

УДК 621.316: 621.314: 629.7.062

А.Г. Гарганеев, С.А. Харитонов

## Технико-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием

Представлены результаты технико-экономического анализа создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием (СПЭО). Сделан вывод, что концепция СПЭО соответствует перспективным направлениям развития авиации, а также способствует созданию летательных аппаратов с высокой топливно-энергетической эффективностью.

**Ключевые слова:** самолет, летательный аппарат, система электроснабжения, магнетоэлектрический генератор, электропривод.

Современные летательные аппараты (ЛА) имеют в своем арсенале большое количество агрегатов, машин, приборов, при помощи которых осуществляется автоматическое и автоматизированное управление рулевыми поверхностями, шасси, силовой установкой, вооружением, средствами связи и навигации, радиолокации, системами жизнеобеспечения экипажа и пассажиров и т.п. Сложность и важность решаемых с помощью ЛА комплекса задач предусматривают автоматизацию бортовых систем с высокой степенью живучести, надежности и экономичности функционирования.

По прогнозам ведущих зарубежных авиастроительных фирм в течение ближайших 20 лет прогнозируется значительное производство и поставка более 17000 пассажирских и грузовых ЛА. Наряду с количественным ростом и расширением сфер применения перед авиационной промышленностью стоят задачи значительного улучшения технико-экономических характеристик ЛА [1]. Перспективы развития военных ЛА связываются с переходом на новое поколение боевых ЛА пятого и шестого поколений, превосходящих существующие по следующим показателям:

- 1) увеличение боевой живучести на 10%;
- 2) увеличение боевого радиуса действия и боевой нагрузки на 20%;
- 3) увеличение разгонных характеристик и маневренности на 20%;
- 4) увеличение аэродинамического качества на 25%;
- 5) уменьшение эксплуатационных расходов на 20%.

Достижение этих показателей связано с разработкой новых концепций построения функциональных систем ЛА, взаимодействующих в реальном масштабе времени под управлением бортовых компьютеров с высоким быстродействием.

Энергетической основой бортовых систем автоматизации является система энергоснабжения. Первичными источниками систем энергоснабжения на ЛА являются двигатели внутреннего сгорания, часть механической энергии которых преобразуется в другие виды вспомогательной энергии – пневматическую, гидравлическую и электрическую. Опыт эксплуатации ЛА показывает, что с точки зрения универсальности, надежности, удобства эксплуатации и унификации оборудования электрическая энергия обладает существенными преимуществами перед другими видами энергии. Электроэнергию можно легко трансформировать, передавать на расстояния, распределять между потребителями, использовать для приведения потребителей в действие. При этом существенным является то, что электрическая энергия облегчает процесс автоматизации оборудования ЛА, а полная комплексная автоматизация на ЛА возможна лишь в том случае, если управление им частично или полностью электрифицировано.

Достижения двух последних десятилетий в областях микропроцессорной техники, силовой электроники и магнитных материалов позволяют кардинально перестроить функциональные системы ЛА и использовать электрическую энергию в качестве единого вида вспомогательной энергии на борту. Уже в 70–80-е годы XX в. такие возможности прогнозировались ведущими отечественными и зарубежными авиационными фирмами и специалистами [2–4]. Тогда же в зарубежной литературе появилась и соответствующая терминология: *All Electric Aircraft; All Electric Airplane* (полностью электрический самолет – ПЭС; полностью электрифицированный самолет). В настоящее время среди российских специалистов и авиационных фирм, предпринимающих попытку реализации концепции ПЭС, встречается и определение «самолет с полностью электрифицированным оборудованием — СПЭО» [2]. По мнению авторов [2], определение «ПЭС» не только неточно от-

ражает сущность предмета исследования «электрификации» самолета, но и входит в некоторое противоречие с устоявшейся терминологией иных транспортных средств («электрифицированный железнодорожный транспорт», «электромобиль»), где даже в качестве первичного источника энергии может применяться электроэнергия, а для силовых приводных механизмов используются электрические машины. В концепции реализации возможно полной электрификации и автоматизации самолета «СПЭО» понимается как самолет с единой системой вспомогательной энергии, в качестве которой используется система электроснабжения, обеспечивающая питанием системы управления полетом, привод шасси, системы жизнеобеспечения и кондиционирования, электронные устройства, противообледенительную систему и другие бортовые устройства (рис. 1).

