



СИЛОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ «ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО» САМОЛЁТА направления электрификации технологии проблемы

Гуревич Оскар Соломонович

Заместитель генерального директора ЦИАМ, д.т.н., профессор

Гулиенко Анатолий Иванович

Начальник сектора ЦИАМ, к.т.н.

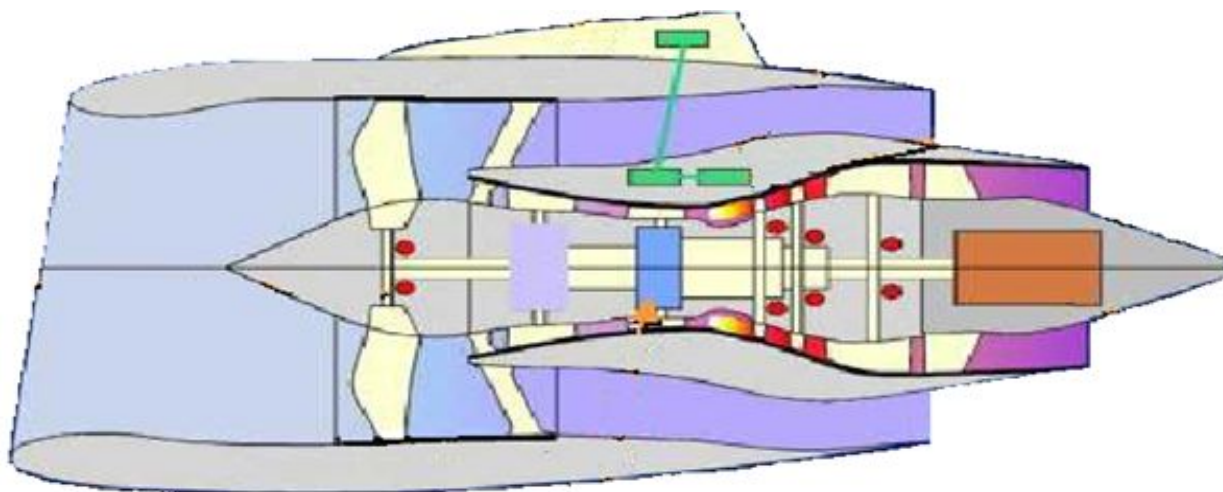
Электрическая энергия для функционирования всех бортовых систем

Основные направления электрификации самолёта

- **Электрические приводы в системах управления полетом**
- Система кондиционирования воздуха с электроприводным компрессором
- **Электрическая противообледенительная система**
- Энергосистема с источниками переменного и постоянного тока с напряжением 270...540В
- **Системы распределения электроэнергии**
- «Электрическая» силовая установка

- **«Электрический» ГТД**
- **Гибридная силовая установка:** создание тяги тепловыми двигателями (ГТД, поршневой) совместно с электроприводными устройствами
- **Создание тяги электроприводными винтами:** питание от электрогенератора с приводом от ГТД или ПД (ЭВСУ)
- **Полностью электрическая СУ** без теплового двигателя: аккумуляторы и (или) топливные элементы для питания электропривода винтов

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ» ГТД



Базовый энергетический узел «электрического» самолета – «электрический» ГТД

- **Конструкция и рабочий процесс ГТД**
- **Системы автоматического управления и топливопитания**
- **Система смазки ГТД**
- **Система запуска ГТД**
- **Система генерации электроэнергии**
- **Способы создания тяги**

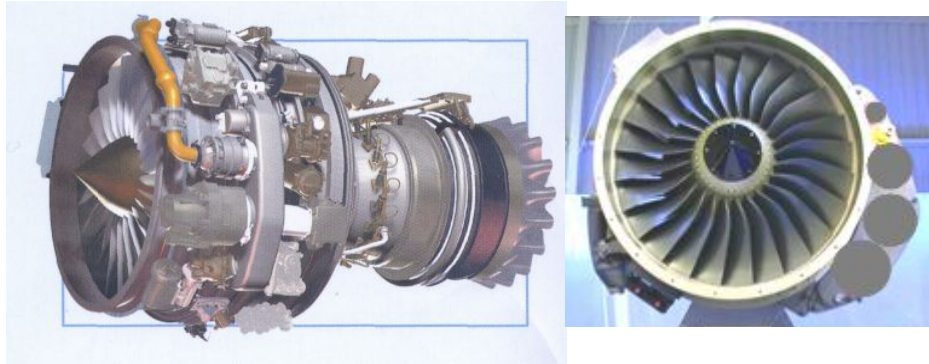
**Система автоматического управления и топливопитания
*распределенной структуры на базе электроприводов***

**Электроприводная система смазки двигателя
или магнитный подвес роторов**

**Оптимизация характеристик двигателя при
уменьшении отбора воздуха, увеличении отбора
механической мощности**

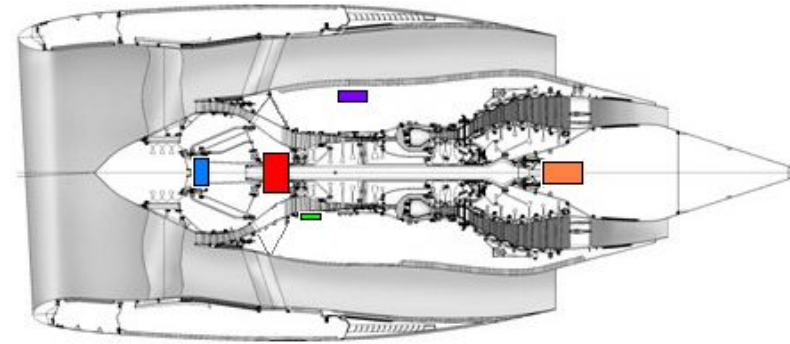
**Оптимизация проточной части двигателя при
размещении встроенных стартера-генератора,
доп. генератора, конструкции без КПА**

Современный ГТД



- Коробка приводов
- Силовые приводы на топливе
- Механические подшипники с системой смазки
- Отбор воздуха для самолётных систем

«Электрический» ГТД



- Без коробки приводов
- Электрические приводы
- Встроенный стартёр-генератор
- Магнитные подшипники
- Без отбора воздуха для ЛА

Современная ВСУ



- Служебный компрессор
 - воздух в СКВ, ПОС
 - воздушный стартёр ГТД
- Электрогенератор
- Маслосистема

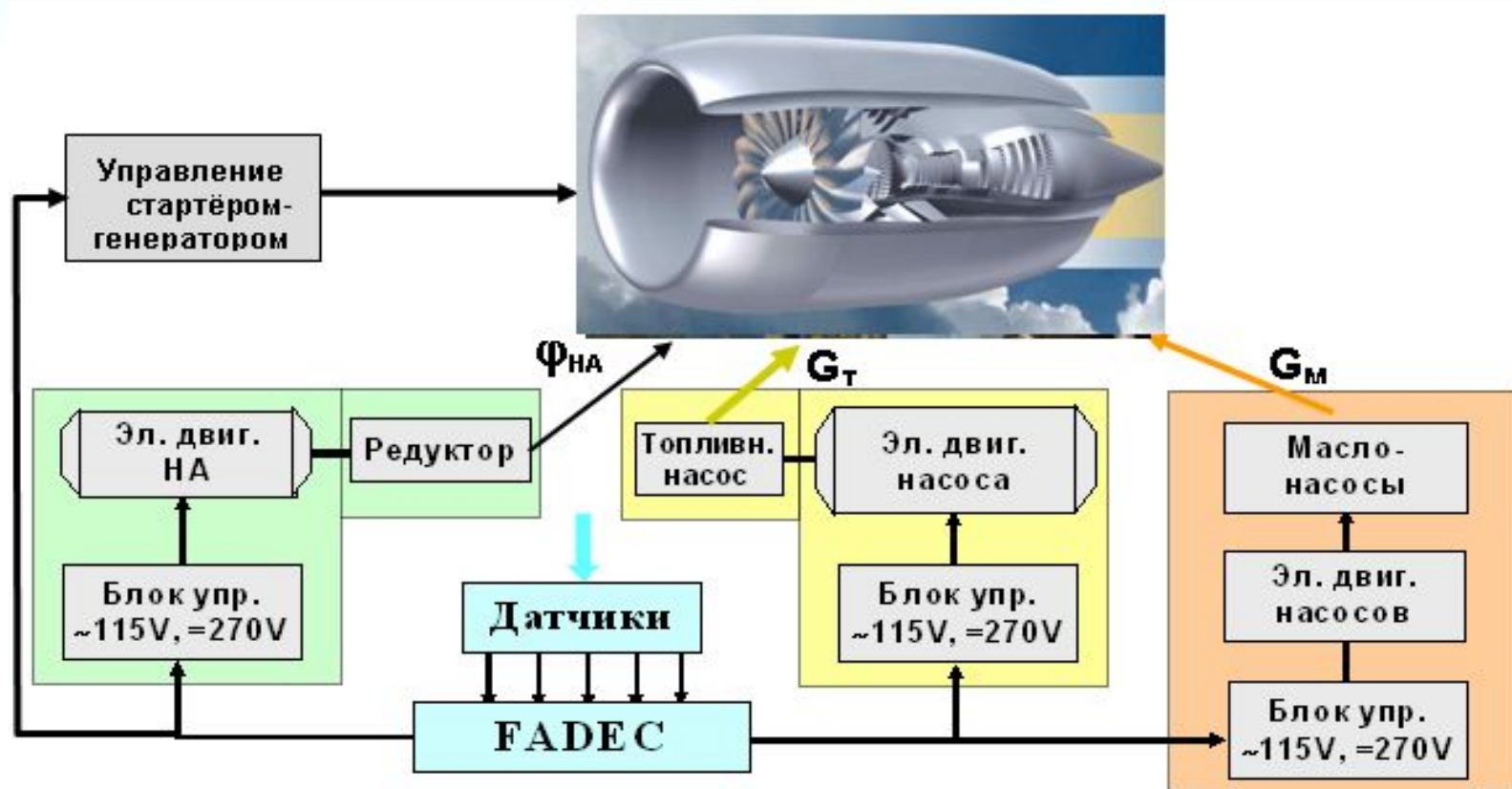
«Электрическая» ВСУ



- Без служебного компрессора
- Электрогенераторы для питания:
 - электропривода СКВ, насосов
 - электрической ПОС
 - электрического стартера марш.дв.
- Газовые или магнитные подшипники

