ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 629.735.064.53(045)

В. А. Гришин, асп.

ГЕНЕРАТОРНЫЙ АГРЕГАТ ВСТРОЕННЫЙ В АВИАДВИГАТЕЛЬ САМОЛЁТА С ПОЛНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОФИЦИРОВАННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Криворожский колледж НАУ, e-mail: evidential@yandex.ru

Представлены результаты технико-экономического анализа создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием. Рассмотрена возможность применения каскадного агрегата в качестве генераторного агрегата, встроенного в авиадвигатель самолета с полностью электрифицированным оборудованием.

Ключевые слова: самолёт, система электроснабжения, каскадный агрегат, генератор.

Вступление. Новые магнитные материалы и полупроводниковые приборы позволяют использовать электрическую энергию в качестве единственного вида вспомогательной энергии на борту летательного аппарата (ЛА), т. е. перейти к самолётам с полностью электрифицированным оборудованием. Критерием совершенства ЛА в настоящее время является экономичность и энергетическая (топливная) эффективность. По результатам исследований NASA совместно с фирмой Lockheed (США) уменьшение массы оборудования 350-местного самолета с полностью электрифицированным оборудованием (СПЭО) составляет 1/3 от общего снижения массы пустого самолёта (2500 кг при массе самолёта 110000 кг). Взлётная масса 500-местного пассажирского самолёта уменьшится на 11500 кг в случае с СПЭО, а 700-местного – (28 … 34) т, т. е. последовательная реализация концепции СПЭО с момента начала проектирования большого транспортного самолёта позволит сократить его взлётную массу на (8 … 10) %. Электрификация самолётов, находящихся в эксплуатации, также позволит улучшить их характеристики. Например, для самолёта фирмы Lockheed L1011 концепция СПЭО обеспечила бы сокращение его массы на 2200 кг.

Как известно, в настоящее время на самолетах используются три вторичные энергетические системы: система электроснабжения, гидравлическая система, пневматическая система.

Такое построение бортовой системы энергоснабжения для перспективных ЛА не является оптимальным, требует существенных затрат на его эксплуатацию и вызывает значительные трудности при интеграции бортового оборудования.

На СПЭО электрическая энергия будет применяться для питания наиболее энергоемких систем, которые традиционно использовали для своего функционирования гидравлическую и пневматическую энергию. К таким системам, прежде всего, относятся:

– система управления аэродинамическими поверхностями и взлетно-посадочными устройствами самолета;

– система кондиционирования воздуха;

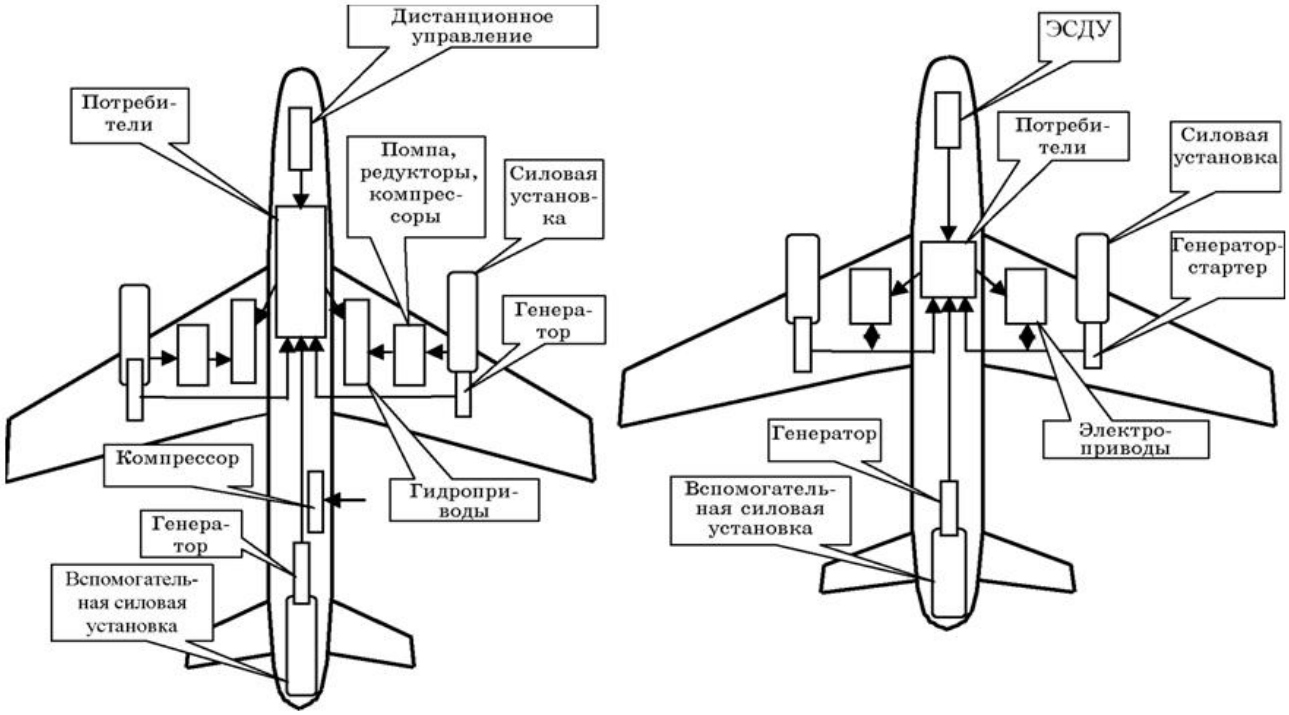
– противообледенительная система самолета;

