

УДК 621.314
DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-88-103

ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЗАЦИИ

Б.В. ЖМУРОВ¹

¹ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», г. Москва, Россия

Процесс проектирования авиационных систем электроснабжения связан с необходимостью выполнения ряда требований нормативно-технических документов и проведения большого количества расчетов. Как показывает опыт, получение достоверных исходных данных о характере и величине потребления электрической энергии приемниками электроэнергии на ранних стадиях проектирования не представляется возможным. Состав приемников электроэнергии и мощности потребления электроэнергии в процессе проектирования неоднократно изменяются. Это приводит к необходимости многократного выполнения задач, связанных с синтезом структур первичных и вторичных систем генерирования и проведения расчетов.

Стремление повысить эффективность систем электроснабжения привело к появлению новых стандартизованных видов электрической энергии – 270 В постоянного тока и 380 В трехфазного переменного тока стабильной и нестабильной частоты. Из этого следует, что возможна реализация довольно большого количества вариантов структур систем электроснабжения, причем может быть несколько вторичных систем электроснабжения или вообще системы электроснабжения третьего или более высокого уровня.

Отсутствие готовых авиационных преобразователей видов энергии предполагает не возможность использования готовых компонентов, а разработку конкретных устройств параллельно с разработкой системы электроснабжения. В этом случае одним из результатов проектирования системы электроснабжения будет являться набор требований к устройствам и агрегатам проектируемой системы электроснабжения.

В любом случае процесс проектирования системы электроснабжения воздушных судов предполагает наличие множества итераций, учитывающих изменение как исходных данных, так и ограничений на элементы систем электроснабжения и сам процесс проектирования.

Традиционный подход к проектированию систем электроснабжения воздушных судов, предполагающий знание конструктором десятков нормативно-технических документов, регламентирующих этапы проектирования систем электроснабжения, а также наличие типовых структур систем электроснабжения, из которых и делается конкретный выбор, в настоящее время практически невозможен. Единственным способом осознанно подойти к проблеме проектирования систем электроснабжения воздушных судов и учесть все требования заказчика и нормативно-технической документации является его автоматизация.

Автоматизация проектирования систем электроснабжения воздушных судов как оптимизационной задачи предполагает формализацию объекта оптимизации, а также выбор критерия эффективности и управляющих воздействий. Под объектом оптимизации в данном случае понимаем сам процесс проектирования систем электроснабжения, формализация которого включает формализацию и объекта проектирования – системы электроснабжения воздушных судов.

Ключевые слова: проектирование, автоматизация, система электроснабжения, воздушное судно, оптимизация, проектное решение.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования систем электроснабжения (СЭС) воздушных судов (ВС) – это процесс получения некоторого оптимального в смысле заданных показателей эффективности проектного решения на основе исходных данных с учетом множества ограничений.

В качестве исходных данных (рис. 1) выступают:

- перечень потребителей электроэнергии (ЭЭ) требуемого вида и качества, разбитых по соответствующим категориям;
- циклограммы потребления мощности потребителями ЭЭ на каждом этапе полета для каждого режима работы системы электроснабжения (нормального, ненормального, аварийного и режима работы от наземного источника питания);

- требования заказчика к СЭС (определяется в техническом задании) и требования нормативно-технической документации (ГОСТы, ОСТы, бюллетени и др.);
- информация об элементах СЭС (источниках ЭЭ, преобразователях, защитной и коммутационной аппаратуре, проводах и др.), которые выпускаются в Российской Федерации и за рубежом и допущены к применению в бортовом оборудовании.

Целью формализации информации об элементах является создание базы данных (БД) элементов СЭС, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями. Особенностью формализации множества требований технического задания и нормативно-технической документации (НТД) является возможность их изменения в процессе проектирования. Учет такой особенности предполагается на основе применения ресурсно-ограничительного подхода [1–6], который построен на основе алгебры ограничений, расширяющей реляционную алгебру. Формализация потребителей и циклограмм потребления мощности предполагается в виде динамической базы данных. С точки зрения формализации результатов эскизного и технического проектирования введено понятие проектного решения, которое есть не что иное, как множество элементов СЭС и структура СЭС (связи между элементами). Такая формализация проектного решения (разделение на функциональные и структурные свойства) позволяет использовать разработанный структурно-функциональный подход [7–9] для синтеза структур первичных и вторичных СЭС, определения показателей эффективности СЭС по показателям эффективности элементов, из которых она состоит, и структуре.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Для решения задачи эффективного поиска и принятия решения при проектировании СЭС предлагается рассмотреть моделирование системы электроснабжения летательного аппарата с точки зрения структурно-функционального подхода [6, 7], суть которого заключается в таком представлении функциональных свойств составных частей системы и ее структуры, которое позволит формализовать определение функциональных свойств системы без дополнительных испытаний.