Эффективность:

- Снижение массы
- Снижение стоимости
- Повышение эксплуатационной технологичности



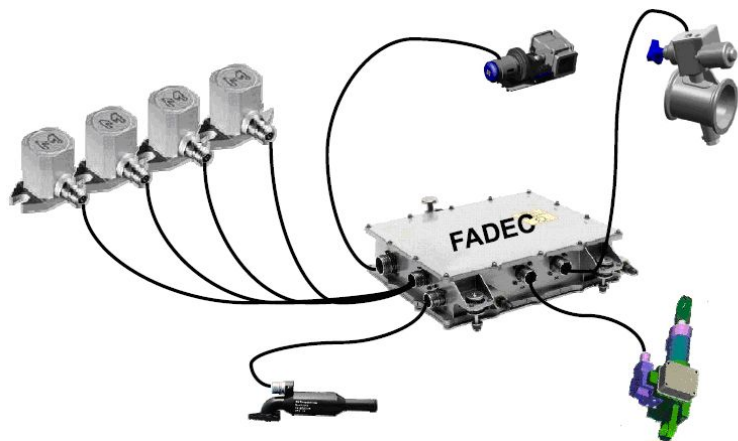
Расширение функций САУ: управление смазкой, подвесом роторов
Распределенная структура: удаленные регуляторы электроприводов

(Переход к новому поколению FADEC)

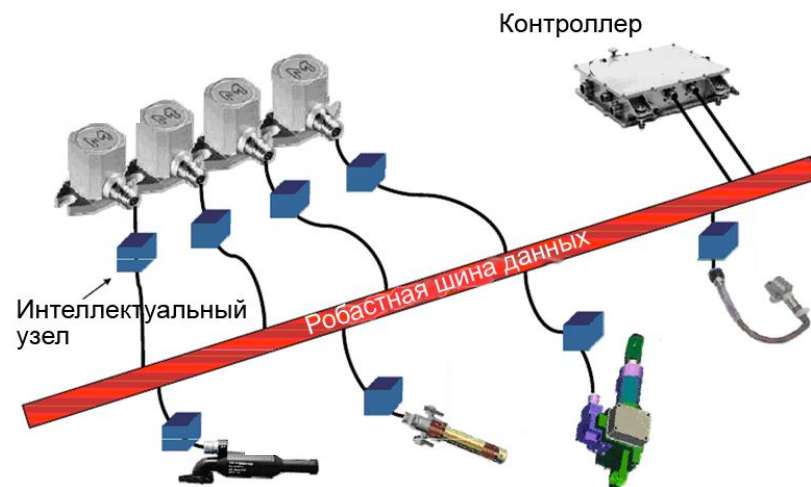
Целевые показатели:

- повышение надежности (в 5...10 раз)
- снижение массы системы (на 20...40%)
- упрощение модернизации и расширения функций
- снижение затрат на эксплуатацию системы (на 30...50%)

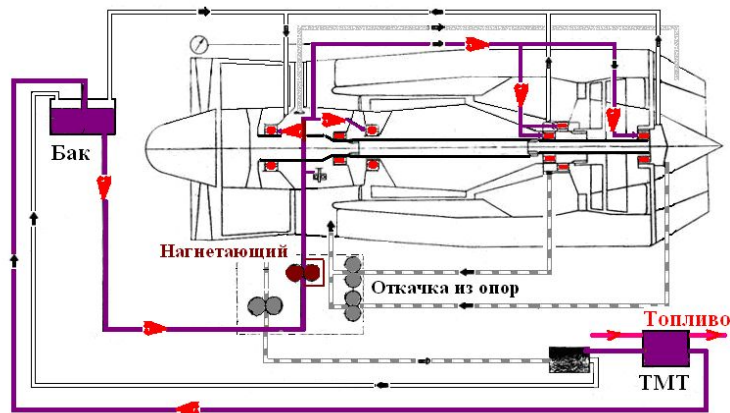
Централизованная архитектура



Распределенная архитектура

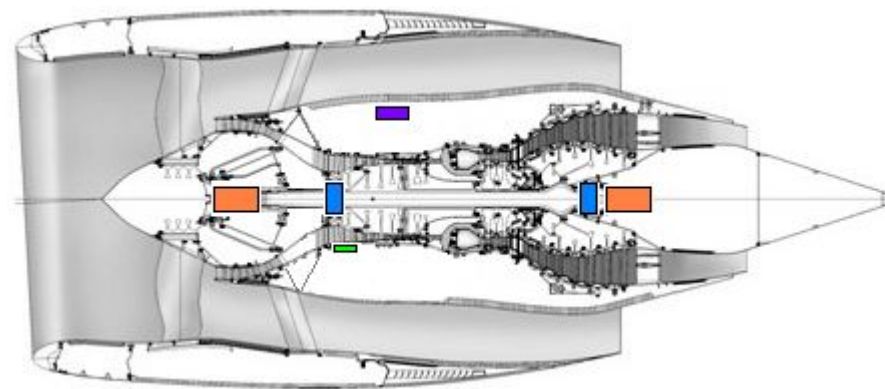


Современный ГТД



- Привод маслонасосов от вала РВД
- Привод суфлёра от вала РВД
- Системы разогрева масла при запуске (при низкой температуре)

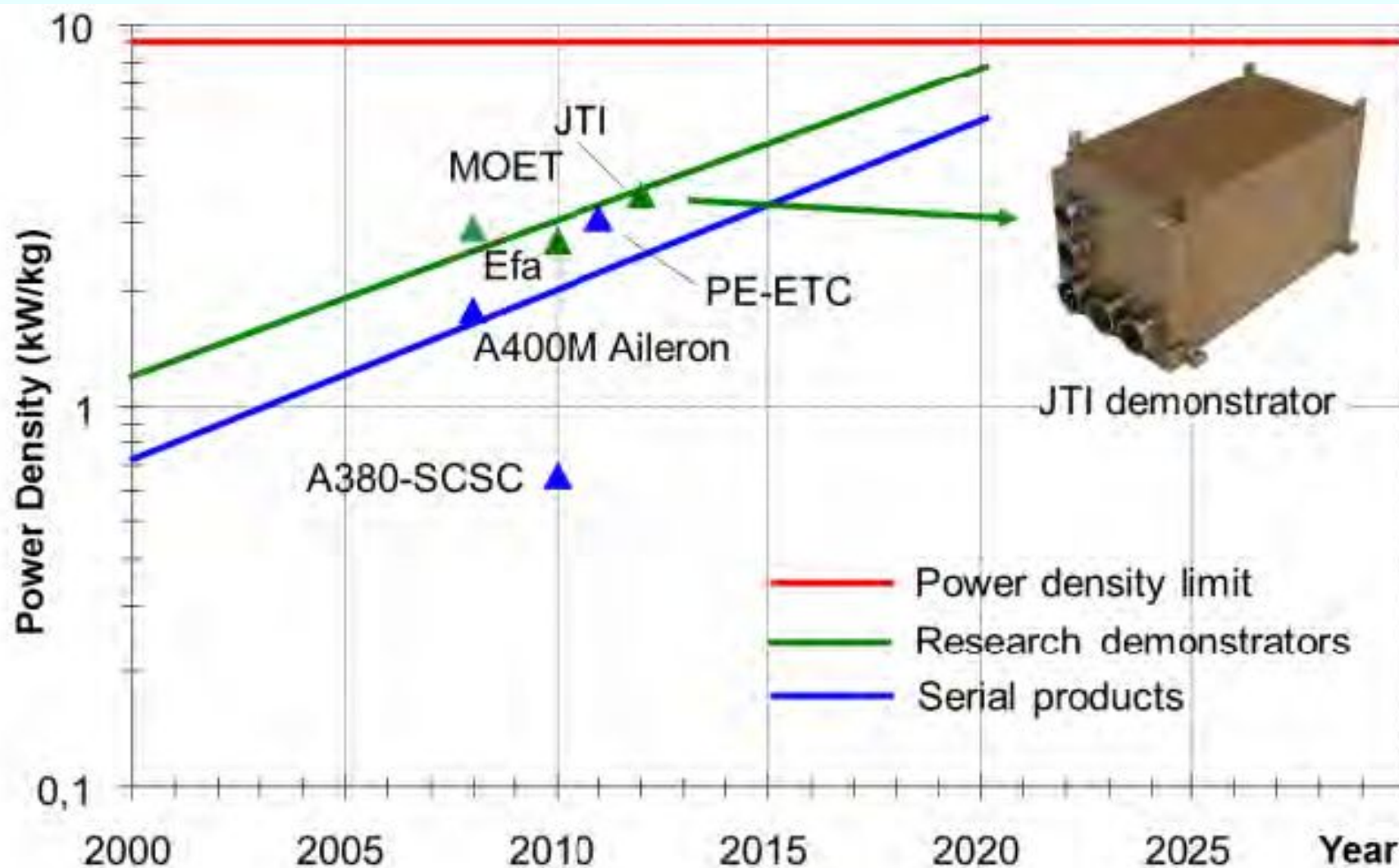
«Электрический» ГТД



- Независимый электропривод нагнетающего и откачивающих насосов
- Электропривод суфлёра
- Опорожнение масляных полостей опор

