

УДК 621.331

## ИНФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГОЙ

Б.В. ЖМУРОВ<sup>1</sup>, С.П. ХАЛЮТИН<sup>1</sup>, А.О. ДАВИДОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», г. Москва, Россия

Исследования в области перспектив развития авиации показывают, что наиболее приемлемым с точки зрения экологичности и энергоэффективности является переход к полностью электрическому самолету. Электрификация идет в первую очередь по пути повышения эффективности наиболее энергоемких элементов летательного аппарата. В первую очередь это силовая установка и система кондиционирования. Актуальной задачей, решаемой в данной статье, является разработка методики проектирования энергокомплекса летательного аппарата (ЛА) с электрической тягой. Именно наличие электрической силовой установки и расширяет понятие электроэнергетического комплекса ЛА. В статье рассмотрена двухуровневая информационно-энергетическая технология проектирования энергосистем современных летательных аппаратов. На энергетическом уровне оптимизируются потоки энергии, а на информационном – синтезируются законы управления, обеспечивающие выполнение ограничений и минимизацию потерь при заданном уровне надежности всей системы. Наиболее приемлемым с точки зрения экологичности и энергоэффективности является переход к полностью электрическому самолету. Предлагаемая информационно-энергетическая методика дает возможность разрабатывать электрические и гибридные летательные аппараты с оптимальными массогабаритными и энергетическими характеристиками за счет: оптимизации циклограммы потребления электроэнергии с помощью перераспределения моментов включения потребителей, что обеспечивает более равномерный режим энергопотребления, который позволяет при одном и том же наборе потребителей уменьшить номинальные мощности генераторов и, как следствие, снизить полетную массу; управления распределенной системой генерации электроэнергии, что обеспечивает возможность использования разнородных источников энергии; управления отказобезопасностью на основе оперативного изменения топологии силовой сети; управления рекуперацией энергии; диагностирования состояния источников, преобразователей, потребителей (входные цепи) и силовой сети в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** энергокомплекс летательного аппарата, энергетическое проектирование, система электроснабжения, полностью электрический самолет, электрическая силовая установка.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области перспектив развития авиации [1, 2] показывают, что наиболее приемлемым с точки зрения экологичности и энергоэффективности является переход к полностью электрическому самолету (ПЭС). В Европе и США на разработку технологий для ПЭС выделяются существенные финансовые ресурсы. Так, на программу More Electric Aircraft (MEA), в которой принимают участие 40 организаций Евросоюза, на 4 года выделено 400 млн евро. На программу Power Optimized Aircraft (POA) при координации фирмы Liebherr-Aerospace выделено 100 млн евро. Кроме того, с 2007 по 2010 год финансировалась совместная европейско-американская программа More Open Electrical Technologies, результатом которой стало появление таких самолетов, как пассажирские A-380, Boeing 787, многоцелевой истребитель F-35, БПЛА «Барракуда». Эти самолеты можно назвать более электрическими.

Следует отметить, что электрификация идет в первую очередь по пути повышения эффективности наиболее энергоемких элементов летательного аппарата. В первую очередь это силовая установка и система кондиционирования.

Постепенно делаются попытки перевода на питание электрической энергией и рулевых приводов (РП) систем автоматического управления (САУ) полетом с целью избавления от трубопроводов централизованной гидросистемы. С одной стороны, такой постепенный переход позволяет отрабатывать отдельные элементы ПЭС на существующих моделях самолетов. С другой стороны, постепенное внедрение элементов СЭС снижает экономические риски неудачного внедрения. По такому же пути пытаются идти и авиационная промышленность России.

В связи с этим от качества электроэнергии, вырабатываемой энергосистемами летательных аппаратов, зависит возможность выполнения заданной задачи. На сегодняшний день разработано большое количество различных энергогенерирующих устройств, основанных на различных принципах получения и преобразования энергии (солнечной, ветро-, гидро-, тепловой, механической и др.). Уровень и качество электроэнергии, вырабатываемой вышеуказанными энергогенерирующими устройствами, в большинстве случаев не удовлетворяет современным требованиям, в частности, приведенным в стандарте [3].