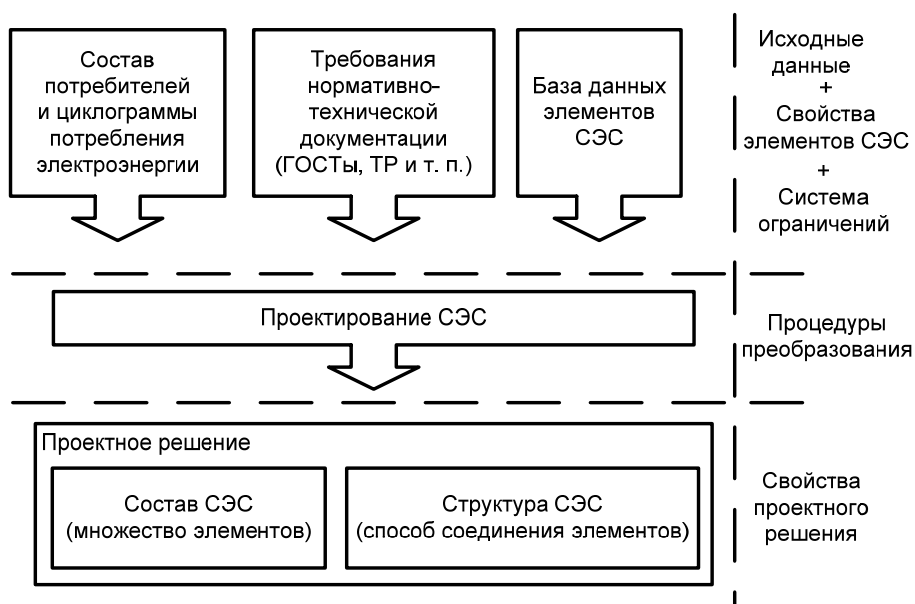


Рис. 1. Формализация процесса проектирования СЭС
Fig. 1. Formalization of the process of designing the electrical power system

В свою очередь, для полной реализации возможностей структурно-функционального подхода, ведутся работы по формализации процессов получения свойств проектного решения

из свойств элементов и структуры, преобразований структур СЭС в схемы замещения, необходимые для проведения расчетов (нормальных и аварийных токов ветвей, надежности и др.).

С точки зрения процесса проектирования СЭС можно выделить три группы ограничений (рис. 2) – ограничения множеств допустимых элементов СЭС, ограничения допустимых структур проектного решения, а также функциональные и параметрические ограничения [6]. Основная задача при формализации ограничений – это максимальное сужение области поиска путем учета всего спектра ограничений.

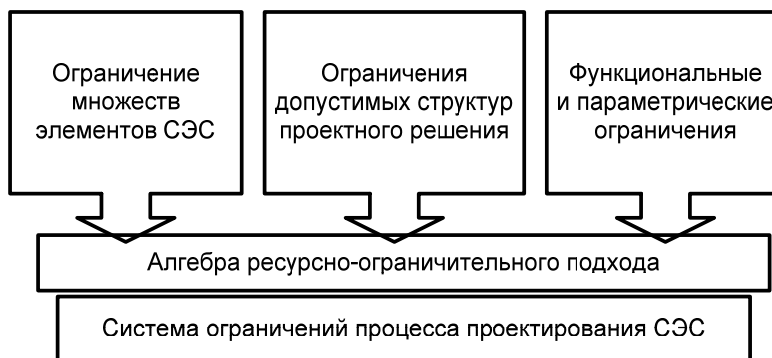


Рис. 2. Формализация ограничений
Fig. 2. Formalization of restrictions

Для системы электроснабжения как совокупности элементов, участвующих в получении, преобразовании и распределении электроэнергии заданного вида и качества, вводим множество элементарных объектов:

$$X^1 = \{x_i^1\}; X^2 = \{x_i^2\}; X^3 = \{x_i^3\}; X^4 = \{x_i^4\}; X^5 = \{x_i^5\},$$

где X^1 – множество первичных источников электрической энергии, в качестве которых выступают электромеханические преобразователи (генераторы), химические источники тока (аккумуляторные батареи); X^2 – множество преобразователей электрической энергии, это могут быть как вторичные источники, преобразующие виды и уровни напряжения, так и преобразователи частоты; X^3 – множество элементов защитной и коммутационной аппаратуры (реле, контакторы, автоматы защиты, предохранители, выключатели и т. д.); X^4 – множество элементов авиационной электрической проводки, по которой осуществляется передача электрической энергии на борту воздушного судна; X^5 – множество элементов, которые обеспечивают регулирование и управление системой электроснабжения.