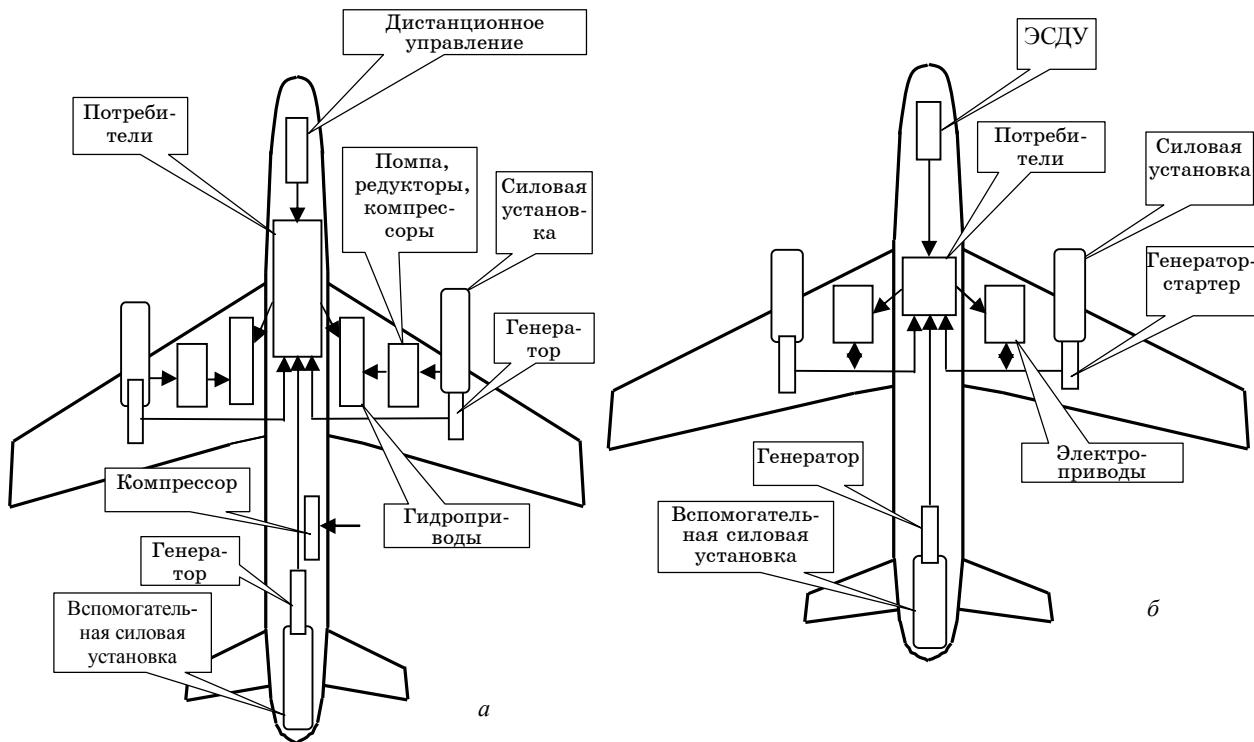


Рис. 1. Самолетные системы энергоснабжения и управления: а – «традиционная» схема; б – реализующая концепцию «СПЭО» (ЭСДУ – электронная система дистанционного управления)