- Высокоинтегрированная термостойкая электронная элементная база, в т.ч. силовая ($\lambda = 10^{-10} \dots 10^{-12}$ 1/час, $t \geq 150^\circ\text{C}$)
- **Редкоземельные магниты с удельной энергией до 350 кДж/м³**
- Электрические приводы с низкой удельной массой
< 0,2 ... 0,5 кг/кВт
- **Высокооборотные стартеры-генераторы**
до 20000 ... 50000 об/мин,
напряжение = 270 ... 540В,
удельная масса: < 0,2...0,4 кг/кВт
- Магнитные подшипники

Тип устройства	Удельная масса, кг/ кВт			
	2015	2025	2030-35 криогенные	2050 ВТСП
Электроприводы до 20 ... 50 кВт	0.7...1.0	0.2...0.5	0.1 ... 0.15	0.04
Генераторы до 100 ... 150 кВт	0.5...0.6	0.25...0.3	0.1	0.03



- **Концепция «электрического» ГТД**
- **Оценка эффективности**
 - уменьшения отбора воздуха
- **Демонстрационная**
 - электроприводная САУ**
- **Электроприводная топливная система**
- **Электроприводная система смазки**
- **Демонстраторы агрегатов**
- **Моторный стенд для отработки демонстрационных систем**
- **Подготовлена Программа работ до 2025г.**

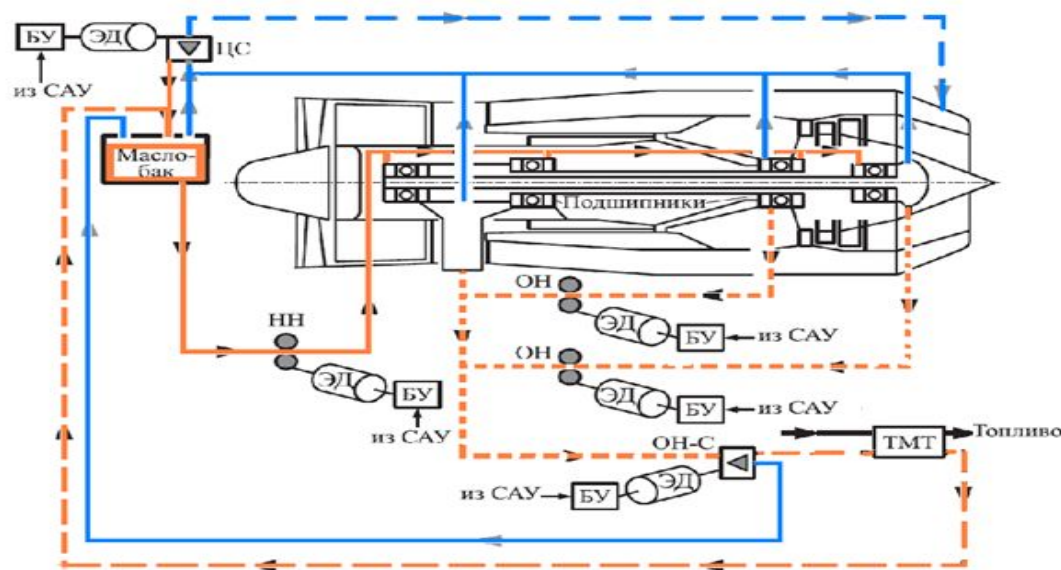


**Проведены испытания
электроприводных
систем автоматического
управления и смазки**

ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ СИСТЕМА СМАЗКИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Построение системы:

- ❖ Электропривод насосов
- ❖ Раздельное управление нагнетающим и откачивающими насосами

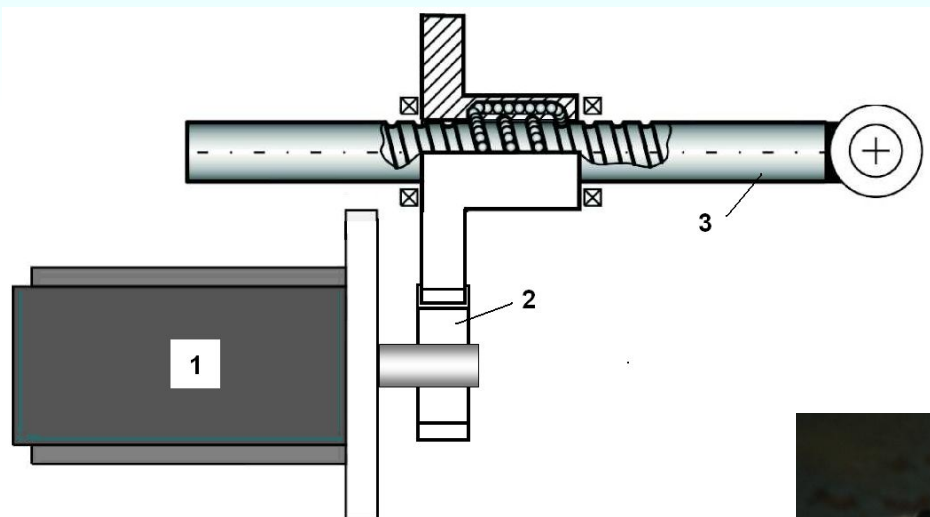


Эффективность:

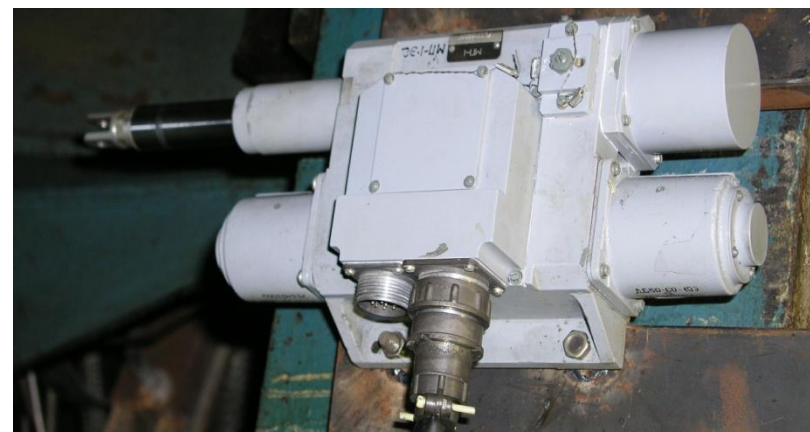
- Повышение качества смазки (увеличение ресурса)
- Уменьшение подогрева топлива
- Улучшение запуска при $t_n < -30^\circ\text{C}$

Diagram illustrating the two-section model of a transmission line. The total length is l_i . The first section has length d and the second section has length $l_i - d$. The input vector at the left end is $\begin{pmatrix} P_j \\ X_j \\ v_j \\ T_j \end{pmatrix}$, where $P_j = \rho_j^* \rho_j^r$, $X_j = \alpha_j^{CM}$, and $v_j = v_i^{CM}$. The output vector at the right end is $\begin{pmatrix} G_j^{CM} \\ X_j^{CM} \\ T_j^{CM} \end{pmatrix}$. The diagram shows 'местные потери' (local losses) at the input and 'путевые потери' (propagation losses) in the second section. The output is labeled P_{j+1} .

