

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В АВИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ ОТ В. С. КУЛЕБАКИНА ДО ПОЛНОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО САМОЛЕТА

**С.П. Халютин**

*Научно-производственное объединение НаукаСофт*

Россия, 129085, Москва, ул. Годовикова, 9, стр. 3

E-mail: sergey@khalutyin.ru

**Ключевые слова:** управление в электроэнергетике, объектно-энергетический метод, метод математического прототипирования энергетических процессов, метод обратных задач динамики, нелинейные распределенные электроэнергетические системы с переменной структурой.

**Аннотация:** Рассматривается ретроспектива применения электрической энергии на борту летательных аппаратов, появления и изменения задач управления электропитанием. Проводится анализ изменения свойств электроэнергетической системы (ЭЭС) как объекта управления, возможностей, целей и методов управления в ЭЭС. Показано, что современная ЭЭС летательного аппарата – это существенно нелинейная многопараметрическая система с переменной структурой. Разработанный энергетический метод – метод математического прототипирования энергетических процессов – позволяет учитывать указанные особенности ЭЭС как объекта управления, а совокупность методов, в том числе с использованием концепции обратных задач динамики, позволяет системно подойти к решению всей совокупности задач синтеза законов управления.

## 1. Начало применения электричества в авиации и первые задачи управления

Появление электрической энергии на борту летательных аппаратов относится к 1883 году [1], когда на дирижабле Гастона Тиссандье был применен электрический двигатель, однако массово электрооборудование стало использоваться в начале XX века, когда на самолетах Пе-2 (СССР) и Focke Wolf FW-190 (Германия) появились электроприводы и другие электрические устройства.

Первые научные работы в области авиационной электроэнергетики, в том числе по вопросам управления, принадлежат академику Виктору Сергеевичу Кулебакину (рис. 1), среди них «Авиационные магнето высокого напряжения», серия книг «Электрификация самолетов...» с его учениками И. П. Синдеевым, В. Т. Морозовским, В. Д. Нагорским. Он является основателем и первым руководителем научной школы «Авиационная электротехника и электроэнергетика». Следует отметить его принципиальность в отстаивании научных идей, несмотря на их несовпадение



Рис. 1. В. С. Кулебакин с учениками

с общепринятыми взглядами (например, по проблеме инвариантности, рассматриваемой Г. В. Щипановым).

Первые системы электроснабжения использовали напряжение постоянного тока, В. С. Кулебакин для таких систем электроснабжения создал общую теорию работы вибрационных и угольных регуляторов напряжения, которая впоследствии использовалась и для полупроводниковых регуляторов.

## 2. Развитие объекта управления

Историю развития авиационной электроэнергетики можно разбить на несколько этапов в зависимости от технологии и условий применения авиационной техники.

**Первый этап** (1940 – 1980-е гг.) связан с появлением и широким применением газотурбинных двигателей, увеличением скоростей и высот полета. Это потребовало разработки новых бесконтактных электромеханических генераторов, увеличения напряжения и установленной мощности бортовой электрической сети.

Разработаны и серийно выпускались многоканальные системы электроснабжения переменного трехфазного тока постоянной частоты с приводами постоянной скорости вращения, регулирование скорости вращения приводов и напряжения генераторов осуществлялось комплексными аналоговыми полупроводниковыми регуляторами, в том числе обеспечивалось управление (распределение мощности между каналами) параллельной работой электромашинных генераторов. Для запуска использовались электростартеры постоянного тока, в том числе и стартер-генераторы, для управления которыми применялись аналогичные регуляторы.

Для резервирования систем переменного тока широко использовались электромашинные преобразователи энергии. В качестве аварийных источников электрической энергии применялись свинцово-кислотные и щелочные (серебряно-цинковые и никель-кадмиевые) аккумуляторные батареи, для которых не требовались специализированные системы управления.

С точки зрения теории управления этот этап характеризуется широким применением линейных (ПИД) регуляторов напряжения и частоты, а также реализованных на аналоговых схемах и аналоговых измерениях логических функций защиты. Для синтеза законов управления использовались линеаризованные

математические модели объектов управления. Компенсация ограничений на быстрдействие схем реализовывалась введением необходимых выдержек времени, в общем случае негативно влияющих на бортовое оборудование.

**Второй этап** (до 2000-х гг.) характеризуется существенными достижениями цифровой микропроцессорной техники, появлением высокоэффективных силовых полупроводниковых приборов, высококоэрцитивных постоянных магнитов, а также уверенным курсом на полную электрификацию бортового оборудования с отказом от пневматических и гидравлических исполнительных механизмов.