Система электроснабжения состоит из элементов множеств X^j , находящихся в определенной связи, и математически описывается выражением

$$X^{CЭС} = x_i^{CЭС} : \forall (x_1^1 \dots x_j^1) \in X^1, (x_1^2 \dots x_k^2) \in X^2, (x_1^3 \dots x_l^3) \in X^3, (x_1^4 \dots x_m^4) \in X^4, \\ (x_1^5 \dots x_n^5) \in X^5 \exists s_i \Rightarrow s_i \times [x_1^1 \dots x_j^1, x_1^2 \dots x_k^2, x_1^3 \dots x_l^3, x_1^4 \dots x_m^4, x_1^5 \dots x_n^5] = x_i^{CЭС} \in X^{CЭС}.$$

В этом выражении s_i – это оператор структуры СЭС, который однозначно описывает связь элементов, то есть математически каждый экземпляр (т. е. вариант) системы электроснабжения получается в результате операции структурирования над множеством элементов элементарных множеств:

$$x_i^{CЭС} = s_i \times x_{1 \dots j(k,l,m,n)}^{1 \dots 5}.$$

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Применение такого подхода позволяет формализовать задачу проектирования системы. В общем случае эта задача подразумевает решение трех основных подзадач: синтеза, анализа и выбора технического решения.

Определение свойств проектируемой системы и является целью задачи анализа технического решения. В рамках структурно-функционального подхода предполагается применение объектно-энергетического метода моделирования электроэнергетических систем [10, 11, 12], в котором также используется декомпозиция объектов СЭС.

Свойства СЭС характеризуются параметрами и признаками, а также их значениями. Причем значение признака – это качественная характеристика свойства объекта, в то время как значение параметра имеет количественное выражение. Также своими свойствами обладают все элементы, из которых в конечном итоге состоит СЭС. В общем виде свойства системы электро-снабжения можно представить следующим образом:

$$Z^{СЭС} = [Z_1, Z_2],$$

где Z_1 – множество значений признаков системы (элементов); Z_2 – множество значений параметров системы (элементов).

На основании того, что свойства технического объекта проявляются при его взаимодействии с окружением, возникает необходимость конкретизации свойств СЭС путем анализа состава окружения, т. е. всего не принадлежащего ей множества технических систем, внешних факторов, условий работы, оказывающих существенное влияние. Пусть совокупность всех внешних воздействий, взаимодействий характеризуется множеством $V = \{v_i\}$. Тогда операция определения свойств системы (анализ) может быть представлена следующим образом:

$$Z^{СЭС} = F(S, Z^{эл}, V).$$

То есть свойства системы однозначно определяются структурой (связями), свойствами самих элементов и внешними воздействиями. Оператор F определяет правило расчета значений признаков и параметров системы. Важной системной характеристикой, описывающей процесс проектирования СЭС, является цель проектирования, характеризующая качество проектного решения. Желаемое качество СЭС, которым должна обладать синтезируемая система, задается техническими требованиями в техническом задании.

Конкретная реализация варианта проектируемой системы с учетом ее свойств описывается выражением

$$T = \langle s_i, x_{(1nj(k,l,m,n))}^{1...5}, Z_i^{СЭС} \rangle.$$

Техническое задание, в свою очередь, не что иное, как описание желаемых свойств $Z_{к\text{ жел}}^{СЭС}$. Поиск решения осуществляется сравнением характеристик различных вариантов СЭС с соответствующими значениями показателей, определенных требованиями. При этом должно выполняться условие

$$\{Z_k^{СЭС} \text{ не хуже } Z_{к\text{ жел}}^{СЭС}\}.$$

Это означает, что искомое решение должно находиться в области требуемых значений признаков и параметров. При этом если технических реализаций, удовлетворяющих данному

условию, несколько, то окончательный выбор выполняется с учетом сформированного критерия. Критерий определяется целями проектирования и может принимать различные формы. Это могут быть одиночные показатели, такие как полетная масса, стоимость разработки, эксплуатации или всего жизненного цикла, а также комплексные характеристики, выбор и обоснование которых является отдельной научной задачей.

Одной из основных проблем, усложняющих процесс проектирования, является отсутствие достоверной информации о величине и характере потребления электрической энергии на разных этапах полета летательного аппарата. Это приводит к необходимости проведения многократных расчетов и вычислений, что усложняет сам процесс проектирования, увеличивает трудозатраты и повышает риск возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором. Очевидно, что наиболее приемлемым для повышения эффективности процесса проектирования является его автоматизация, которая предполагает проведение формализации всех этапов и дальнейшую разработку соответствующих алгоритмов. На этапе оценки проектных решений и выбора оптимального варианта представляется важным разработать систему управления проектированием СЭС для обеспечения выполнения предъявляемых к ней требований.