14



Принципиальная схема



Электропривод МП-1-Э2,
разработки ОАО «Электропривод»

$n_{\max}$	- 12000 об/мин,	Усилие	- 100кг
Ход	- 50мм,	$V_{\max}$	- 25мм/сек

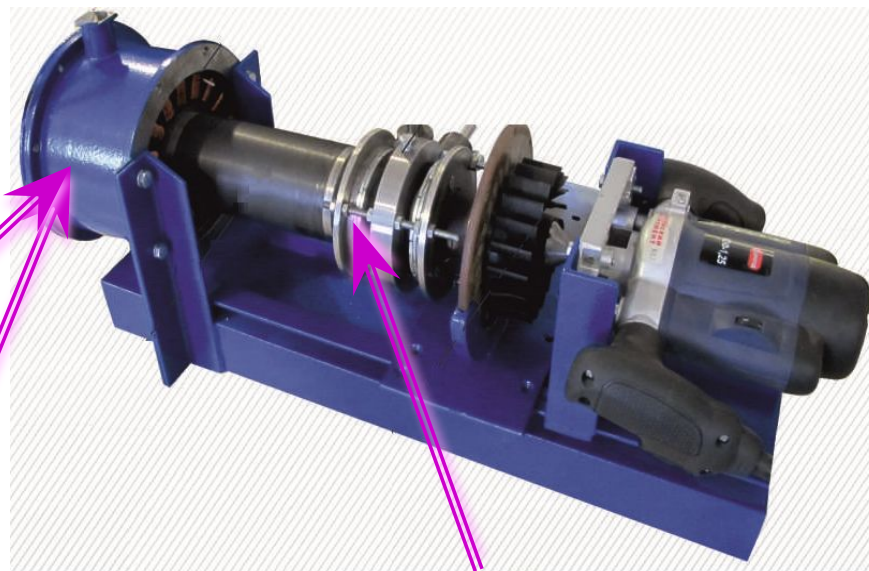
Подшипники демонстратора для ротора массой 57 кг

Разработка «НПО «ЭРГА» » по ТЗ ЦИАМ

Блок управления АМП

Масса 5 кг

Габариты 480x370x90 мм



Активный радиальный магнитный подшипник (АМП)

- Масса подшипника **7 кг**
- Несущая способность **800 Н**
- Радиальный зазор **0.5 мм**
- Частота вращения **< 25000 об/мин**
- Электрическая мощность **< 0.5 кВт**

Пассивный радиальный магнитный подшипник

- Масса **2 кг**
- Несущая способность **1000 Н**
- Радиальный зазор **≤ 2 мм**
- Частота вращения **< 25000 об/мин**
- Не требуется

РАБОТЫ ЗА РУБЕЖОМ ПО «ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ» ГТД



- POA** - Power Optimized Aircraft (2008 год – внедрение)
участники: RR, Hispano-Suize, Goodrich, Volvo Aero, MTU
- МОЕТ** - More Open Electrical Technology (начало работ 2006 г.)
разработка электрических технологий - продолжение POA)
- Horizon 2020 (Clean Sky 2)** - *‘smart, green and integrated transport’*
- ETAP** - European Technology Acquisition Programme –
участники: MTU, Fiat Avio, ITR, Volvo Aero, Snecma
- MEI** - More Electric Initiative - исследовательские
лаборатории вооруженных сил США; имеет направления:
MEA - *More Electric Aircraft*
(более «электрический» самолёт)
MEE - *More Electric Engine*
(более «электрический» двигатель).
- SPEC** – разр. технологий более электр. самолёта (SAFRAN)
- AMPERES** – разр. и оптимизация созданных в SPEC технологий (SAFRAN)

MTU - Predictive Engine Control (Перспективная система управления ГТД) - создание электрических систем управления для двигателей ВА

Snecma – создание ГТД с заменой гидравлических источников мощности на электрические;

Rolls–Royce – вопросы применения электроприводов, встроенного стартера-генератора, магнитных подшипников;

PW Canada – ТРДД PW610F (1400кг), ТРДД JT15d-5с – применение стартера-генератора, интегрированной электроэнергетической системы самолёта;

Hamilton Sundstrand – разработка электроприводных быстроходных топливных и масляных насосов, электрической ВСУ, электрической СКВ;

Lucas Aerospace – разработка электроприводного шестеренного топливного насоса со сдвоенными шестернями ($G=7000\text{кг/ч}$, $n=15000\text{ об/мин}$, $N=30\text{ кВт}$);

Honeywell – разработка встроенного стартера-генератора, создание полностью электрической силовой установки;

Hispano-Suiza – разработка топливного насоса с электроприводом 45 кВт. Его управление от электрической системы дозирования и подачи топлива (EFPMS - Electric Fuel Pumping and Metering System), подключённой к системе FADEC.

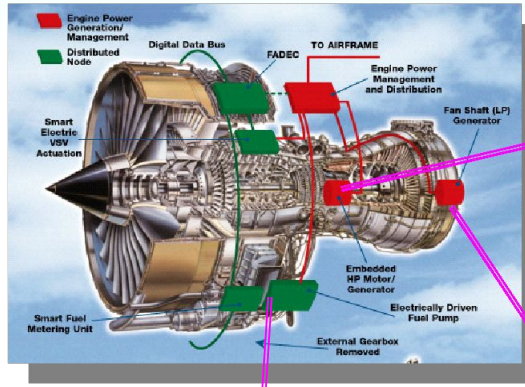
AC and DC electrical power generation
AC and DC electrical power conversion
SG design for high availability of electrical network
Integrated motor technologies, with high speed rotation and
high temperature material

**High temperature motor (300°C) and
Power electronic integration (225°C)** for
a power < 10 kW and **540 Vdc** power
supply

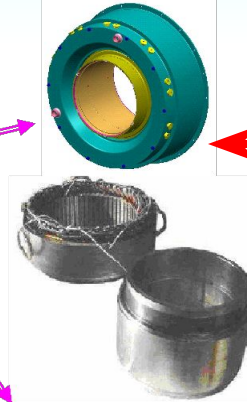
- ☐ Solution study
- ☐ Reliability and lifetime prediction

High reliability and high availability
electrical motor studies for a 540 V
PWM power supply with high dv/dt

Активный магнитный подшипник



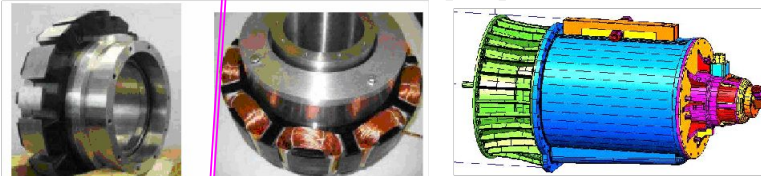
Стартер-генератор



Стартер – генератор на валу КВД
($N_{CT} = 200$ кВт, $N_{ген} = 150$ кВт)

THALES
AVIONICS ELECTRICAL SYSTEMS

Генератор

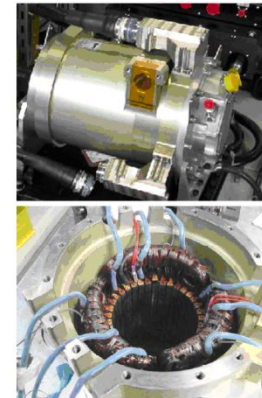
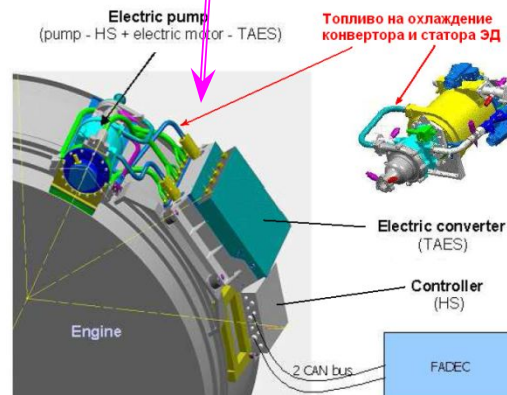