В конце 90-х годов появилась концепция «более электрифицированного самолета» (*More Electric Aircraft*, или *MEA*). В исследованиях по этой программе принимали участие более 40 организаций Евросоюза с общим бюджетом 400 млн евро на 4 года. Согласно данной концепции повышение уровня электрификации ЛА должно проводиться поэтапно. С 2002 по 2006 г. выполнялся Европейский проект *POA* (*Power Optimized Aircraft* – самолет, оптимизированный по мощности) с бюджетом приблизительно 100 млн евро. В программе принимали участие 46 авиационных компаний (*Thales, Goodrich, Rolls-Royce, Hispano-Suiza* и др.), координатор проекта – авиационная компания *Liebherr-Aerospace*. Данный проект включал в себя следующие направления исследований: система кондиционирования воздуха, противообледенительная система крыла, система управления полетом, новая архитектура системы электроснабжения, электрифицированный авиадвигатель. За проектом *POA* последовал проект *MOET* (*More Open Electrical Technologies*, более открытых электрических технологий), который явился логическим продолжением *POA*, в результате чего появились ЛА с повышенным уровнем электрификации: пассажирские – *A-380* и *Boeing 787*, истребитель *F-35*, беспилотный ЛА «Барракуда» и др., на которых реализованы многие положения концепции СПЭО.

Концепция СПЭО основывается на современных требованиях по экономичности и энергетической (топливной) эффективности, надежности и улучшению летных характеристик, и должна соответствовать новым техническим решениям, например, системам активного контроля бортовых систем, «энергетически эффективному» двигателю, крылу суперкритического профиля, конструкционным деталям из композитных материалов и т.п.

Жизненный цикл ЛА можно характеризовать стадиями разработки (включая испытания) и эксплуатации. В работе [2] потенциальные преимущества СПЭО оцениваются именно в этих стадиях.

В стадии разработки:

- уменьшение срока разработки и изготовления;
- снижение времени летных испытаний;
- уменьшение стоимости бортовых систем и агрегатов;
- устранение отбора воздуха от авиадвигателей;
- снижение лобового сопротивления, улучшение летных характеристик;
- уменьшение массы авиадвигателя, его упрощение;
- снижение поперечных составляющих тяги;
- снижение расхода топлива;
- уменьшение времени монтажа/демонтажа авиадвигателя.

В стадии эксплуатации:

- снижение стоимости самолета;
- снижение затрат энергии при наземной подготовке;
- снижение времени простоев (более высокая степень использования);
- снижение прямых эксплуатационных затрат и затрат на топливо. Качественные преимущества СПЭО представлены в таблице [6].

#### Преимущества самолета с полностью электрифицированным оборудованием

Преимущества	Большое количество ЛА	Снижение инвестиций	Меньшая стоимость жизненного цикла и прямых эксплуатационных затрат	Увеличение нагрузки или вооружения	Увеличение запаса топлива на борту	Увеличение дальности	Сокращение времени обслуживания	Сокращение стоимости запчастей	Повышение производительности техобслуживания	Повышение использования парка ЛА	Независимость от погоды	Сокращение обслуживания персонала	Сокращение требований при подготовке к полету
Характеристики	$\oplus$ – существенное улучшение; $\bullet$ – незначительное улучшение												
Сокращение стоимости	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$										
Уменьшение массы				$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$							
Уменьшение потребления топлива			$\oplus$	$\oplus$		$\oplus$	$\bullet$		$\bullet$				$\oplus$
Расширение допустимого уровня полетных условий						$\oplus$				$\bullet$	$\oplus$		
Улучшенная ремонтопригодность			$\oplus$				$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$		$\oplus$	$\oplus$
Увеличение надежности			$\oplus$				$\oplus$	$\oplus$		$\oplus$		$\oplus$	$\oplus$
Упрощение обслуживания			$\bullet$				$\bullet$	$\bullet$	$\oplus$	$\oplus$		$\bullet$	$\bullet$
Сокращение вспомогательного оборудования			$\oplus$					$\oplus$	$\bullet$			$\bullet$	$\bullet$

Оценка изменения массы ЛА, его системы кондиционирования, электроприводов, стоимости генерирования энергии, надежности проводилось в середине 80-х годов прошлого века также NASA, в результате чего были сделаны выводы о возможном уменьшении массы оборудования на 30% прежде всего для пассажирского ЛА на 350 мест. С учетом конструкционных изменений планера, снижения расхода, а следовательно, и запаса топлива на борту, уменьшения массы авиадвигателей уменьшение взлетной массы будет еще более выигрышным для 500-местного самолета. Таким образом, проведенные исследования показали, что реализация концепции СПЭО дает выигрыш прежде всего