– система запуска авиадвигателя.

Реализация концепции СПЭО позволит исключить (минимизировать) централизованную гидросистему самолета и ликвидировать пневмосистему с отбором воздуха от авиадвигателя.

Развитие концепции СПЭО. 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 ст. 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 «полностью электрический самолет» не только неточно отражает 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).



а *б*

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 Европейского союза с общим бюджетом 400 млн евро на 4 года. Согласно данной концепции повышение уровня электрификации ЛА должно проводиться поэтапно. С 2002 по 2006 гг. 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-Royse, 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 другие, 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;
– повышение резервного питания;
– снижение затрат энергии при наземной подготовке;
– снижение времени простоев (более высокая степень использования);
– снижение прямых эксплуатационных затрат и затрат на топливо.

Электрификация отдельных систем самолета. Переход к самолету с полностью электрифицированным оборудованием коренным образом сказывается на принципах построения и особенностях функционирования основных систем и агрегатов самолета.

Реализация концепции СПЭО предполагает существенное изменение облика силовой установки самолета вследствие ликвидации отбора воздуха для системы кондиционирования и противообледенительной системы, устранения привода гидросистемы, интеграции источника электрической энергии с авиационным двигателем.

«Электрический» газотурбинный двигатель (ГТД) не будет иметь коробки приводов. В электрической системе запуска авиадвигателя предполагается применение встроенного стартер-генератора. Вспомогательная силовая установка при этом будет использоваться только для генерирования электрической энергии.

В целом электрификация ГТД позволит уменьшить массу и мидель двигателя на 10–15 %, снизить теплонапряжённость топливной системы на 10–20°С, уменьшить стоимость обслуживания в 2–3 раза, улучшить тактико-технические характеристики самолётов.

Повышение уровня электрификации СПЭО, естественно, будет сопровождаться увеличением мощности как источников электрической энергии, так и системы электроснабжения (СЭС) в целом. Исследования показали, что мощность СЭС СПЭО должна быть увеличена примерно в 2–3 раза в зависимости от типа ЛА, а мощность одного канала генерирования может достигать 300 кВА.

В настоящее время на зарубежных самолетах с повышенным уровнем электрификации уже устанавливаются генераторы, мощность которых превышает 200 кВА. Так, на самолете Boeing 787 устанавливаются 4 основных генератора переменного тока мощностью 250 кВА каждый, приводящиеся во вращение от авиационных двигателей, и два генератора мощностью 225 кВА, установленные на ВСУ. Общая установленная мощность источников электрической энергии на данном ЛА составляет 1450 кВА. На аэробусе А-380 мощность одного источника электрической энергии составляет 150 кВА, а суммарная мощность СЭС достигает 840 кВА. В перспективном магистральном самолете МС-21 также предполагается значительная электрификация систем бортового оборудования и, как следствие, установка мощных источников электроэнергии.

В связи со значительным увеличением мощности энергосистемы остро встает вопрос о выборе рационального вида электроэнергии, вырабатываемой первичными источниками (генераторами).