В этот период окончательно проработана концепция самолета с полностью электрифицированным оборудованием [2–4], определена обобщенная структура цифровой системы управления (ЦСУ) ЭЭС, состоящей из ЦСУ верхнего иерархического уровня, а также ЦСУ каналов генерирования и запуска и ЦСУ управления нагрузками. Кроме того, выполнен ряд научных исследований в области цифровых безинерционных систем защиты и цифровых регуляторов напряжения не только в классе линейных систем, но и для более сложных нелинейных математических моделей объектов управления, максимально приближенных к реальным устройствам, синтезированы оптимальные законы управления в классе разрывных функций, в том числе с использованием «скользящих» режимов. Эти законы впервые в мире реализованы в опытном образце цифрового блока регулирования, защиты и управления, разработанного на кафедре Электрооборудования ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского.

**Третий этап** (начало 2000-х гг. – настоящее время) – это время практической реализации цифровых технологий в авиационном электрооборудовании и начало эпохи электродвижения – массового появления летательных аппаратов на электрической тяге [1, 5, 6].

Начало коммерческого серийного выпуска высокоэнергоемких литийионных аккумуляторов и тенденция снижения их стоимости послужили стимулом к бурному развитию летательных аппаратов с электрическими силовыми установками, для которых появилась новая задача управления – реализация режима рекуперации энергии [7, 8]. Объектом управления стала вся ЭЭС, так как процесс рекуперации существенно зависит не только от свойств потребителей электроэнергии и накопителей, но и определяется структурой ЭЭС и конкретным режимом ее работы. Появление в ЭЭС цифровых высокоскоростных информационных каналов обмена данными и высокопроизводительных цифровых измерительных устройств позволило вплотную подойти к обобщению задач моделирования ЭЭС для реализации в бортовых вычислителях, задач управления электропитанием в реальном масштабе времени с учетом изменяющихся свойств объекта управления. Это создает предпосылки к созданию и полноценному использованию «цифровых двойников» (ЦД) [9] в контуре управления.

Благодаря использованию ЦД появились совершенно новые возможности: система распределения электроэнергии может стать центром диагностирования всего авиационного оборудования [10]; интеграция в бортовую вычислительную систему ЦД всего оборудования и ЭЭС в целом с уточнением их параметров в реальном масштабе времени для валидации структуры и параметров математической модели объекта управления; управление всеми параметрами распределенной системы электроснабжения, в том числе ее реконфигурацией; распределение мощности источников электроэнергии; распределение циклограммы потребления

электроэнергии с целью снижения суммарной установленной мощности источников.

Ввиду того, что все устройства и агрегаты ЭЭС являются в первую очередь преобразователями электроэнергии, а параметры передаваемой электроэнергии являются, как правило, координатами состояния системы, предложен обобщенный энергетический метод получения математических моделей ЭЭС – метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [9, 11, 12]. Как объект управления современный электроэнергетический комплекс – это совокупность нелинейных взаимодействующих объектов с переменной структурой и непустым множеством регулируемых параметров. При этом структура объекта может изменяться в случайные моменты времени. Все эти свойства учитываются в ММПЭП, основное уравнение которого имеет вид [13]

$$(1) \quad \frac{d\mathbf{z}(t)}{dt} = \mathbf{B}^T(\mathbf{z}(t), \mathbf{U}(t))\mathbf{A}(\mathbf{z}(t), \mathbf{U}(t))\mathbf{B}(\mathbf{z}(t), \mathbf{U}(t))(-\nabla_{\mathbf{z}}W(\mathbf{z}(t), \mathbf{U})) + \left(\frac{d\mathbf{z}(t)}{dt}\right)_{ext},$$

где  $\mathbf{z}(t)$  – матрица-столбец координат состояния системы,  $\Delta\mathbf{z}(t)$  – матрица-столбец координат процессов,  $d\Delta\mathbf{z}(t)/dt$  – матрица-столбец скоростей протекания процессов в системе,  $(d\mathbf{z}(t)/dt)_{ext}$  – матрица-столбец составляющих  $d\mathbf{z}(t)/dt$ , обусловленных внешними притоками энергии в систему,  $\mathbf{U}(t)$  – вектор свойств системы, которые не связаны с протекающими процессами,  $\mathbf{B}(\mathbf{z}, \mathbf{U})$  – матрица топологии,  $\mathbf{A}(\mathbf{z}, \mathbf{U})$  – диссипативная матрица,  $\Delta\mathbf{F}(\mathbf{z}, \mathbf{U})$  – внутренние возмущающие силы,  $\mathbf{F}(\mathbf{z}, \mathbf{U})$  – потенциалы взаимодействия,  $W(\mathbf{z}, \mathbf{U})$  – скалярная функция запасенной энергии в системе.