Актуальной задачей, решаемой в данной статье, является разработка методики проектирования энергокомплекса летательного аппарата (ЛА) с электрической тягой. Именно наличие электрической силовой установки и расширяет понятие электроэнергетического комплекса ЛА.

### ПРОБЛЕМА, РЕШАЕМАЯ С ПОМОЩЬЮ ИНФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Появление для пассажирской авиации принципиально нового способа для приведения в движение самолета – электрической тяги (как для гибридных, так и для полностью электрических самолетов) выдвигает к электроэнергетическому комплексу дополнительные требования, связанные с необходимостью оптимизации потоков энергии в ЛА, которую невозможно выполнить, используя существующие методики проектирования систем электроснабжения. Эту проблему и предлагается решить на основе разработанной информационно-энергетической методики.

Основной задачей проектирования энергокомплекса ЛА является определение множества реальных и (или) виртуальных (прототипов) источников, преобразователей и накопителей электрической энергии, а также их структуры с целью обеспечения всех потребителей электроэнергией заданного качества на всех режимах полета и во всех режимах работы энергосистемы (нормальном, ненормальных и аварийных согласно [3]). При этом необходимо минимизировать полетную массу энергосистемы при выполнении ряда ограничений (технологических, экономических, эксплуатационных и др.).

Решение поставленной задачи предлагается осуществлять в два этапа:

– оптимизация структуры энергокомплекса (состава источников, накопителей, преобразователей и потоков энергии между ними и потребителями) с заданным уровнем резервирования (результат – силовая составляющая бортовой электросети) – *энергетический уровень*;

– синтез законов управления потоками энергии, обеспечивающих выполнение заданных ограничений на всех режимах, – *информационный уровень*.

### ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

Оптимизация структуры энергетического комплекса – это процедура получения наилучшего проектного решения (структуры источников энергии, топологии системы преобразования энергии с учетом удельных энергетических характеристик отдельных элементов системы).

В качестве критерия оптимизации проектного решения может быть выбрана масса энергокомплекса при заданном множестве ограничений (функциональных, технических, технологических, эксплуатационных, экономических и т. п.).

В общем случае совершенство проектного решения энергокомплекса может быть оценено удельными энергетическими показателями, учитывающими как мощность и запасенную энергию, так и массу, и объем (габариты):

– плотность энергии (мощности)  $\frac{W}{V}, \left[ \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^3} \right]$   $\left( \frac{P}{V}, \left[ \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3} \right] \right)$  – отношение энергии (мощности) к объему устройства (системы);

– удельная мощность (энергия)  $\frac{P}{m} \left[ \frac{\text{кВт}}{\text{кг}} \right]$   $\left( \frac{W}{m} \left[ \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{кг}} \right] \right)$  – отношение мощности (энергии) устройства (системы) к его (ее) массе.

Заданные требования к назначению летательного аппарата (масса, объем, энергопотребление полезной нагрузки, время и дальность перелета) косвенно определяют минимальную массу, объем, мощность источников и запасенную энергию на борту исходя из технического совершенства устройств, входящих в энергокомплекс [4].

Исходными данными для энергетического уровня является множество первичных источников энергии (в общем случае – ядерной, химической, электрохимической и электрической), преобразователей энергии (и первичных, которые генерируют электроэнергию из других видов, и электрических), а также исполнительных устройств – приводов винтов силовых установок и приводов рулевых управляющих поверхностей. Каждый из рассматриваемых объектов обладает совокупностью указанных удельных энергетических характеристик.

В связи с большим количеством вариантов источников и преобразователей энергии задача оптимизации может быть решена только на основе системного подхода [5, 6] с использованием современных вычислительных средств, позволяющих на основе формализации процедур представления исходных данных и оптимизации осуществить выбор наилучшего проектного решения [7–9].

Процедура оптимизации использует формализованный метод получения удельных энергетических характеристик (критериев оптимальности) по характеристикам элементов и структуре (способу их соединения) – структурно-функциональный метод [10–13].