Генератор на валу КНД

- $N_{ген} = 150$ кВт
- Аварийная работа на режиме авторотации

GOODRICH

Электрический масляный насос



Электрический топливный насос

THALES
AVIONICS ELECTRICAL SYSTEMS

Hispano-Suiza
groupe snecma

VOLVO AERO

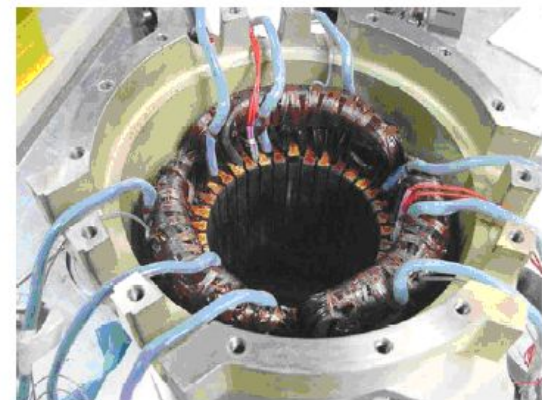
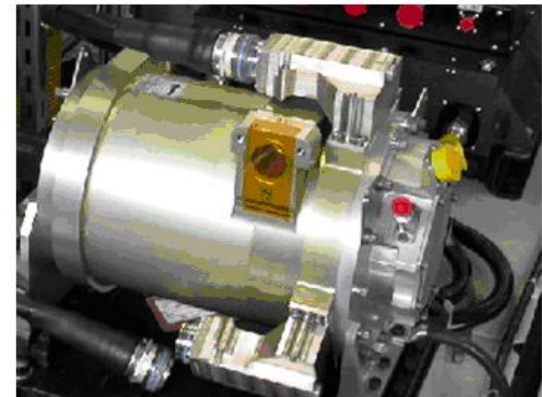
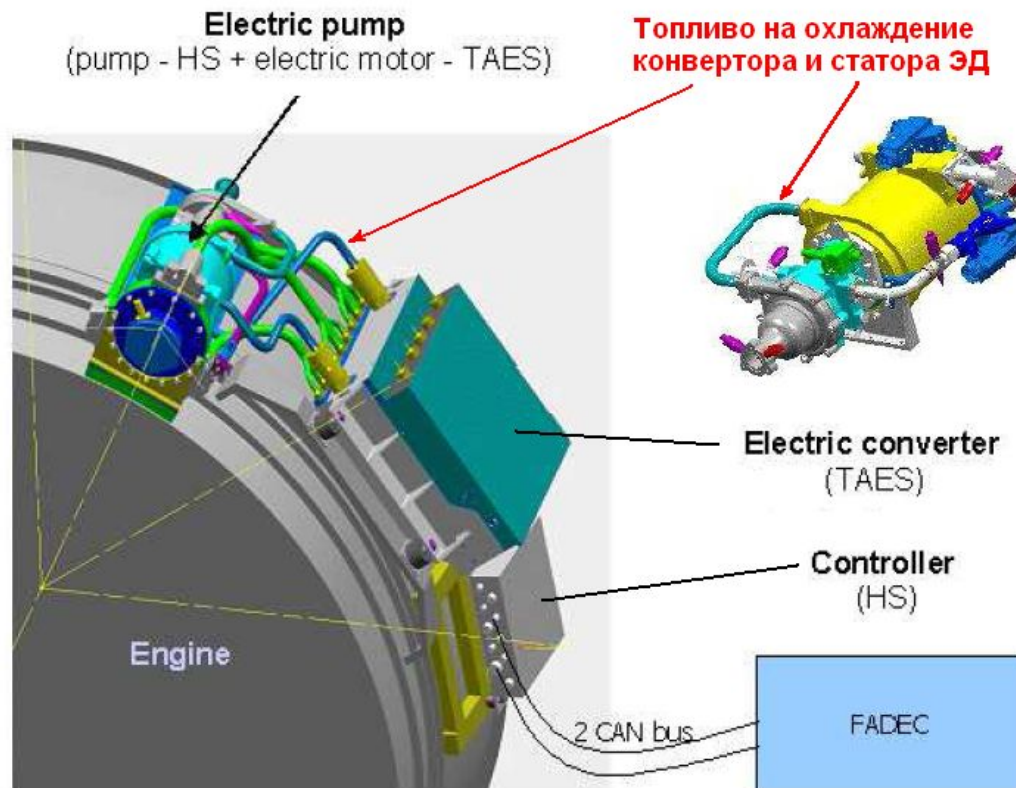
Электрический масляный суфлер



Европейские программы РОА и МОЕТ

Двигатель Trent 500 (Rolls-Royce) установлен на самолетах семейства Airbus (A340 - A500/600).
2 номинала тяги: 53.000 и 56.000 фунтов (236 - 249kN)

Электрический топливный насос

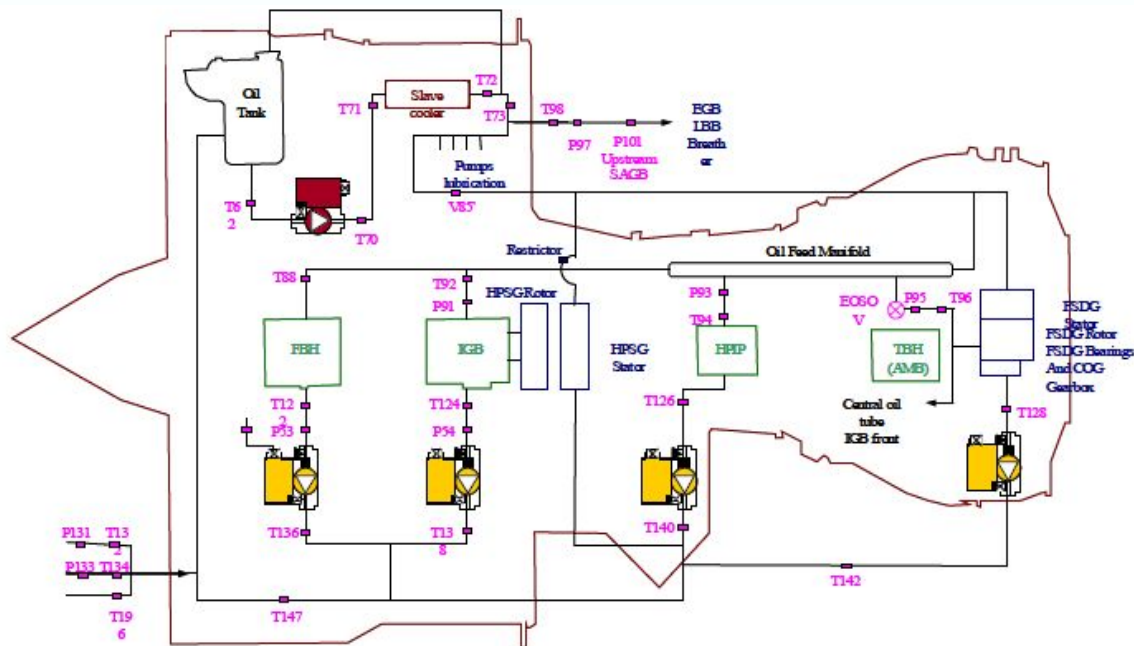


Маслосистема с электроприводными насосами Trent 500

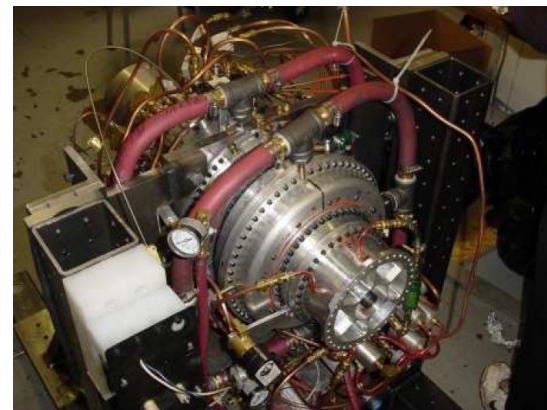
**Электрические
масляные насосы**



**Электрический
масляный суфлер**



**Электроприводная маслосистема
Spytek (SODEOS) на двигателе
Spytek J306**



□ **Электрические устройства самолёта:**

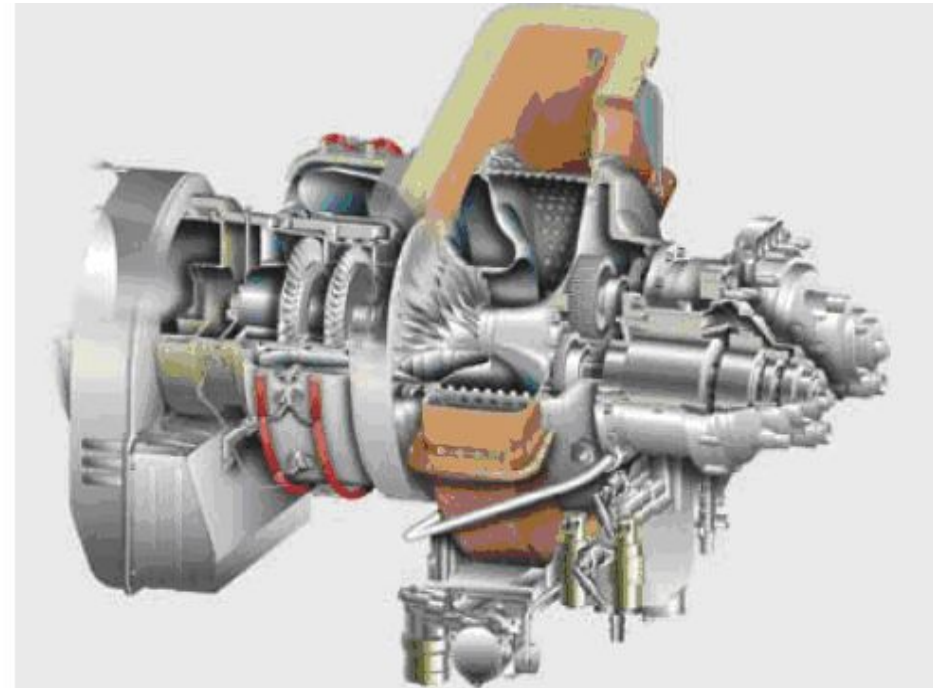
- электропривод компрессора системы кондиционирования,
- электротермическая ПОС (потребление 100кВт вместо 500кВт в традиционной системе с отбором воздуха от двигателя),
- электрические тормоза с беспроводной системой управления,
- электроприводы для насосов гидросистемы самолёта,
- электроприводы управления шасси.

□ **Электрификация силовой установки:**

- стартеры-генераторы на КПА марш. двигателя (2х250 на каждом+2х225 на ВСУ),
- исключён отбор воздуха от двигателя,
- полностью «электрическая» ВСУ.