В настоящее время наиболее перспективными для СПЭО являются система электроснабжения переменного тока переменной частоты (в диапазоне 360–800 Гц) и система электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (U = 270 В).

Предлагается на «полностью электрическом самолете» поднять уровень напряжения переменного тока в 2 раза, а постоянного тока – в 10 раз по отношению к общепринятым в настоящее время уровням. Рассматривается вопрос о еще большем повышении уровня напряжения постоянного тока до 540 В.

По предположениям многих исследователей на СПЭО вероятно появление централизованных источников, вырабатывающих полностью не кондиционную электроэнергию переменного или постоянного тока («грязный ток»). В этом случае получение электрической энергии требуемого вида и качества будет обеспечиваться индивидуальными или групповыми преобразователями, установленными в исполнительной системе.

Генераторный агрегат для СПЭО. Дополнительным преимуществом концепции СПЭО оказывается использование встроенного в авиадвигатель центрального элемента системы энергоснабжения – стартера-генератора или генераторного агрегата (ГА). Функциональные схемы сопряжения стартеров, генераторов, помп компрессоров с авиадвигателем показаны на рис. 2.

Хотя встроенный ГА будет иметь большой диаметр ротора, поскольку размещается на валу авиадвигателя, а значит большие габариты и массу (приблизительно 20–50 %), но за счёт извлечения привода и коробки дополнительных агрегатов общего увеличения массы ГА не произойдёт.

Встроенный ГА упростит всю систему вторичного энергоснабжения и обеспечит значительный экономический эффект (КПД увеличится на 9–11 %, а наработка на отказ – в 10 раз и более). Это позволит совместить обслуживание ГА с капитальным ремонтом АД.

Наибольший эффект от встроенного ГА можно получить, если выполнить его нерегулируемым по напряжению и частоте, а необходимое качество электроэнергии обеспечить за счёт индивидуальных вторичных источников для каждой группы потребителей.

Известно, что массогабаритные показатели ГА уменьшаются с увеличением частоты вращения ротора. Если совместить встроенный ГА с полупроводниковыми вторичными источниками электроэнергии, то желательно увеличить частоту вращения ротора ГА до $(30–50)\cdot10^3$ об/мин. Обеспечить такую частоту вращения для встроенного ГА проблематично, а поэтому стоит попробовать найти способы получения высокой частоты выходного напряжения ГА при низкой частоте вращения ротора.

Многополюсность генератора решает эту проблему, но при этом ухудшаются массогабаритные показатели. Решить это противоречие можно за счёт возбуждения генератора переменным током. При этом угловая скорость магнитного поля в воздушном зазоре будет определяться суммой скорости поля относительно ротора и скорости ротора в

пространстве. Если выполнить ГА по схеме, показанной на рис. 3, то при этом достигается автономность возбуждения, бесконтактность и высокая частота выходного напряжения при низкой частоте вращения ротора.