Предварительный анализ предлагается проводить на основе применения объектно-энергетических диаграмм [14]. При анализе энергетических потоков, который должен проводиться для каждого режима полета (взлет, маневрирование, посадка), определяются: возможность рекуперации энергии; необходимость введения дополнительных энергетических каналов (избыточности) для обеспечения заданного уровня надежности; возможность повторного использования утилизированной (в основном – тепловой) энергии с целью повышения общего КПД энергокомплекса.

Основная процедура (вычисление параметров системы по параметрам элементов) может быть представлена на примере расчета удельной мощности  $p_{\text{ВЫХ}}$  для одного выходного канала и  $n$  преобразователей:

$$p_{\text{ВЫХ}} = (m_1 p_{\text{ВХ1}} \quad m_2 p_{\text{ВХ2}} \quad \dots \quad m_i p_{\text{ВХi}} \quad \dots \quad m_n p_{\text{ВХn}}) \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j} \eta_j \\ \sum_{j=1}^n a_{2j} \eta_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} \eta_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n a_{nj} \eta_j \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

где  $p_{\text{ВХi}}, \eta_i, m_i$  – удельная входная мощность, КПД и масса  $i$ -го преобразователя;  
 $n$  – общее количество преобразователей;

$a_{ij}$  – элементы матрицы  $A$  (матрица структуры), которая определяет структуру энергокомплекса ( $0 \leq a_{ij} \leq 1$  – доля мощности, которая передается от  $i$ -го к  $j$ -му преобразователю, знак определяет направление передачи мощности). Например, матрица  $A$  для энергокомплекса (рис. 1), состоящего из 4-х преобразователей, будет равна:

$$A = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,1 & 0,2 & 0,2 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0,6 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

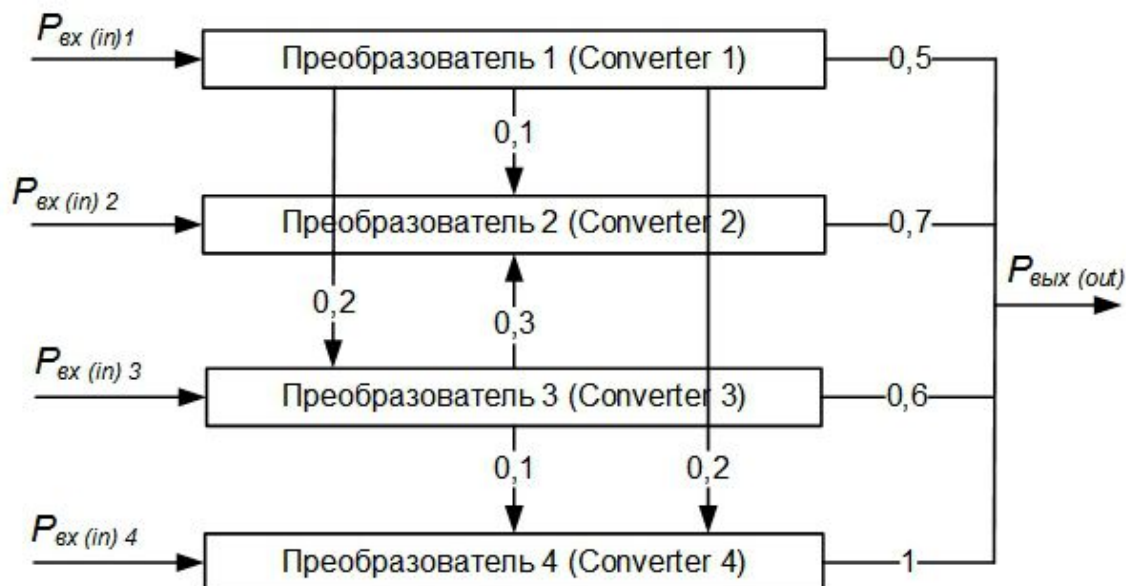


Рис. 1. Структурно-функциональная схема энергокомплекса, состоящего из 4-х преобразователей  
Fig. 1. Structural and functional diagram of the energy complex, consisting of 4 converters