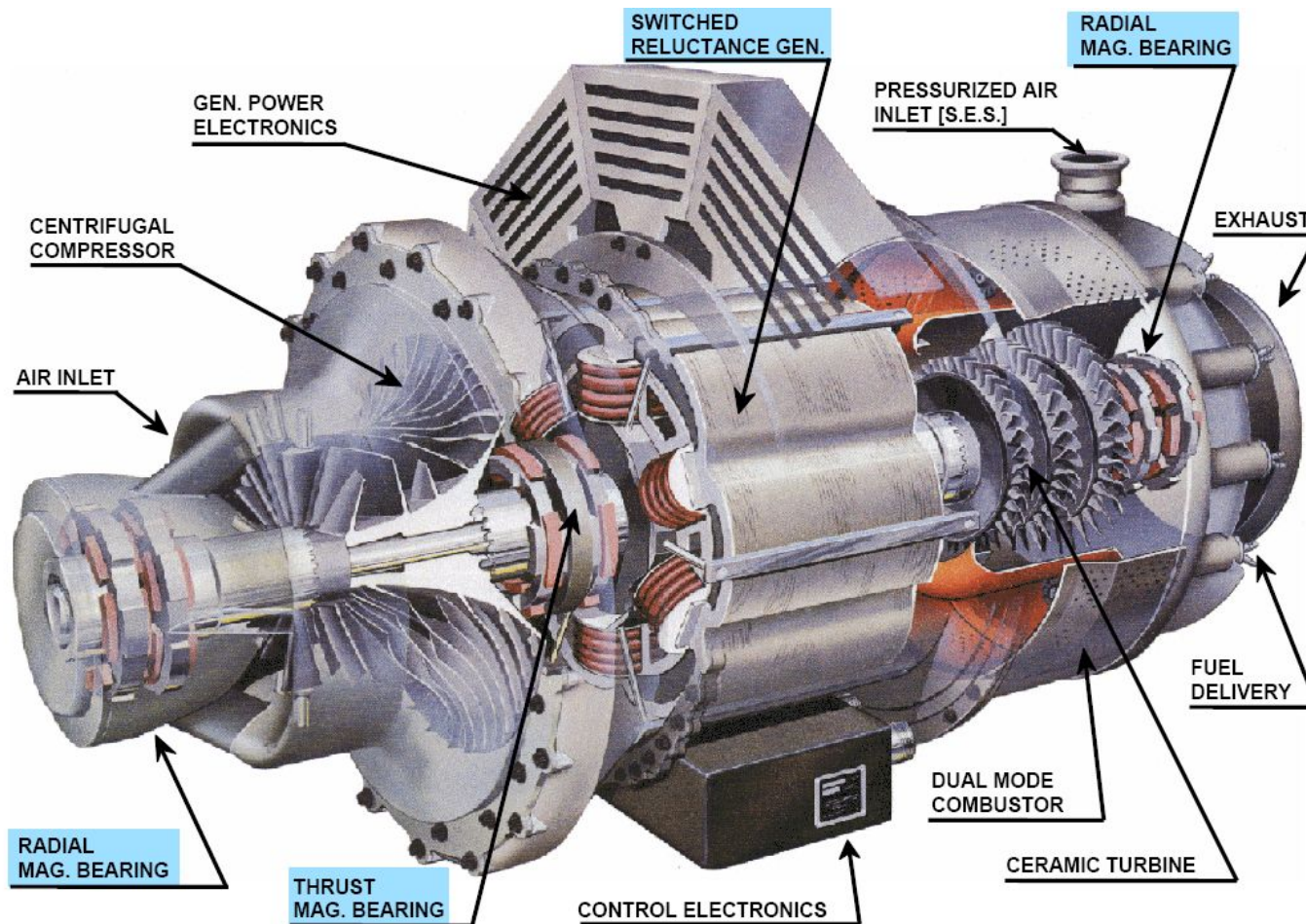
Электрические технологии на СУ обеспечили до 3% экономии топлива

ВСУ APS5000



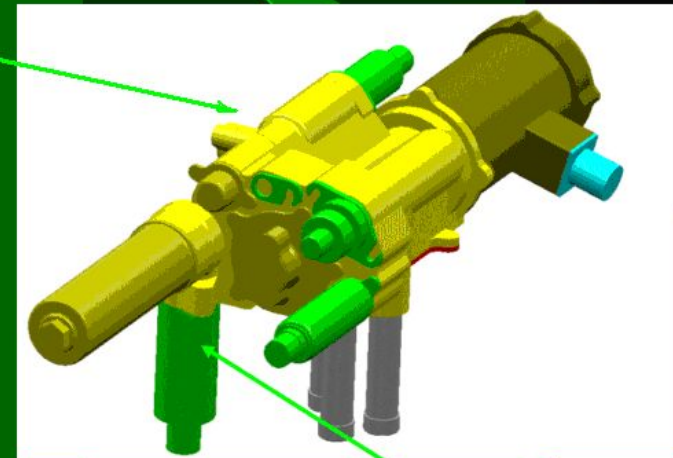
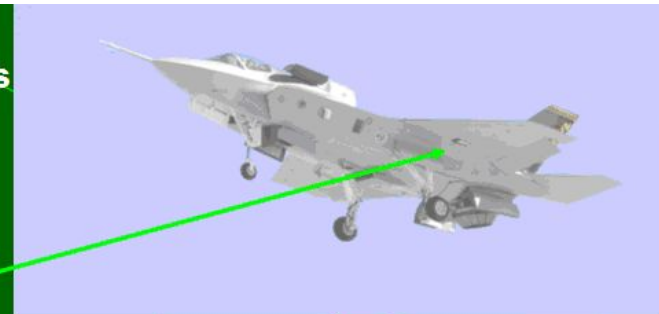
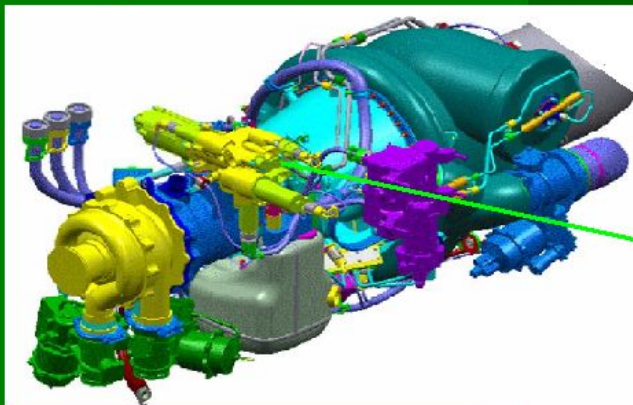
**мощность 1100 л.с.,
два стартера-генератора 225кВт
нет отбора воздуха**

Демонстратор ВСУ мощностью 250кВт с магнитными подшипниками

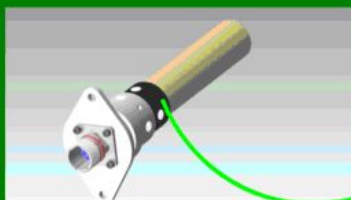
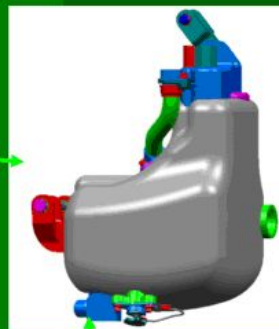


Электрические агрегаты:
стартёр-генератор (270 В), электроприводные насосы

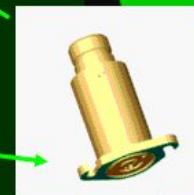
Electrically driven Oil Pump System
And System Integrator for Tank and Sensors



Shaw Aero Devices
(Oil Tank)



Ametek Aerospace
Sensors (Oil level & Pressure)

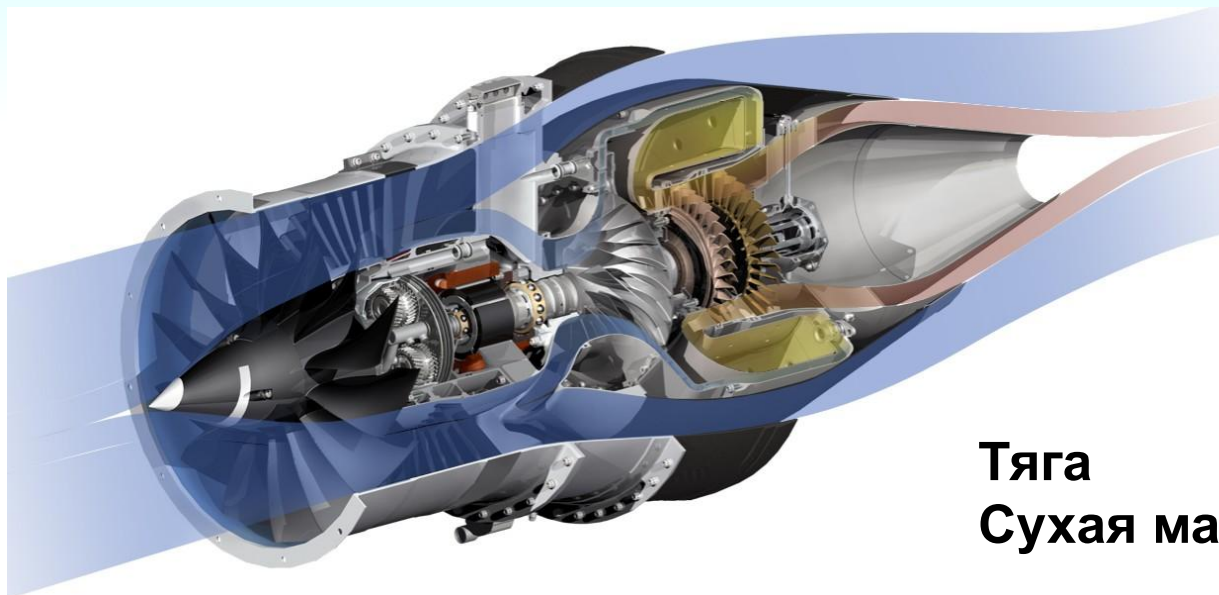


ВСУ e_APU60 для МЕА (Falcon 5X)