### 3. Задачи и методы управления

Большинство задач управления в авиационных электроэнергетических системах можно сформулировать в общем виде следующим образом – перевести объект управления на гиперповерхность фазового пространства, которая характеризуется заданными свойствами (устойчивости, точности, энергетической эффективности и др.).

Классические методы решения данных задач управления приводят к необходимости решения краевых задач, что связано с большими затратами вычислительных ресурсов. Поэтому необходимо разработать такие методы управления, которые и учитывали бы функциональные свойства объекта, и позволяли бы свести решение функционального уравнения (например, уравнения Беллмана) к решению параметрического уравнения [14]. А универсальный энергетический подход получения моделей – ММПЭП, с учетом возможности получения решений в аналитическом виде, является хорошей предпосылкой для формирования единой унифицированной технологии синтеза законов и систем управления, реализуемых в перспективных цифровых интеллектуальных электроэнергетических комплексах летательных аппаратов.

### 4. Заключение

Развитие авиационной электроэнергетики на протяжении ее 100-летней истории характеризуется существенными изменениями, обусловленными новыми

техническими и технологическими возможностями. Объекты управления стали более сложными, существенно нелинейными, а режимы их работы находятся на границе энергетических возможностей из-за стремления снизить полетную массу. Вместе с этим изменились и задачи управления, и новые методы моделирования объекта управления и как следствие, появились новые методы решения задач управления. При этом важной тенденцией является с одной стороны обобщение методов синтеза систем управления, а с другой – адаптация к особенностям конкретного экземпляра объекта управления, хотя целевые функции (критерии) управления остаются неизменными со времен академика В. С. Кулебакина.

## Список литературы

1. Халютин С. П. Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания / С. П. Халютин, А. О. Давидов, Б. В. Жмуров // *Электричество*. 2017 № 9. С. 4–16.
2. Воронович С. А. Полностью электрический самолет / С. А. Воронович, В. А. Каргапольцев, В. П. Кутахов // *Авиапанорама*. 2009. № 2. С. 23.
3. Электрический самолет: от идеи до реализации / А. В. Левин, И. И. Алексеев, С. А. Харитонов, Л. К. Ковалев. М.: Машиностроение, 2010. 288 с.
4. Левин А. В. Полностью электрифицированный самолет – от концепции к реализации / А. В. Левин, И. И. Алексеев // *Авиационная промышленность*. 2006. № 2. С. 24–31.
5. Бутырин П. А. Производство систем электропитания для автономных электротранспортных средств в России / П. А. Бутырин, С. П. Халютин // *Электричество*. 2023. № 2. С. 13–26.
6. Халютин С. П. Электрификация летательных аппаратов – от ПЕ-2 до полностью электрического самолета. Направления исследований / С. П. Халютин // *Электропитание*. 2018. № 4. С. 4–26.
7. Халютина О. С. Электромеханический рулевой привод системы управления электрического самолета с режимом рекуперации как объект управления / О. С. Халютина, В. П. Харьков, С. П. Халютин // *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2016. № 1. С. 341–343.
8. Богданов А. А. Анализ путей рекуперации электрической энергии на борту летательного аппарата / А. А. Богданов, С. П. Халютин, В. П. Харьков // *Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского*. 2014. № 2. С. 208–212.
9. Цифровые двойники в теории и практике авиационной электроэнергетики / С. П. Халютин, И. Е. Старостин, А. О. Давидов [и др.] // *Электричество*. 2022. № 10. С. 4–13.
10. Халютин С. П. Система распределения электроэнергии воздушных судов – центр диагностирования и прогнозирования состояния авиационного электрооборудования / С. П. Халютин // *Электропитание*. 2020. № 2. С. 4–14.
11. Khalyutin S. P. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development / S. P. Khalyutin, I. E. Starostin, I. V. Agafonkina // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 1933.
12. Обобщенный метод математического прототипирования энергетических процессов. Задачи управления / С. П. Халютин, И. Е. Старостин, А. О. Давидов, В. П. Харьков // *Управление в аэрокосмических системах им. академика Е. А. Микрина (УАКС-2022): Материалы 15-ой мультikonференции по проблемам управления, Санкт-Петербург, 04–06 октября 2022 года*. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 7–10.
13. Старостин И. Е. Виды и формы представления основных уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов / И. Е. Старостин, С. П. Халютин, В. В. Париевский // *Электропитание*. 2022. № 4. С. 4–14.
14. Харьков В. П. Адаптивное управление динамическими системами на основе обратных задач динамики / В. П. Харьков // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 1994. № 4. С. 256.