Решение данной задачи разбивается на две подзадачи:

– оценка возможности реализации проекта, в результате чего определяются требуемая суммарная мощность и запас энергии, проводится анализ возможности вырабатывать требуемую мощность заданное время. После проведения данной оценки определяется область допустимых вариантов энергетических комплексов (существующие агрегаты и устройства, прототипы, исходные данные для проектирования);

– определение оптимального соотношения между множеством электрических силовых установок, их мощностью, аэродинамической компоновкой ЛА, а также множеством источников, преобразователей и накопителей электроэнергии.

В результате может быть выбрано несколько проектных решений, удовлетворяющих оптимуму выбранного критерия. Выбор конкретной топологии и параметров энергокомплекса осуществляется проектировщиком, который определяет приоритеты среди показателей проектного решения.

## СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОМ

На информационном уровне проектирования синтезируются законы управления энергокомплексом с учетом определенной на энергетическом уровне возможности рекуперации энергии, реконфигурации системы и защиты от аварийных режимов. Результатом проектирования энергосистемы на информационном уровне являются структура энергокомплекса, уточненная с учетом системы управления, характеристики основных составляющих компонентов, исходные данные (частные технические задания) для разработки и изготовления элементов ЛА, которые использовались в виде виртуальных объектов. Одним из устройств, разработанных в рамках информационно-энергетической технологии является интеллектуальное распределительное устройство [15].

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Предлагаемая информационно-энергетическая методика была применена при разработке энергокомплекса прототипа полностью электрического самолета АВФ-32НС (рис. 2).



Рис. 2. Концептуальная трехмерная модель полностью электрического самолета АВФ-32НС  
Fig. 2. Conceptual three-dimensional model of the all-electric aircraft AVF-32NS

В результате формирования аэродинамического облика и компоновки ПЭС были определены его массогабаритные характеристики. Аэродинамические расчеты основных характеристик самолета дали возможность определить необходимые энергетические характеристики электрических силовых установок, а анализ целевой задачи и требуемого оборудования и агрегатов ПЭС дал возможность определить необходимую мощность для обеспечения его работоспособности.

В качестве возможных источников энергии на борту АВФ-32НС были определены:

- батареи электрохимических аккумуляторов литий-ионной и литий-полимерной химической системы;
- батареи топливных элементов, работающих на запасенном на борту ЛА водороде и кислороде, получаемом из окружающего воздуха;
- фотоэлектрические батареи, расположенные на поверхностях ПЭС;
- батарея ионисторов – электролитические суперконденсаторы.

После выбора необходимого бортового оборудования и режимов работы потребителей электроэнергии была определена циклограмма энергопотребления ПЭС (рис. 3).

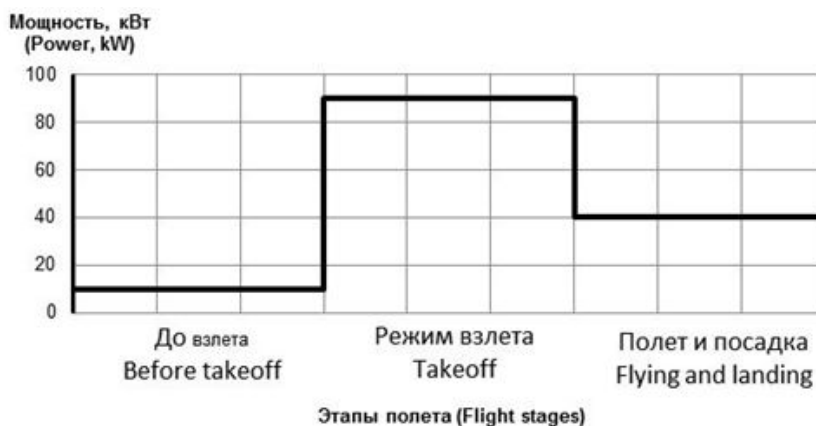


Рис. 3. Циклограмма энергопотребления полностью электрического самолета АВФ-32НС  
Fig. 3. Sequence diagram of all-electric aircraft AVF-32NS power