для больших ЛА. Например, для большого военно-транспортного ЛА снижение взлетной массы может составить 8–10%. По данным NASA для СПЭО с пониженной статической устойчивостью затраты на производство и в прямых эксплуатационных расходах могут быть сокращены еще почти в 2 раза. Для ЛА меньших размеров, например истребителей, выгоды от реализации концепции СПЭО не столь велики, однако, по мере совершенствования элементов, способных создать основу электрификации ЛА, эти выгоды должны становиться все более ощутимыми. Так, например, применение новых магнитных материалов, изготовленных с применением нанотехнологий, устройств передачи данных, средств микропроцессорной техники и силовой электроники, позволяет распространять преимущества концепции СПЭО на все больший круг ЛА.

Согласно исследованиям [4, 7] при полной электрификации ЛА с авиадвигателем с повышенной энергетической эффективностью снижение прямых эксплуатационных расходов соизмеримо с аналогичным снижением от внедрения таких элементов, как энергетически эффективный двигатель, крыло суперкритического профиля, система активного управления и перспективные композиционные материалы планера. Реализация активных систем управления полетом тесно связана с концепцией СПЭО и позволяет при пониженной или даже отрицательной статической устойчивости уменьшить массу ЛА и снизить его лобовое сопротивление, что в свою очередь приводит к экономии топлива до 10–13%.

Решающим фактором в повышении топливной эффективности авиадвигателя является устранение отбора воздуха (от компрессора), используемого для систем жизнеобеспечения, кондиционирования и противообледенительной системы. На СПЭО появляется возможность использовать электрические компрессоры с регулированием. По оценкам работы [8], применение электрических компрессоров для системы кондиционирования и системы охлаждения для доведения нагретого турбинами воздуха до нужных условий в случае СПЭО экономичнее в 6–7 раз относительно традиционной системы. Исключение конструкционных элементов (трубопроводы, редукторы, сливная арматура и т.п.) на 500-местном СПЭО позволяет получить экономию массы в 1175 кг. Только за счет ликвидации отбора воздуха на нужды противообледенительной системы КПД авиадвигателя может быть повышен на 2%. Совместными исследованиями NASA и фирмы *Lockheed* установлено, что ЛА с тремя двигателями, осуществляющими лишь отбор механической мощности с вала, на скорости около 960 км/ч на высоте 11000 м за 5 ч полета потребляет на 900 кг меньше топлива, чем ЛА с традиционным отбором сжатого воздуха. В авиадвигателе с отбором только механической мощности исключаются высокотемпературные трубопроводы из нержавеющей стали, узлы сливных отверстий, предварительный охладитель и другие элементы традиционных систем. На середину 90-х годов прошлого столетия применительно к тяжелому самолету концепция СПЭО позволила обеспечить по отношению к существующим ЛА следующие преимущества:

- снижение прямых эксплуатационных расходов на 4–12 %;
- снижение полной взлетной массы на 8–10 %;
- снижение расходов на производство – до 4,5 млн долл. на ЛА;
- снижение потребления топлива с использованием перспективных авиадвигателей до 30%.

Дополнительным преимуществом оказывается использование в авиадвигателе центрального элемента системы энергоснабжения – «стартера – генератора». На рис. 2 в соответствии с вышеизложенным представлены функциональные схемы сопряжения стартеров, генераторов, помп компрессоров и т.п. с авиадвигателем. Следует также отметить, что на современных ЛА успешно применяются элементы гидросистем, претерпевающих развитие на основе новых конструкционных материалов. Развитие авиационных гидросистем характеризуется непрерывным ростом потребляемой мощности и массы гидросистемы при примерно одинаковых размерах ЛА. Эта проблема приобрела критическое значение уже в 70-е годы прошлого века при проектировании самолетов 4-го поколения. Отборы мощности от авиадвигателя для централизованной гидросистемы на управление рулевыми поверхностями приобрели критическое значение (на некоторых режимах полета до 20%) и серьезно влияют на дальность полета, безопасность и экономичность. Одна из основных проблем гидросистем – более низкая энергоотдача в целом, которая примерно на порядок ниже относительно отдачи насосов. Например, потребляемая мощность истребителя F-15 равняется 300 кВт, а F-2 – 750 кВт. Для бомбардировщиков B-1, B-2 мощность потребления превышает 1000 кВт. С ростом энергопотребления растет и масса гидросистемы и рулевых приводов. Эта тенденция приводит к абсурдной ситуации, когда ЛА становится носителем гидросистемы [9].