Объектом управления в рассматриваемой задаче является процесс проектирования системы электроснабжения, который характеризуется динамическими и статическими свойствами.

Объект управления обладает следующими особенностями:

- последовательность выполнения этапов строго определяется наличием входной информации для выполнения конкретного этапа, которая в свою очередь используется на других этапах процесса;
- сложность задач, решаемых на каждом этапе, обусловлена сложностью объекта проектирования;
- управление может быть распределено по этапам проектирования;
- высокая степень неопределенности входной информации о взаимодействии с внешней средой.

Задачей системы управления процессом проектирования СЭС является формирование такого комплекса воздействий, который обеспечил бы максимальное приближение показателей эффективности проектного решения к требованиям технического задания.

В общем случае комплекс показателей эффективности проектного решения является сложной зависимостью от объекта проектирования, свойства которого в свою очередь однозначно определяются свойствами элементов СЭС и их связями (т. е. структурой). Таким образом, все управляющие воздействия могут быть направлены как на изменение структуры СЭС, так и на изменение свойств элементов СЭС. По виду управляющие воздействия могут быть разделены на технические и информационные (рис. 3).

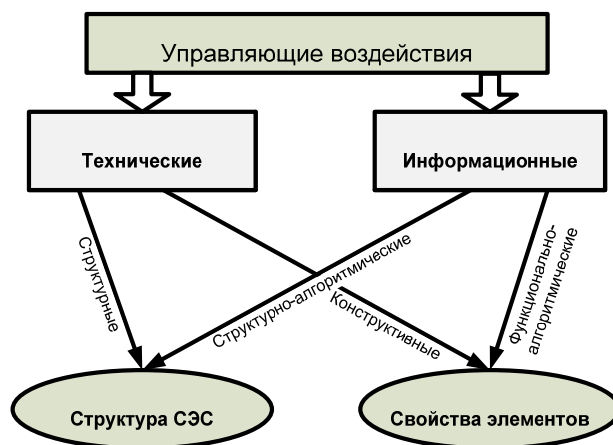


Рис. 3. Виды управляющих воздействий на процесс проектирования
Fig. 3. Types of controlling action on the design process

Исходя из особенностей объекта управления и возможностей управления можно выделить следующие задачи, обеспечивающие синтез системы управления процессом проектирования СЭС:

- разработку системной структурно-морфологической модели объекта управления – процесса проектирования системы электроснабжения;
- разработку методов сравнительного анализа неформализованного множества полученных показателей эффективности проектных решений с требуемыми;
- формирование совокупности информационно-технических воздействий на основе результата сравнительного анализа с учетом перекрестных связей их влияния на показатели эффективности.

Каждый этап проектирования системы электроснабжения связан с выполнением операции выбора некоторого подмножества (элементов, структур) из большего множества. Процесс формирования проектного решения может быть представлен в виде иерархии процессов, в котором выполнение операций каждого уровня иерархии обеспечивает выполнение задач верхнего уровня (рис. 4).