Оптимизация соотношения между множеством источников и потребителей электроэнергии на борту ПЭС с учетом времени полета, возможности рекуперации и накопления энергии позволила получить силовую часть структурной схемы электроэнергетического комплекса (рис. 4) и режимы его работы:

- нормальный режим работы электроэнергетического комплекса с возможностью диагностики источников, преобразователей, защитно-коммутационной аппаратуры и потребителей, электроэнергии;
- управление распределенной генерацией электроэнергии;
- оптимизация циклограммы электропотребления;
- реконфигурация питательной сети.

В нормальном режиме работы электроэнергетического комплекса все каналы генерирования электроэнергии работают в штатном режиме и питают часть потребителей, работающих в штатном, крейсерском режиме полета воздушного судна.

В данном режиме работы интеллектуальный электроэнергетический комплекс имеет возможность диагностирования состояния всех устройств: генераторов, преобразователей, коммутационных устройств, а также потребителей электрической энергии.

При необходимости кратковременного обеспечения питания потребителя с пиковой мощностью интеллектуальный электроэнергетический комплекс осуществляет подключение нескольких источников электроэнергии на питание одного мощного потребителя.

Режим управление распределенной генерацией электроэнергии позволяет обеспечить питание мощных потребителей с помощью источников с номинальной мощностью меньшей, чем мощность потребителя.

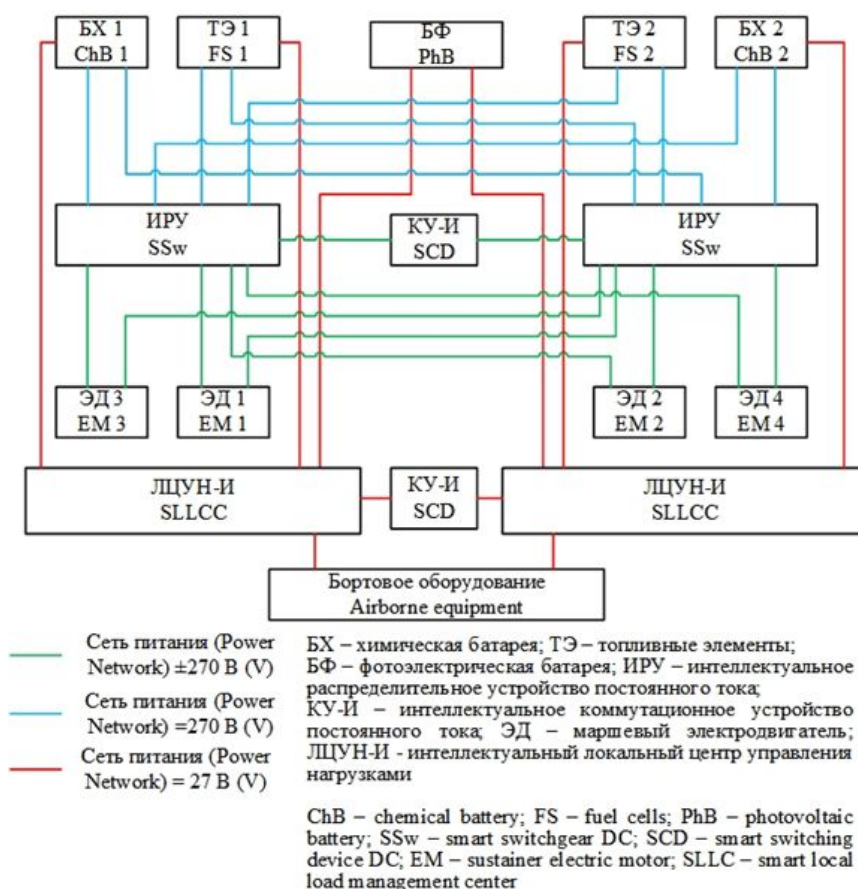


Рис. 4. Силовая часть структурной схемы электроэнергетического комплекса полностью электрического самолета АВФ-32НС

Fig. 4. The power structure of the electric power complex all-electric aircraft AVF-32NS

В режиме оптимизация циклограммы электропотребления интеллектуальный электроэнергетический комплекс обеспечивает перераспределение циклограммы электропитания потребителей за счет смещения по времени моментов включения различных потребителей электроэнергии.