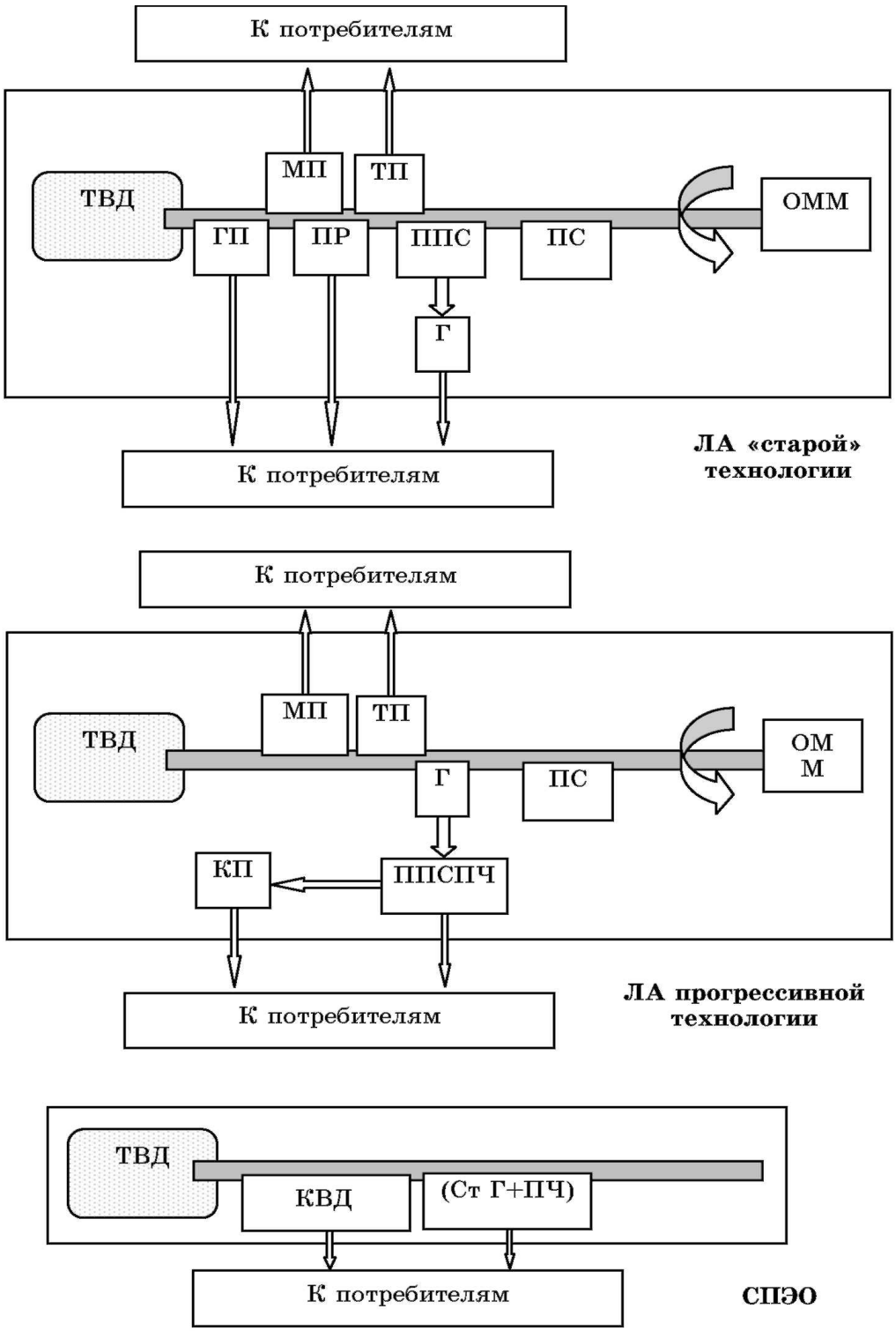
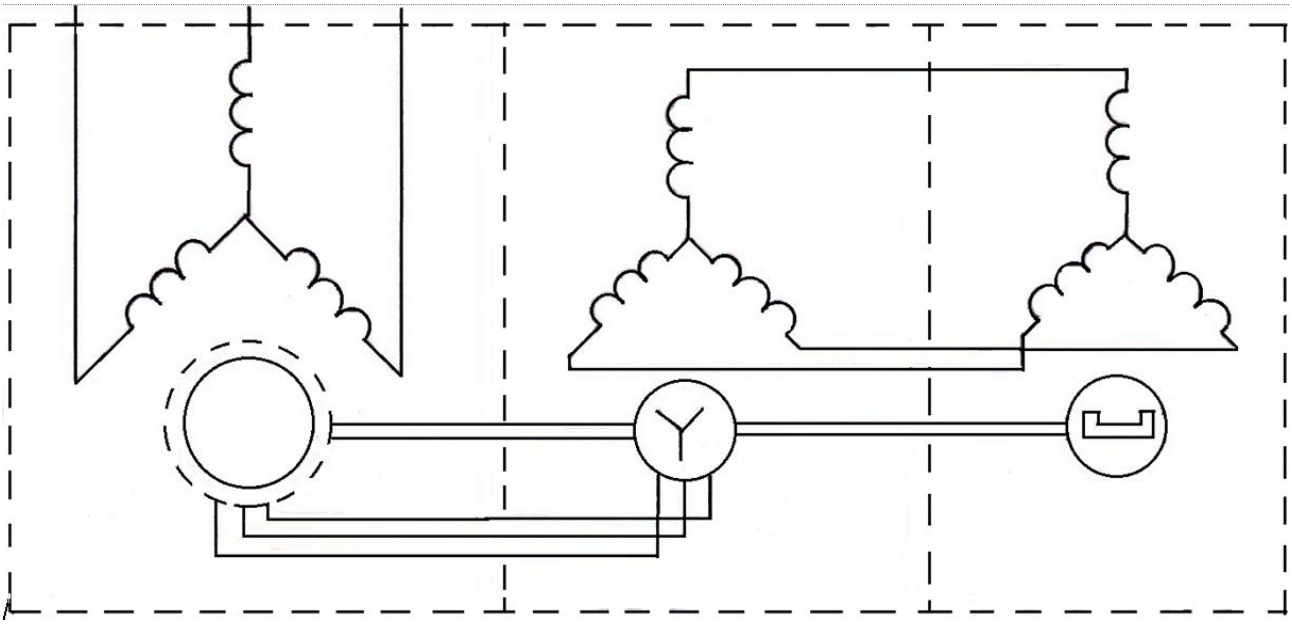