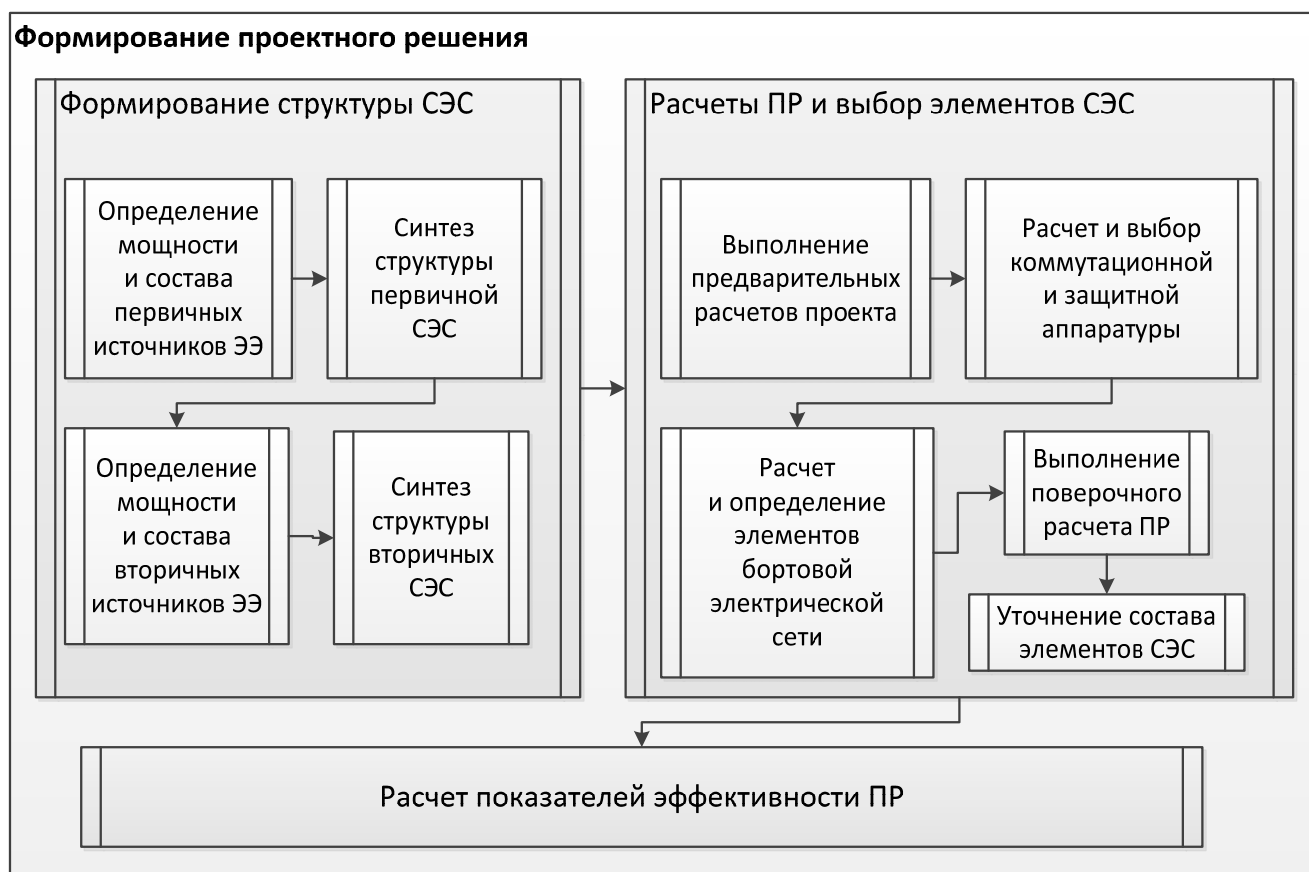


Рис. 4. Процесс формирования проектного решения
Fig. 4. The process of forming a project solution

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Процесс 1. Формирование структуры СЭС включает в себя процессы определения мощности и состава источников электроэнергии, синтеза схем первичной и вторичной СЭС (рис. 5).

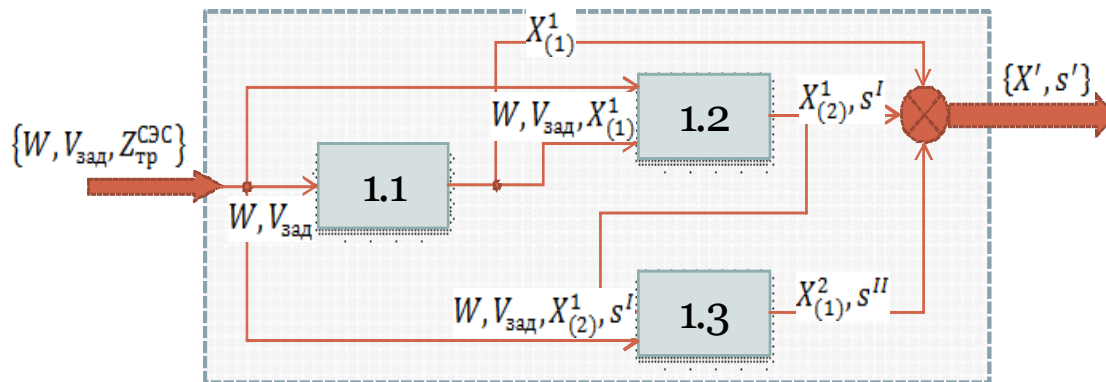


Рис. 5. Формирование структуры СЭС
Fig. 5. Forming the structure of the electrical power system

Вход: $W, V_{\text{зад}}, Z^{\text{СЭС}}$.

Выход: $\{X', s'\}$,

где $Z^{\text{СЭС}}$ – множество показателей эффективности (свойств) проектируемой системы электропитания (проектного решения); $Z^{\text{СЭС}}$ – множество показателей эффективности СЭС, определенных требованиями ТЗ и НТД; $V_{\text{зад}}$ – множество внешних воздействий, параметров взаимодействия с внешней средой; W – множество исходных данных для проектируемой системы (количество и типы приемников ЭЭ, характер потребляемой мощности приемников, циклограмма потребления ЭЭ по этапам полета, размещение приемников ЭЭ на борту ВС).