Данный режим позволяет выровнять пиковые нагрузки диаграммы электропотребления и обеспечить меньшую загруженность генераторов электрической энергии.

При возникновении нештатных и аварийных режимов интеллектуальный электроэнергетический комплекс автоматически осуществляет *реконфигурацию питающей сети* и переключает потребителей, питающихся от аварийной сети на исправную сеть.

Данный режим обеспечивает бесперебойную и надежную работу потребителей первой категории, разрыв в электроснабжении которых не допускается.

Проектирование энергокомплекса ПЭС АВФ-32НС на информационном уровне позволило получить интеллектуальную энергосистему самолета, управление которым производится по цифровым каналам информационного обмена. В состав энергокомплекса ПЭС АВФ-32НС входят интеллектуальные интегральные каналы генерирования электрической энергии и интеллектуальная защитно-коммутирующая аппаратура.

Интеллектуальная система управления энергокомплекса ПЭС АВФ-32НС обеспечивает управление, контроль и реконфигурацию в случае отказа источника, а также управление электропитанием конечных приемников потребителей самолета в зависимости от режима работы электроэнергетического комплекса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая информационно-энергетическая методика дает возможность разрабатывать электрические и гибридные летательные аппараты с оптимальными массогабаритными и энергетическими характеристиками за счет:

- оптимизации циклограммы потребления электроэнергии с помощью перераспределения моментов включения потребителей, что обеспечивает более равномерный режим энергопотребления, который позволяет при одном и том же наборе потребителей уменьшить номинальные мощности генераторов и, как следствие, снизить полетную массу;
- управления распределенной системой генерации электроэнергии, что обеспечивает возможность использования разнородных источников энергии;
- управления отказобезопасностью на основе оперативного изменения топологии силовой сети;
- управления рекуперацией энергии;
- диагностирования состояния источников, преобразователей, потребителей (входные цепи) и силовой сети в режиме реального времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрификация самолетов. Современное состояние и тенденции / С.П. Халютин, В.П. Харьков, А.В. Левин, Б.В. Жмуров, А.А. Богданов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2014. № 1. С. 555–558.
2. Левин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 213 (3). С. 50–57.
3. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. М.: Стандартинформ, 2011. 35 с.
4. Халютин С.П. К оценке объема энергии для полностью электрического самолета // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 2. С. 85–87.
5. Халютин С.П. Электрический самолет. Системный подход // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 72–76.
6. Халютин С.П. Объектно-энергетический метод конструирования моделей энергетических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 24–28.
7. Халютин С.П., Жмуров Б.В. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2010. Т. 1. С. 425–429.
8. Потемкин А.В., Горшков П.С., Жмуров Б.В. Синтез методики проектирования системы электроснабжения воздушного судна на основе ресурсно-ограничительного подхода // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2012. Т. 1. С. 483–484.



9. Потемкин А.В., Горшков П.С., Халютин С.П. Методика синтеза структурных схем системы электроснабжения воздушных судов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 1. С. 318–321.

10. Жмуров Б.В., Халютин С.П. Структурно-функциональное моделирование электроэнергетических систем самолета // Проблемы безопасности полетов. 2009. № 6. С. 45–53.

11. Жмуров Б.В., Халютин С.П., Корнилов С.В. Развитие структурно-функционального моделирования электроэнергетических систем самолета // Проблемы безопасности полетов. 2009. № 8. С. 53–62.

12. Халютин С.П., Жмуров Б.В. Повышение качества проектного решения для системы электроснабжения на основе структурно-функционального подхода // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2014. № 2. С. 235–239.