Начало разработки – 2008, сертифицирована – 2013



First e_APU60 FETT



Тяга – 2550 Н
Сухая масса – 80 кг



Фирма Price Induction SA (США, Франция)

ЭТАПНОСТЬ ПО САМОЛЕТУ:

- ❖ Более электрический самолет - современный уровень технологической готовности (Boeing 878, F-35)
- ❖ Полностью электрический самолет (ПЭС) - уровень технологической готовности ~2020-25 г.г.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ГТД:

Локальное использование электрических узлов в ГТД при современных технологиях независимо от уровня электрификации самолёта:

❖ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

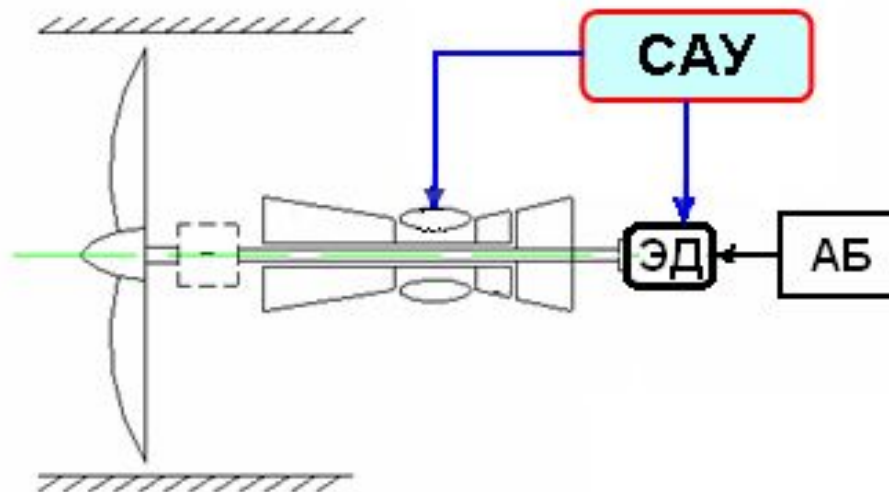
- ✓ в топливной системе,
- ✓ для органов механизации проточной части двигателя,
- ✓ в системе смазки

❖ ЧАСТИЧНО РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СТРУКТУРА САУ

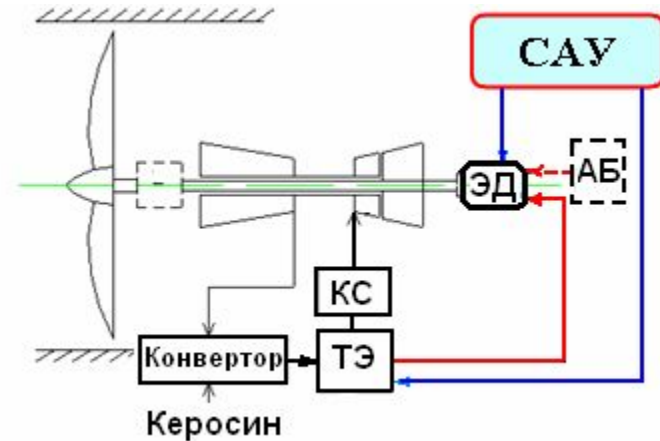
ЭТО ПОЗВОЛИТ

- улучшить температурный режим и увеличить ресурс топливной системы регулированием производительности насосов (бездозаторная система)
- увеличить ресурс двигателя (повышением качества смазки подшипников)
- повысить пожаробезопасность самолёта, снизить массу двигателя в целом (уменьшением количества трубопроводов с горючим)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ САМОЛЕТОВ



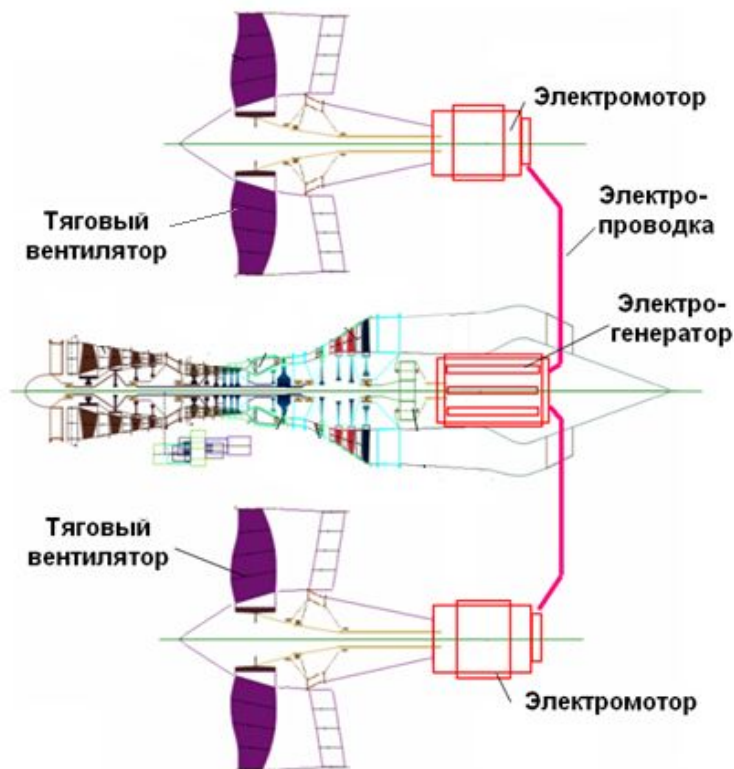
С топливными элементами (ТЭ)



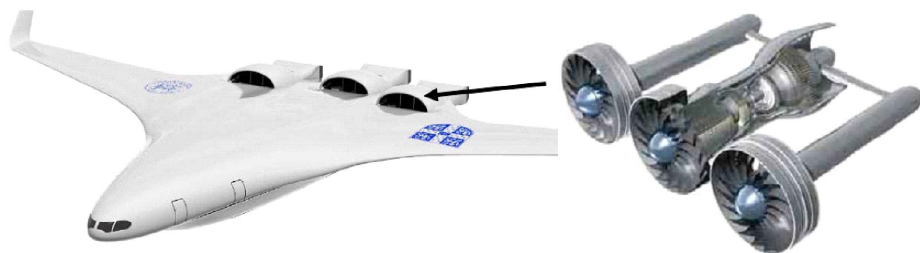
Особенности САУ:

- Управление режимом работы ЭД
- Подача топлива в КС и конвертор синтез-газ ТЭ

Распределённая СУ с генераторным источником питания



Двигательные модули на ЛА



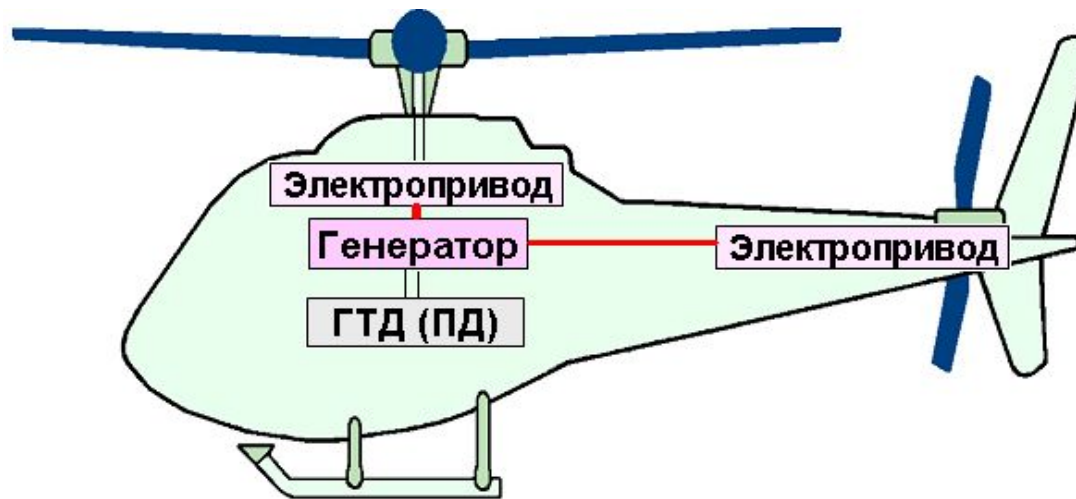
ОЖИДАЕМЫЙ ЭФФЕКТ

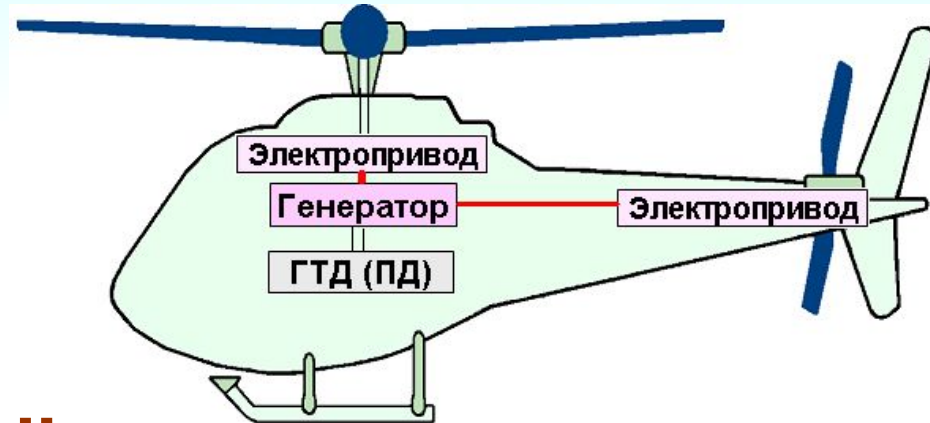
- *уменьшение расхода топлива на 70%;*
- *уменьшение эмиссии CO₂ на 70-90% (CAEP/6)*
- *уменьшение эмиссии NOx на 75% (CAEP/6) и более*
- *уменьшение шума*
- *уменьшение длины ВПП*
- *увеличение ресурса горячей газотурбинной части*