Декомпозиция Процесса 1

Процесс 1.1. Выбор аварийных источников

Вход: $W, V_{\text{зад}}$.

Выход: $X^1_{(1)}$.

Функциональная модель процесса определения требуемой мощности и состава аварийных источников электроэнергии.

$$X^1_{(1)} = \left\{ x^1_{(1)j} : x^1_{(1)j} \in X^1; \sum Q_j^n \geq Q_{\Sigma}^{\text{тр}} = \frac{P_{\text{ПР}}^1}{U_{\text{НОМ}}} \times T_{\text{пол}}^{\text{ав}}; Q_k^n = Q_l^n, \forall k, l \in N; P, U_{\text{НОМ}}, T_{\text{пол}}^{\text{ав}} \in W; V_{()} = V_{\text{зад}} \right\},$$

где $X^1_{(1)}$ – множество аварийных источников ЭЭ (АБ), обеспечивающих питание приемников первой категории в течение заданного времени; $Q_{\Sigma}^{\text{тр}}$ – суммарная требуемая емкость аварийных источников; Q_j^n – емкость j -го химического источника тока n -й электрохимической системы; $P_{\text{ПР}}^1$ – суммарная мощность приемников первой категории, приведенная к сети постоянного тока; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение сети постоянного тока (шины подключения аварийных источников); $T_{\text{пол}}^{\text{ав}}$ – заданное время полета на аварийных источниках электроэнергии; $V_{()}$ – подмножество заданных внешних воздействий, определяющих выбор аварийных источников (температура эксплуатации, функции разрядных режимов и т. д.).

Процесс 1.2. Синтез первичной СЭС

Вход: $W, V_{\text{зад}}, X^1_{(1)}$.

Выход: $X^1_{(2)}, s^1$.

Функциональная модель процесса определения требуемой мощности, состава основных источников первичной СЭС и структурной схемы соединения

$$X_{(2)}^1 = \left\{ x_{(2)j}^1 : x_{(2)j}^1 \in X^1; \sum P_k^1 \geq P_{\Sigma \text{тр}}^1 = P^1(W_{(1)}; X_{(1)}^1); B^W = B^W(P_j^{\text{нр}}, t); W_{(1)} \subset W; V_{()} = V_{\text{зад}} \right\};$$

$$s^1 : s^1 \in S; s^1 \in S_{\text{доп}}(Y_1 = Y_1[W_{(2)}]); V_{()} = V_{\text{зад}},$$

где $X_{(2)}^1$ – подмножество основных источников электроэнергии первичной системы электроснабжения (электромеханические генераторы); P_k^1 – мощность одного генератора (Вт, ВА) данного типа; $P_{\Sigma \text{тр}}^1$ – суммарная требуемая мощность первичных источников, является функцией циклограммы нагрузок и характеристик аварийных источников; B^W – вид энергии первичной системы электроснабжения (постоянного, переменного тока, уровень напряжения), определяется по мощности каждого типа потребителей и времени его функционирования; s^1 – структура первичной СЭС, определяет связь элементов из состава первичной системы электроснабжения; Y_1 – ограничения, накладываемые НТД, совокупностью подмножества исходных данных $[W_{(2)}]$, определяющих требования к структуре системы (резервирование, организация параллельной работы, бесперебойность питания и т. д.).

Процесс 1.3. Синтез вторичной СЭС

Вход: $W, V_{\text{зад}}, X_{(2)}^1, s^1$.

Выход: $X_{(2)}^2, s^{\text{II}}$.

Функциональная модель определения требуемой мощности, состава вторичных источников электроэнергии и структурной схемы соединения:

$$X_{(1)}^2 = \left\{ x_{(1)j}^2 : x_{(1)j}^2 \in X^1; \sum P_k^{\text{II}} \geq P_{\Sigma \text{тр}}^{\text{II}} = P^{\text{II}}(W_{(3)}); W_{(1)} \subset W; V_{()} = V_{\text{зад}} \right\};$$

$$s^{\text{II}} : s^{\text{II}} \in S; s^{\text{II}} \in S_{\text{доп}}(Y_2 = Y_2[W_{(3)}]); V_{()} = V_{\text{зад}},$$

где $X_{(1)}^2$ – подмножество преобразователей электроэнергии вторичной СЭС; P_k^{II} – мощность одного преобразователя (Вт, ВА) данного типа; $P_{\Sigma \text{тр}}^{\text{II}}$ – суммарная требуемая мощность вторичных источников, является функцией циклограммы нагрузок потребителей для данного вида энергии при заданных внешних условиях; s^{II} – структура вторичной СЭС, устанавливает связь элементов из состава вторичной системы электроснабжения; Y_2 – свойства структуры, которые определяются ограничениями, накладываемыми НТД, совокупностью подмножества исходных данных $[W_{(3)}]$, определяющих требования к структуре вторичной системы (резервирование, организация параллельной работы, бесперебойность питания и т. д.).