13. Халютин С.П., Хомченко А.А., Жмуров Б.В. Структурно-функциональный подход к разработке средств испытаний и контроля электроэнергетических систем воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 185. С. 104–110.

14. Халютин С.П. К вопросу о применении объектно-энергетических диаграмм // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2007. № 1. С. 96–98.

15. Халютин С.П., Жмуров Б.В., Харьков В.П., Дерех А.Я. Интеллектуальное распределительное устройство постоянного тока. Патент на изобретение RUS 2531907 28.02.2013.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Жмуров Борис Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доктор электротехники, главный конструктор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», bzhmurov@xlab-ns.ru.

**Халютин Сергей Петрович**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», skhalutin@xlab-ns.ru.

**Давидов Альберт Оганезович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», adavidov@xlab-ns.ru.

#### INFORMATION-ENERGY METHODOLOGY OF THE AIRCRAFT WITH ELECTRIC PROPULSION ENERGY COMPLEX DESIGN

**Boris V. Zhmurov<sup>1</sup>, Sergey P. Khalyutin<sup>1</sup>, Albert O. Davidov<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia

#### ABSTRACT

Research in the field of aircraft development shows that from the point of view of sustainability and energy efficiency the most acceptable approach is the transition to all-electric aircraft (AEC). Electrification is aimed primarily on the aircraft most energy-intensive elements efficiency enhancing. Primarily these are power plant and air conditioning system. The actual problem discussed in this article is the development of methodology for the design of aircraft power complex with electric propulsion. The electric power plant literally extends the concept of aircraft power complex. The article considers two-level energy-informational design technology of the aircraft power complex. On the energetic level, the energy flows are optimized, and on the information level, the control laws that ensure restrictions compliance and loss minimization for a given level of entire system reliability are synthesized. From the point of view of sustainability and energy efficiency, the most acceptable is the transition to AEC. The proposed information-energy technique provides an opportunity to develop electric and hybrid aircraft with optimal weight and size and energy characteristics due to: electricity consumption timeline optimization through the redistribution of electric end users switch on moments, which provides a more uniform power mode, allowing the same set of electric users to reduce generator rated power, and as a result reduce the flight weight; manage a distributed system of electricity generation that provides the ability to use diverse energy sources; fault



safety management based on rapid changes in the power network topology; energy recovery control; the sources, converters and users (input circuit) and power network real-time diagnostic operations.

