ленты (работающей в режиме нагревателя), пропорциональна напряжению на шинах балластной нагрузки. Поэтому, плавно изменяя напряжение в системе возбуждения на обмотках ротора турбогенератора, можно плавно изменять напряжение на обмотках статора и, соответственно, мощность электрической нагрузки, что значительно упрощает процесс нагружения испытуемого ГТД.

Стоимость основного оборудования нагрузочного устройства универсального стенда при электрической мощности турбогенератора 32000 кВт.

- 1.Турбогенератор типа Т-25-2-3-РУЗ, год изготовления 2016 г. (поставщик ООО «Электротяжмаш - Привод») – стоимость 97 млн руб.
- 2.Система возбуждения турбогенератора типа КВСГОС-ВЕ-220-600-Д22-ЗУХЛ4 находится в эксплуатации с 2005 г. с доработкой АО «НИИЭлектромаш» (г.С-Петербург)- стоимость доработки 5 млн руб.
- 3.Балластная нагрузка с электрической мощностью 32000кВт – бесступенчатая трехфазная, работающая в режиме нагревателя, мощность которого регулируется за счет изменения температуры излучающей поверхности металлического проводника (лента из сплава фехраль) – эксплуатируется с 2005 года, затраты на модернизацию 3 млн руб.

В приложении представлена блок – схема универсального стенда для испытаний газотурбинных двигателей. На стенде возможно испытание газотурбинных двигателей с подсоединением силовой турбины испытуемого ГТД к любому из концов вала ротора турбогенератора (места «1» и «2»). На 1-м рабочем месте могут испытываться ГТД с числом оборотов от 700 до 3600 мин<sup>-1</sup>, на 2-м рабочем месте с редуктором – могут испытываться ГТД с числом оборотов от 3600 до 10500 мин<sup>-1</sup>. Направление вращения силовой турбины ГТД – любое (левое или правое), в том числе – работа в реверсивном режиме. В блок – схему стенда включен реверсивный синхронный турбогенератор 3, статорные цепи которого через выключатель 4 подключены к

шинам автономной балластной нагрузки 5, а цепи обмоток ротора подключены к системе возбуждения 6 с питанием от независимой системы электропитания 7 через трансформатор 15. Вал ротора турбогенератора подсоединен напрямую (или через редуктор 2) к валу свободной силовой турбины (1.2 или 1.4) испытываемого газотурбинного двигателя 1. Датчик частоты вращения вала турбогенератора 9 подключен через систему управления стенда 14 к системе возбуждения 6 и к сектору газа (13.1 или 13.2) газотурбинного двигателя.

#### Алгоритм работы стенда.

Ротор реверсивного турбогенератора 3 подключен (напрямую или через редуктор) к валу силовой турбины ГТД 1. Испытываемый газотурбинный двигатель запускается штатной системой управления ГТД до режима «холостого хода». После прогрева ГТД начинается его нагружение за счет воздействия на сектор газа и включения системы возбуждения с повышением напряжения возбуждения на обмотках ротора ТГ. Статорное напряжение подается на автономную балластную нагрузку. За счет изменения напряжения на статорных шинах ТГ можно плавно изменить нагрузку ГТД от 0 до номинальной мощности в зависимости от заданного алгоритма изменения частоты вращения вала турбогенератора («квадратичный», «кубичный» или любой другой закон изменения).

При повышении или снижении мощности в автоматическом режиме, изменяется частота вращения вала свободной турбины.

Выполнение стенда для испытания газотурбинных двигателей различного назначения (судовых, газоперекачивающих, энергетических) с использованием турбогенератора, работающего на автономную балластную нагрузку, обеспечивает по сравнению с гидротормозом, значительно меньшие масса – габаритные показатели, с соответствующим уменьшением производственных площадей для размещения оборудования стенда, простоту и надежность обслуживания. Реализованный режим сброса электрической мощности на балластной нагрузке за счет излучения практически исключает затраты на организацию принудительного охлаждения оборудования, обеспечивающего энергосъем с нагрузочного устройства. При этом управление испытательным стендом переводится из области гидродинамики в область электротехники, что значительно упрощает процедуру проведения испытаний и повышает точность измерений теплотехнических параметров ГТД.

#### Хронология реализации проекта:

Техническое предложение на модернизацию стенда Филиала МКБ «Горизонт» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» для проведения испытаний газотурбинных двигателей различного назначения разработано в соответствии с приказом № 68 от 24.02.2015 Генерального директора ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» (ныне АО «НПЦ газотурбостроения «Салют») Масалова В.Е.

Летом 2016 г. компания ООО «Электротяжмаш – Привод» изготовила и поставила на стенд турбогенератор типа Т-25-23РУЗ-ГВ, изготовленный по техническому заданию АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

В сентябре 2016 г. были проведены пусконаладочные работы и приемка турбогенератора в эксплуатацию в составе модернизированного универсального стенда.

В декабре 2016 г. на стенде были проведены предъявительские и приемосдаточные испытания судового ГТД типа М90ФР (заказчик ПАО «НПО «Сатурн», ВМФ РФ).