Таким образом, выходом *Процесса 1* являются

$$X' = \{X_{(1)}^1, X_{(2)}^1, X_{(1)}^2\};$$

$$s' = s^1 \cup s^{\text{II}}.$$

Процесс 2. Расчет проектных решений включает предварительный расчет основных электрических параметров СЭС (токораспределение в системе, потери мощности, расчет бортовой электрической сети и т. д.), выбор защитной и коммутационной аппаратуры, проверочный расчет и корректировку проектного решения (рис. 6).

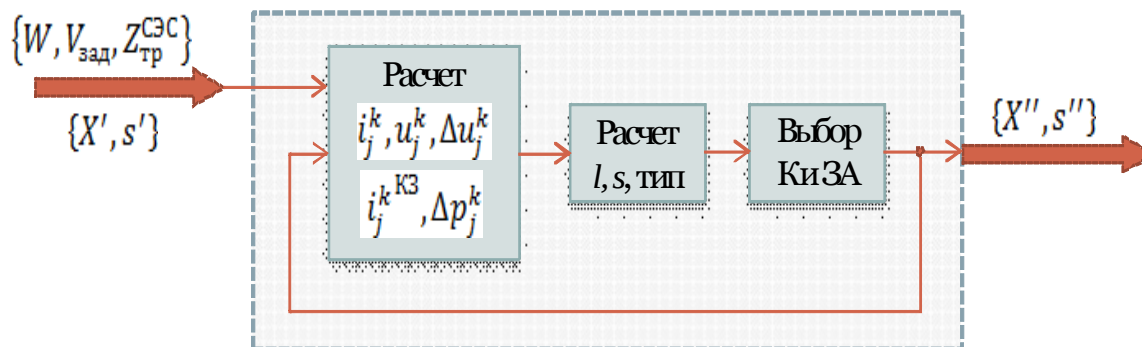


Рис. 6. Расчет проектных решений
Fig. 6. Calculation of project solutions

Вход: $\{X'', s''\}$;

$$\begin{cases} X'' = X_{(1)}^1, X_{(2)}^1, X_{(1)}^2, X_{(1)}^3, X_{(2)}^3, X_0^4, \\ s'' \end{cases}$$

В этом выражении:

$$X_{(1)}^3 = \left\{ x_{(1)j}^3 : x_{(1)j}^3 \in X^3; Z_{x_{(1)j}^3}^{\text{эл}} \subset R_1 = R_1(W_{(4)}; X; s'; V_{()} = V_{\text{зад}}) \right\},$$

где $X_{(1)}^3$ – подмножество коммутационных аппаратов (контакторов, реле, выключателей), определяющих функции управления СЭС в различных режимах работы; $Z_{x_{(1)j}^3}^{\text{эл}}$ – параметры (технические характеристики) коммутационного аппарата j -го типа; R_1 – требования к коммутационной аппаратуре, полученные в результате расчетов проектных решений (номинальный ток коммутации, термодинамическая устойчивость, время коммутации, условия эксплуатации и т. д.);

$$X_{(2)}^3 = \left\{ x_{(2)j}^3 : x_{(2)j}^3 \in X^3; Z_{x_{(2)j}^3}^{\text{эл}} \subset R_2 = R_2(W_{(5)}; X; s'; V_{()} = V_{\text{зад}}) \right\},$$

где $X_{(2)}^3$ – подмножество защитной аппаратуры (предохранителей, тепловых аппаратов защиты, аппаратов защиты от повышения и снижения напряжения и т. д.), определяющее функции защиты элементов СЭС и потребителей в аварийных режимах работы; $Z_{x_{(2)j}^3}^{\text{эл}}$ – параметры (технические характеристики) защитного аппарата j -го типа; R_2 – требования к защитной аппаратуре, полученные в результате расчетов проектных решений (номинальный ток защищаемого участка и элемента, требования к скорости срабатывания аппаратов защиты, термодинамическая устойчивость, максимальный ток короткого замыкания, значения порогов чувствительности и т. д.).

$$X_{()}^4 = \left\{ x_{()j}^4 : x_{()j}^4 \in X^4; Z_{x_{()j}^4}^{\text{эл}} \subset R_3 = R_3(W_{(6)}; X; s'; V_{()} = V_{\text{зад}}) \right\},$$