**Key words:** aircraft energy complex, energy design, power supply system, all-electric aircraft, electric propulsion.

## REFERENCES

1. **Khalyutin S.P., Khar'kov V.P., Lyovin A.V., Zhmurov B.V., Bogdanov A.A.** *Elektrifikatsiya samolotov. Sovremennoye sostoyaniye i tendentsii* [Electrification of the aircraft. Current status and trends]. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovations based on information and communication technologies], 2014, vol. 1, p. 555–558. (in Russian)
2. **Lyovin A.V., Khalyutin S.P., Zhmurov B.V.** *Tendentsii i perspektivi razvitiya aviacionogo elektrooborudovaniya* [Trends and prospects for the development of electric aviation]. *Nauchnij Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2015, vol. 213 (3), p. 50–57. (in Russian)
3. GOST R 54073-2010 [System of the State standards]. *Sistemy elektrosnabzheniya samolyotov I vertolyotov. Obschie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* [Power supply systems of airplanes and helicopters. General requirements and standards of electric energy quality]. Publishing house “Gostinfo”, 2011, 35 p. (in Russian)
4. **Khalyutin S.P.** *K otsenke ob'yoma energii dlya polnost'yu elektricheskogo samoleta* [On the estimation of the energy volume for all-electric aircraft]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo”* [Proceedings of the International Symposium “Reliability and quality”], 2015, vol. 2, p. 85–87. (in Russian)
5. **Khalyutin S.P.** *Elektricheskii samolot. Sistemnyy podkhod* [Electric aircraft. Systems approach]. *Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati N.Ye. Zhukovskogo* [Scientific Readings on aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky], 2015, vol. 3, p. 72–76. (in Russian)
6. **Khalyutin S.P.** *Ob'yektno-energeticheskii metod konstruirovaniya modeley energeticheskikh sistem* [Object-energy method of constructing models of energy systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 2007, vol. 1, p. 24–28. (in Russian)
7. **Khalyutin S.P., Zhmurov B.V.** *Algoritm opredeleniya sostava i parametrov pervichnykh istochnikov elektroenergii BPLA* [The algorithm for determining the composition and parameters of the primary sources of the UAV power]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo”* [Proceedings of the International Symposium “Reliability and quality”], 2010, vol. 1, p. 425–429. (in Russian)
8. **Potjomkin A.V., Gorshkov P.S., Zhmurov B.V.** *Sintez metodiki proyektirovaniya sistemy elektrosnabzheniya vozdushnogo sudna na osnove resursno-ogranichitel'nogo podkhoda* [Synthesis of a technique of designing the aircraft power supply system on the basis of resource-restrictive approach]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo”* [Proceedings of the International Symposium “Reliability and quality”], 2012, vol. 1, p. 483–484. (in Russian)
9. **Potjomkin A.V., Gorshkov P.S., Khalyutin S.P.** *Metodika sinteza strukturnykh skhem sistemy elektrosnabzheniya vozdushnykh sudov* [Methods of synthesis of structural schemes of aircraft power supply system]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo”* [Proceedings of the International Symposium “Reliability and quality”], 2013, vol. 1, p. 318–321. (in Russian)
10. **Zhmurov B.V., Khalyutin S.P.** *Strukturno-funktsional'noye modelirovaniye elektroenergeticheskikh sistem samoleta* [Structural and functional simulation of the aircraft electric power systems]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Flight safety problems], 2009, vol. 6, p. 45–53. (in Russian)
11. **Zhmurov B.V., Khalyutin S.P., Kornilov S.V.** *Razvitiye strukturno-funktsional'nogo modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem samoleta* [The development of structural and functional simulation of electric power systems of the aircraft]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Flight safety problems], 2009, vol. 8, p. 53–62. (in Russian)

**12. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V.** *Povysheniye kachestva proyektnogo resheniya dlya sistemy elektrosnabzheniya na osnove strukturno-funktsional'nogo podkhoda* [Improving the quality of the design solutions for the power supply system based on structural-functional approach]. *Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati N.Ye. Zhukovskogo* [Scientific Readings on aviation, dedicated to the of N.E. Zhukovsky], 2014, vol. 2, p. 235–239. (in Russian)

**13. Khalyutin S.P., Khomchenko A.A., Zhmurov B.V.** *Strukturno-funktsional'nyy podhod k razrabotke sredstv ispitaniy I kontrilya elektroenergeticheskikh sistem vozdushnih sudov* [Structural and functional approach to the development of test equipment and control of electric power systems of aircraft]. *Nauchnij Vestnik MGTU GA* [The Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2012, vol. 185, p. 104–110. (in Russian)

**14. Khalyutin S.P.** *K voprosu o primenenii ob'yektno-energeticheskikh diagramm* [On the issue of the application of object-energy diagrams]. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovations based on information and communication technologies], 2007, vol. 1, p. 96–98. (in Russian).

**15. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V., Khar'kov V.P., Dereh A.Ya.** *Intellektual'noye raspredelitel'noye ustroystvo postoyannogo toka* [Smart Switchgear DC]. *Patent na izobreteniyе* [Patent for invention] RUS 2531907 28.02.2013. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Zhmurov Boris Vladimirovich**, PhD, Associate Professor, Chief Designer LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", bzhmurov@xlab-ns.ru.

**Khalyutin Sergey Petrovich**, Doctor of Science, Professor, Director General, CEO LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", skhalutin@xlab-ns.ru.

**Davidov Albert Oganezovich**, Doctor of Science, Senior Researcher, Chief Researcher LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", adavidov@xlab-ns.ru.