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

- *аэродинамическое качество самолета >25*
- *регулируемые электроприводы мощностью от 2 до 5.5 МВт с удельной массой < 0.1–0.3 кг/кВт*
- *энергосистема с ТЭ с удельной массой < 1,0 кг/кВт*
- *аккумуляторы с удельной массой < 1,0 г/кВт · ч*
- *высокоинтегрированная термостойкая электронная элементная база, в т.ч. силовая ($\lambda = 10-8...10-10$ 1/час, $t \geq 150$ °C)*
- *редкоземельные магниты с удельной энергией до 350 кДж/м³*
- *коммутационное оборудование на напряжение 270...540 В и др.*

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЁТА





Варианты:

- Электропривод несущего и рулевого винтов
- Электропривод только рулевого винта
- Гибридная схема:
 - несущий винт - ГТД (ПД) и электропривод
 - рулевой винт - электропривод

Источники электроэнергии:

- генератор на валу ГТД или ПД
- аккумуляторы
- топливные элементы

- **Повышение качества управления полётом при
раздельном управлении несущим и рулевым винтами**
- **Повышение надёжности и ресурса силовой установки
(исключены редуктор, трансмиссия и др.)**
- **Улучшение эксплуатационной технологичности,
снижение эксплуатационных расходов**
- **Улучшение экологических характеристик (выбросы, шум)**
- **Уменьшение заметности (для военного применения)**

Для вертолётов сверхлёгкого (взл. масса до 1500 кг), лёгкого (до 6000 кг), среднего (до 25 000 кг) :

силовая установка с ГТД (ПД) для несущего винта



- **электропривод рулевого винта**
- генераторный источник питания (основной)
- аварийный источник (посадка) - аккумулятор

Для сверхлёгкого вертолётa:

комбинир. СУ: ГТД(ПД) + **электропривод несущего винта**

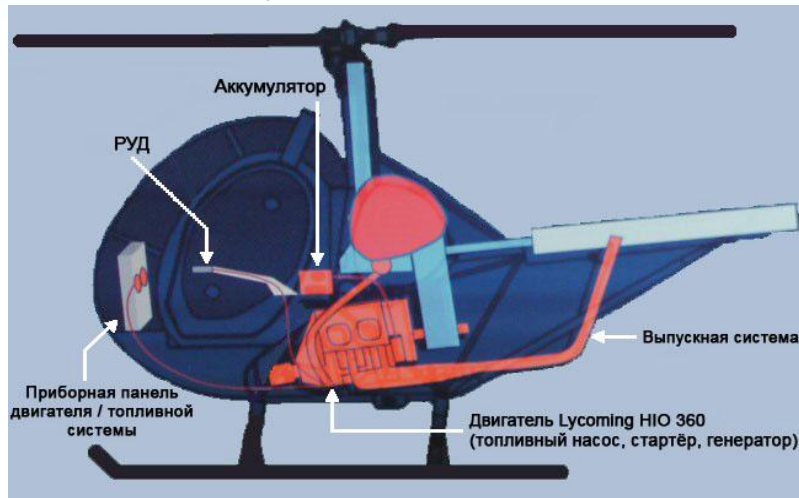


Параметры электрических устройств

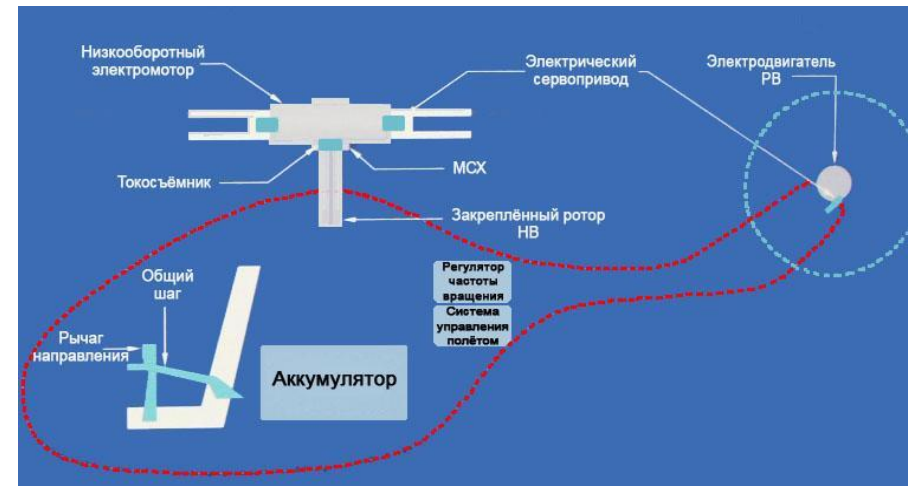
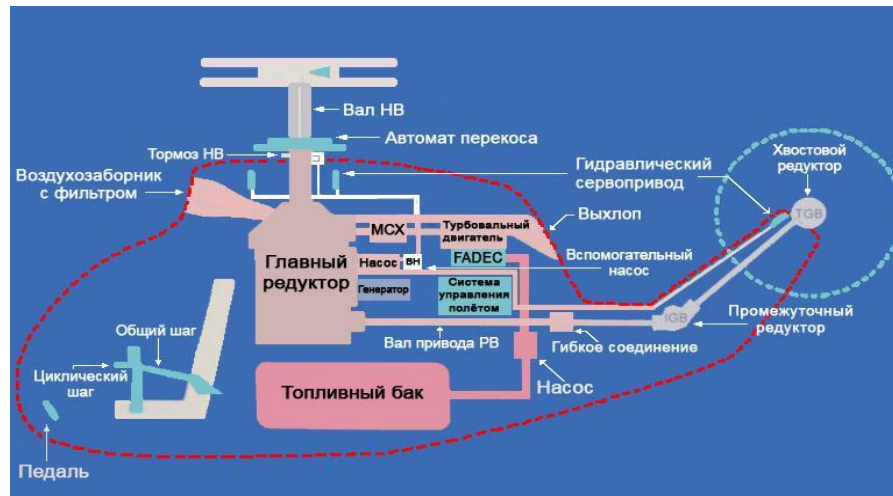
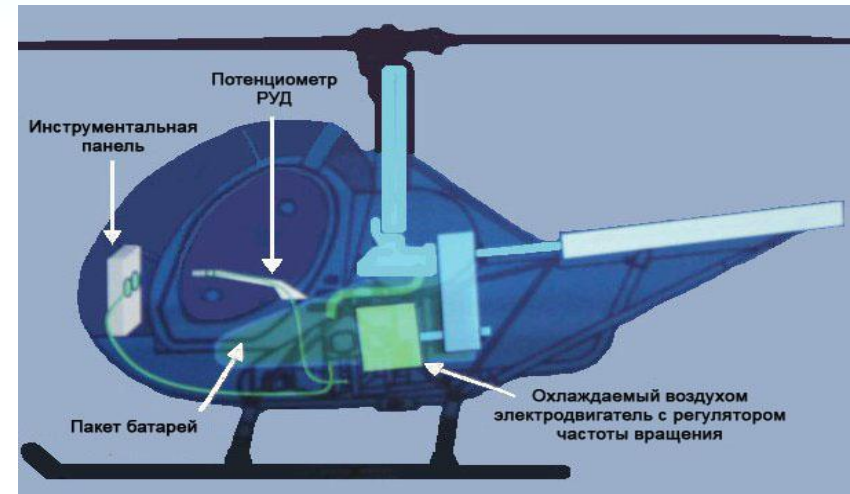
Электропривод	$\leq 0,7$ кг/кВт
Генератор	$\leq 0,5$ кг/кВт
Преобразователь	$\leq 0,2$ кг/кВт
Аккумулятор	≤ 6.0 кг/(кВт•ч)

ЗАРУБЕЖНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СИЛОВЫМ УСТАНОВКАМ ВЕРТОЛЁТА

СУ вертолётa S-300С фирмы Sikorsky с турбовальным ГТД



Вертолёт-демонстратор «Firefly» фирмы Sikorsky с электрической СУ



Гибридная СУ фирмы Eurocopter



Однодвигательный вертолет AS350 с гибридной СУ

- Переход на электродвигатель при отказе ГТД
- Подкрутка НВ при снижении на авторотации
- Увеличение мощности электродвигателя перед касанием земли
- Питание электродвигателя от аккумулятора

Гибридная СУ фирмы Turbomeca

- ГТД оптимизирован из условий крейсерского полета
- Необходимое увеличение мощности - электродвигателем
- Взлёт и посадка осуществляются с помощью электродвигателя