Рис. 2. Функциональные схемы сопряжения турбины высокого давления (ТВД) с вспомогательными источниками энергии: МП – маслопомпа; ГП – гидропомпа; ТП – топливная помпа; ППС – привод постоянной скорости; ПС – пневмостартер; ПР – пневморедуктор; ОММ – отбор механической мощности; КВД – компрессор высокого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

Частота выходящего напряжения в данном ГА определяется таким соотношением:

$$f_{\text{сг}} = \frac{p_{\text{сг}}}{2\pi}\left(\Omega + \Omega_{\text{отн}}\right) = \frac{\Omega}{2\pi}\left(p_{\text{сг}} + p_{\text{в}} + p_{\text{пв}}\right),$$

где $p_{\text{сг}}$, $p_{\text{в}}$, $p_{\text{пв}}$ – количество пар полюсов соответственно синхронного генератора, возбудителя и подвозбудителя; Ω – угловая скорость ротора, $\Omega_{\text{отн}}$ – угловая скорость поля синхронного генератора относительно ротора.



а *б* *в*

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ГА: *а* – синхронный генератор; *б* – возбудитель; *в* – подвозбудитель

Выводы. Исходя из выше изложенного, необходимую частоту выходного напряжения можно получить подбором как количества пар полюсов, так и количества возбудителей у встроенного ГА. А если ГА должен иметь регулируемые напряжение и частоту, то можно применить каскадный агрегат [6]. Данный агрегат имеет большие возможности выбора количества полюсов индуктора синхронного генератора (возбудителя ГА), что облегчает изготовление. Каскадный агрегат с регулируемыми напряжением и частотой может быть встроен в АД и иметь с ним одинаковые сроки регламентных робот.

Таким образом, 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.

Список литературы

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 / Д. Э. Брускин, С. И. Зубакин. – М.: ВИНИТИ, 1986. – Т. 6 – 108 с.

3. *Cronin M. J.* Design aspect of systems in all electric aircraft / M. J. Cronin // SAE Techn. Pap. Ser. – 1982. – № 821436. – 11 p.
4. *Cronin M. J.* The all electric airplane: It's development and logistic support / M. J. Cronin // NAECON 81. – Vol. 1. – P. 341–347.
5. *Воронович С.* Полностью электрический самолет / С. Воронович, В. Каргапольцев, В. Кутахов //Авиапанорама. – 2009. – № 2. – С. 23–27.
6. *А. с.* №1198681 от 28 марта 1984 г. на изобретение: «Каскадный агрегат» / В. С. Мартынюк.
7. *Красношапка М. М.* Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты. – К.: Техніка, 1974. – 168 с.

В. О. Гришин

Генераторний агрегат, вбудований в авіадвигун літака з цілком електрифікованим обладнанням

Подано результати техніко-економічного аналізу створення літака з цілком електрифікованим обладнанням. Розглянуто можливість застосування каскадного агрегату як генераторного агрегату, вбудованого в авіадвигун літака з цілком електрифікованим обладнанням.

V. A. Grishin

A generator plant built-in the aero-engine of airplane with completely electrified equipment

The results of techno-economic analysis of airplane with completely electrified equipment creation are presented. Possibility of cascade plant use is considered as a generator plant built-in an aero-engine of airplane with completely electrified equipment.