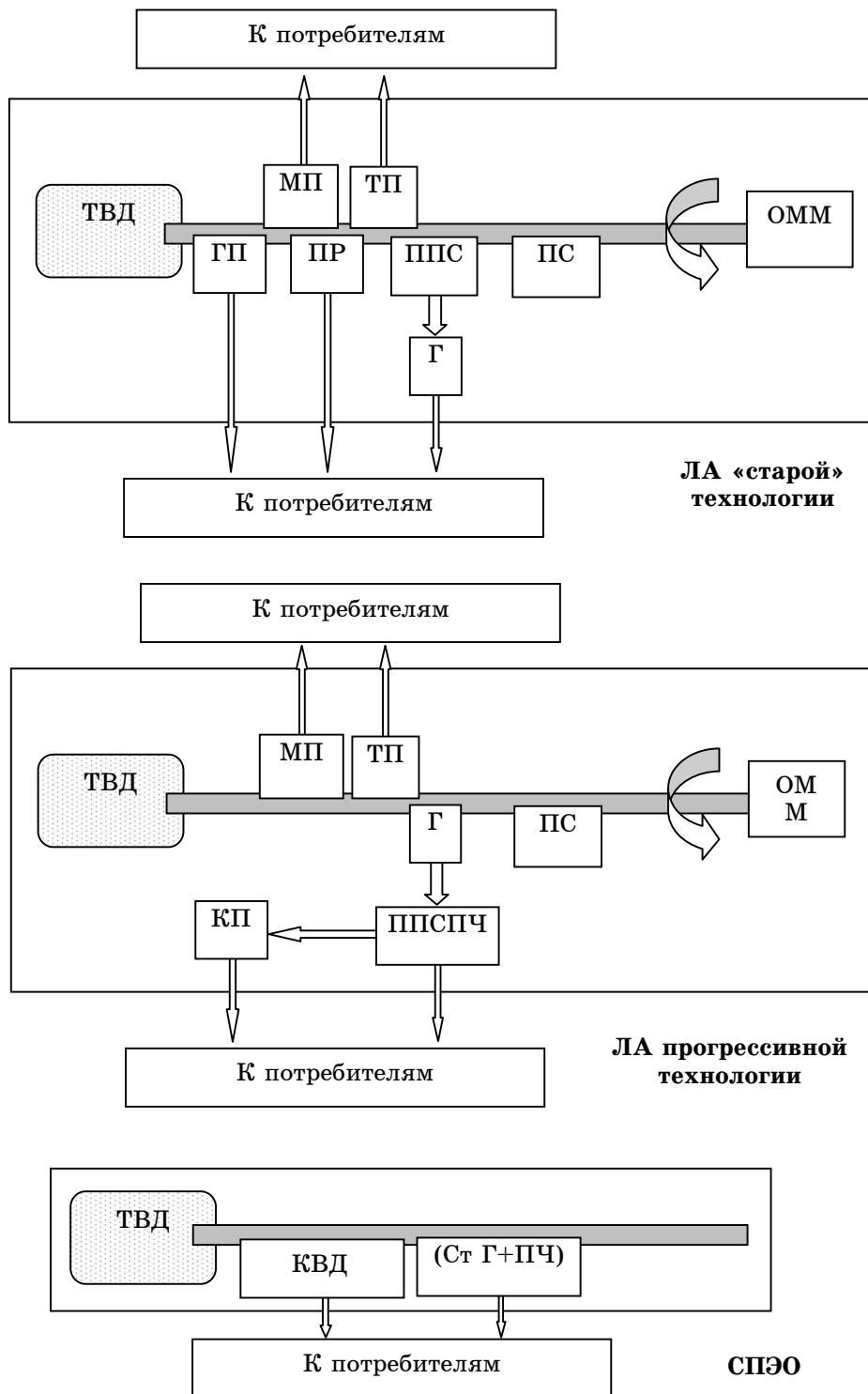


Рис. 2. Функциональные схемы сопряжения турбины высокого давления (ТВД) с вспомогательными источниками энергии: МП – маслопомпа; ГП – гидропомпа; ТП – топливная помпа; ППС – привод постоянной скорости; ПС – пневмостартер; ПР – пневморедуктор; ОММ – отбор механической мощности; КВД – компрессор высокого давления; ППСПЧ – преобразователь «переменная скорость – постоянная частота»; КП – компрессор с приводом; СтГ – стартер-генератор; ПЧ – преобразователь частоты

Анализ показывает, что электромеханическая и гидравлическая системы на настоящий момент времени находятся по многим позициям практически в равных количествах

венных оценках, хотя по комплексным оценкам преобладающей системой по мере развития науки и техники может стать электрическая система. Так, для управления рулевыми поверхностями необходима мощность 10–12 кВт, что может быть обеспечено вентильными двигателями с постоянными магнитами на основе Nd-Fe-B при напряжении питания 270 В без гидросистемы.

Анализ технико-экономических преимуществ СПЭО требует комплексного подхода, позволяющего выявить как уже существующие, так и потенциальные преимущества от использования новых технических решений. Такой подход позволяет сделать вывод, что концепция СПЭО находится в русле перспективных направлений развития авиации, а также способствует созданию ЛА с высокой топливно-энергетической эффективностью.

#### *Литература*

1. Захаров А.С. Авиационное гидравлическое оборудование: учеб. пособие / А.С. Захаров, В.И. Сабельников. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 391 с.
2. Брускин Д.Э. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием. Сер. Электрооборудование транспорта. – Т. 6 / Д.Э. Брускин, С.И. Зубакин. – М.: ВИНТИИ, 1986. – 108 с.
3. Cronin M.J. Design aspect of systems in all electric aircraft // SAE Techn. Pap. Ser. – 1982. – № 821436. – 11 p.