В 2017 г. проводились испытания различных энергетических ГТД с электрической мощностью до 20 МВт.

26.12.2017 года получен Аттестат на испытательный стенд №1 филиала «МКБ «Горизонт».

В конце 2017 г. на стенде проведены предварительные испытания корабельного двигателя М70ФРУ-реверс (Заказчик ПАО «НПО «Сатурн»).

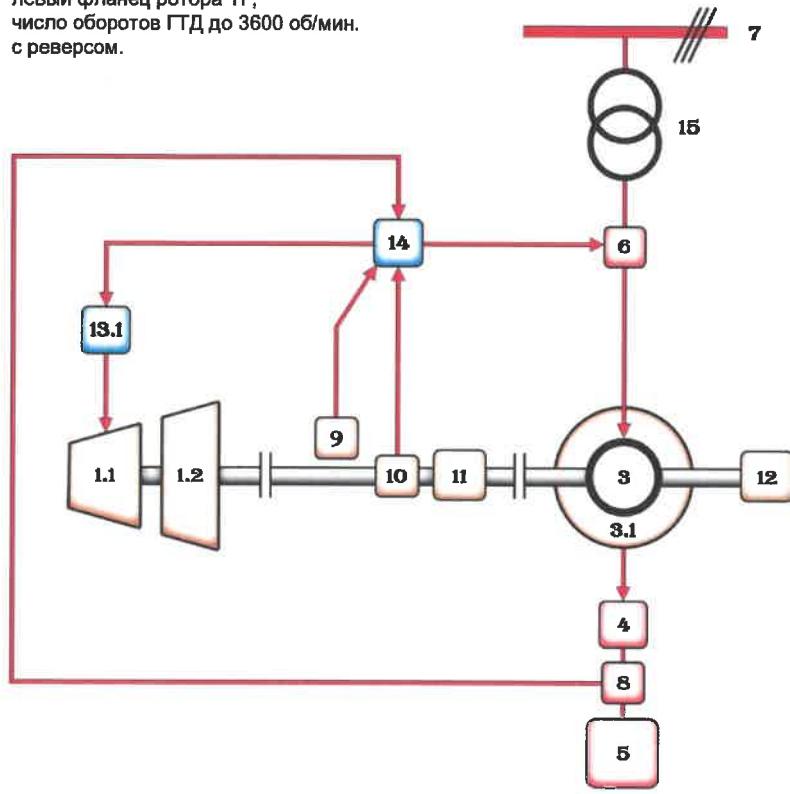
Приложение: блок – схема универсального стенда для испытаний газотурбинных двигателей.

**Приложение**  
к заявке на участие в конкурсе

**Блок-схема универсального стенда для испытаний газотурбинных двигателей.**

**Место 1**

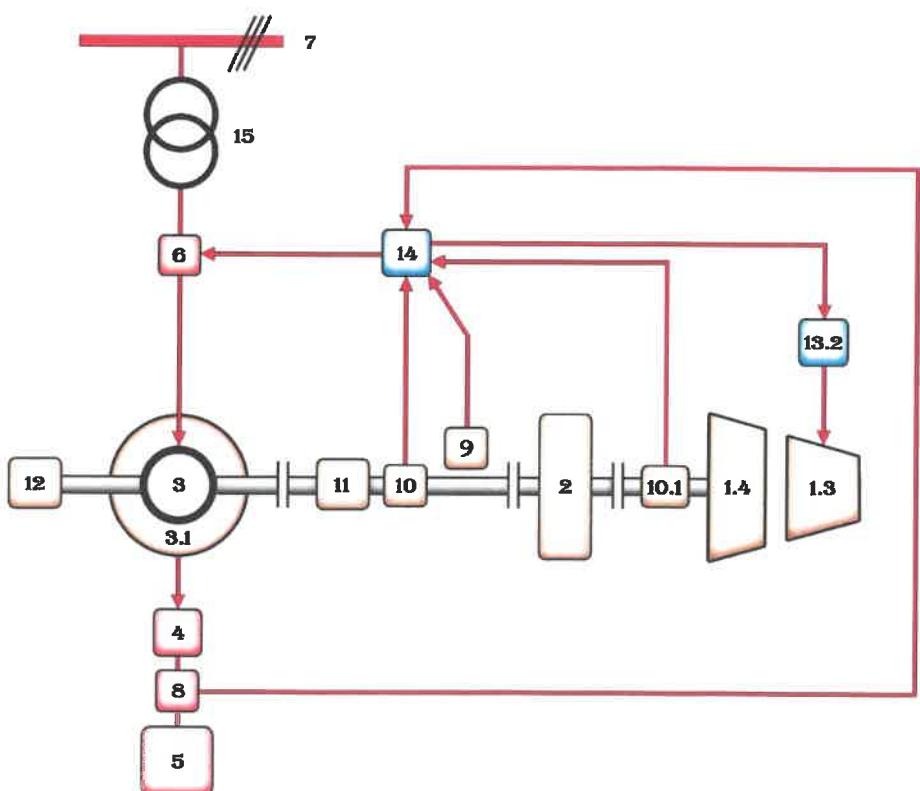
Первое рабочее место стенда - левый фланец ротора ТГ, число оборотов ГТД до 3600 об/мин. с реверсом.



- 1.1; 1.3 - газогенератор ГТД;
- 1.2; 1.4 - силовая турбина ГТД;
- 2 - редуктор (2.1-  $i=1.475$ ; 2.2-  $i=2.194$ ; 2.3-  $i=2.923$ );
- 3 - ротор турбогенератора;
- 3.1 - статор турбогенератора;
- 4 - высоковольтный выключатель;
- 5 - балластная нагрузка;
- 6 - система возбуждения;
- 7 - внешняя сеть 10,5 кВ;
- 8 - измеритель электрической мощности;
- 9 - датчик числа оборотов;
- 10; 10.1 - измеритель крутящего момента;
- 11 - муфта предельного момента;
- 12 - пневмомотороз;
- 13 - сектор газа ГТД;
- 14 - система управления стенда;
- 15 - трансформатор

**Место 2**

Второе рабочее место стенда - правый фланец ротора ТГ, число оборотов ГТД от 3600 об/мин. до 10500 об/мин. с реверсом.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2623625

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ

Патентообладатель: Акционерное общество "Научно-производственный центр газотурбостроения "Салют" (АО "НПЦ газотурбостроения "Салют") (RU)

Авторы: Туя Виктор Васильевич (RU), Потапов Алексей Юрьевич (RU), Кужель Олег Станиславович (RU), Могильда Анатолий Павлович (RU), Матюхин Николай Федорович (RU), Зайцев Валерий Миронович (RU)

Заявка № 2016128745

Приоритет изобретения 14 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 июня 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 14 июля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11) 2 623 625<sup>(13)</sup> С1

(51) МПК  
G01M 15/14 (2006.01)  
F02C 9/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21)(22) Заявка: 2016128745, 14.07.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
14.07.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.07.2016

(45) Опубликовано: 28.06.2017 Бюл. № 19

Адрес для переписки:

105118, Москва, пр-кт Буденного, 16, корп. 2, АО  
"Научно-производственный центр газотурбостроения  
"Салют", директору по  
правовым вопросам и корпоративному  
управлению В.В. Никулину

(72) Автор(ы):

Тур Виктор Васильевич (RU),  
Потапов Алексей Юрьевич (RU),  
Кужель Олег Станиславович (RU),  
Могильда Анатолий Павлович (RU),  
Матюхин Николай Федорович (RU),  
Зайцев Валерий Миронович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Научно-  
производственный центр газотурбостроения  
"Салют" (АО "НПЦ газотурбостроения  
"Салют") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 113838 U1, 27.02.2012. RU  
2318195 C2, 27.02.2008. RU 2316665 C1,  
10.02.2008. US 6717282 B1, 06.04.2004.

(54) СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

R U 2 6 2 3 6 2 5 C 1

R U 2 6 2 3 6 2 5

C 1

(57) Формула изобретения

1. Стенд для испытаний газотурбинных двигателей, включающий нагружочное устройство, имеющее возможность соединения с валом свободной силовой турбины испытуемого газотурбинного двигателя, отличающейся тем, что в качестве нагружочного устройства использован синхронный реверсивный турбогенератор, вал ротора которого имеет возможность соединения одним концом с валом свободной силовой турбины испытуемого газотурбинного двигателя, причем стенд оснащен системой возбуждения турбогенератора, автономной активной балластной нагрузкой и командным блоком, статорные электрические цепи турбогенератора имеют возможность подключения к автономной активной балластной нагрузке, электрические цепи обмоток ротора турбогенератора подключены к системе возбуждения, при этом турбогенератор содержит датчик частоты вращения его вала, связанный с командным блоком, подключенным к системе возбуждения и имеющим возможность подключения к сектору газа испытуемого газотурбинного двигателя.

2. Стенд по п. 1, отличающейся тем, что он оснащен тормозным устройством, установленным на другом, свободном конце вала синхронного реверсивного турбогенератора.

3. Стенд по п. 2, отличающейся тем, что тормозное устройство связано с командным блоком.

4. Стенд по п. 1, отличающейся тем, что на другом, свободном конце вала ротора синхронного реверсивного турбогенератора установлен редуктор для соединения с

валом свободной силовой турбины испытуемого газотурбинного двигателя.

5. Стенд по п. 1, отличающийся тем, что система возбуждения имеет два канала управления, один из которых предназначен для управления возбуждением синхронного реверсивного турбогенератора на режиме «прямой ход», а другой - на режиме «реверс».

6. Стенд по п. 1, отличающийся тем, что он оснащен датчиком измерения величины крутящего момента вала свободной силовой турбины газотурбинного двигателя, установленным в кинематической цепи «вал газотурбинного двигателя - редуктор - вал ротора синхронного реверсивного турбогенератора».

7. Стенд по п. 1, отличающийся тем, что он оснащен измерителем электрической мощности на шинах автономной активной балластной нагрузки, установленным на линии связи выключателя и автономной активной балластной нагрузки.

R U 2 6 2 3 6 2 5 C 1

R U 2 6 2 3 6 2 5 C 1