4. Cronin M.J. The all electric airplane: It's development and logistic support // NAECON81. – Vol. 1. – Р. 341–347.
5. Воронович С. Полностью электрический самолет / С. Воронович, В. Каргапольцев, В. Кутахов // Авиапанорама. – 2009. – № 2. – С. 23–27.
6. Spitzer C.R. The all electric airplane benefits and challenges / C.R. Spitzer, R.V. Hood // SAE Techn. Pap. Ser. – 1982. – № 821434. – 8 p.
7. Phillips J.W. All electric subsystem for next generation transport aircraft/ J.W. Phillips, N.E. Wood // AIAA Pap. – 1979. – № 1832. – 14 p.
8. Cronin M.J. All electric vs conventional aircraft: the production/operational aspects // J. Aircraft. – 1983. – № 6. – Р. 481–486.
9. Плунгян А.М. Гидросистемы самолетов 5-го поколения (по зарубежным источникам) // Датчики и системы. – 2002. – № 7. – С. 27–29.

**Гарганеев Александр Георгиевич**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электронных средств автоматизации и управления ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-47-69

Эл. почта: [garganeev@rambler.ru](mailto:garganeev@rambler.ru)

**Харитонов Сергей Александрович**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. промышленной электроники НГТУ

Тел.: (383-2) 46-08-64

Эл. почта: [Kharit@ntcom.ru](mailto:Kharit@ntcom.ru)

A.G. Garganeev, S.A. Kharitonov

**Technical and Economic Evaluation of All-Electric Aircrafts Designing**

The paper provides the results of technical and economic analysis when designing all-electric aircrafts. It was concluded that the all-electric aircrafts concept fully conforms to promising technologies in aircraft development and facilitates designing of aircrafts that distinguish highly-efficient fuel-and-power performances.

**Keywords:** aircraft, power-supply system, magneto-electric generator, electric drive.