где $X_{()}^4$ – подмножество элементов электрических проводов, по которым осуществляется передача и распределение электроэнергии от источников к потребителям; $Z_{x_{()j}^4}^{\text{эл}}$ – параметры (технические характеристики) j -го типа провода; R_3 – требования к бортовой электрической сети, по-

лученные в результате расчетов проектных решений (номинальный допустимый ток, перегрузочная способность, механические характеристики, условия эксплуатации и т. д.);

$$s'' = s' \circ F = F(X''),$$

где s'' – конечная структура СЭС, полученная в результате расчета проектных решений и появления в схеме элементов защитной и коммутационной аппаратуры, электрических проводов различного типа.

Процесс 3. Расчет показателей эффективности проектного решения выполняет комплексную оценку и расчет показателей эффективности всего проектного решения (рис. 7).

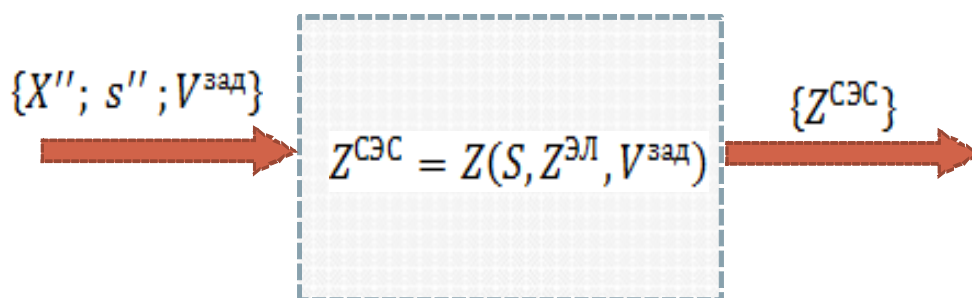


Рис. 7. Расчет показателей эффективности проектного решения
Fig. 7. Calculation of the performance factors for a project solution

Вход: $\{X''; s''; V_{\text{зад}}\}$.

Выход: $\{Z^{\text{СЭС}}\}$.

Операция определения свойств системы (анализ) может быть представлена следующим образом:

$$Z^{\text{СЭС}} = Z(S, Z^{\text{ЭЛ}}, V_{\text{зад}}),$$

где $Z^{\text{СЭС}}$ – множество значений показателей эффективности проектного решения, которые определяются структурой СЭС, параметрами и свойствами элементов $Z^{\text{ЭЛ}}$, а также внешними воздействиями $V_{\text{зад}}$.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

На каждом из этапов проектирования СЭС осуществляется выбор ее элементов или структуры. При этом происходит изменение свойств системы (в том числе показателей ее эффективности).

Следует отметить, что для заданных в ТЗ и НТД требований и ограничений все управляющие воздействия сводятся либо к изменению структуры, либо к изменению самих элементов.

Введем обозначения: U^s – управление, направленное на изменение структуры СЭС ($U^s \rightarrow \{s_j\}$); U^z – управление, направленное на изменение свойств элементов ($U^z \rightarrow \{Z_j^{\text{ЭЛ}}\}$).

Изменение структуры в общем случае влияет на подмножество показателей эффективности проектных решений $Z_{(1)}^{\text{СЭС}}$, изменение элементов (или их свойств) приводит к изменению показателей $Z_{(2)}^{\text{СЭС}}$. Пересечение этих двух множеств определяет множество показателей $Z_{(3)}^{\text{СЭС}}$, на которые можно воздействовать как изменением структуры, так и свойств отдельных элементов.

Очевидны следующие соотношения:

$$Z^{СЭС} = Z_{(1)}^{СЭС} \cup Z_{(2)}^{СЭС}; \quad Z_{(3)}^{СЭС} = Z_{(1)}^{СЭС} \cup Z_{(2)}^{СЭС}.$$

Каждое из управляющих воздействий U^s и U^z может быть осуществлено двумя способами – техническим или алгоритмическим. Таким образом, все воздействия можно разделить на четыре группы: U^1 – множество технических структурных воздействий; U^2 – множество технических конструктивных воздействий; U^3 – множество информационных структурно-алгоритмических воздействий; U^4 – подмножество информационных функционально-алгоритмических воздействий.

Для синтеза законов управления процессом проектирования СЭС необходимо получить количественные оценки управляющего воздействия и его влияния на показатели эффективности проектного решения.

Структурные воздействия

Структура СЭС с точки зрения структурно-функционального подхода описывается матрицей s , которая характеризует наличие (отсутствие) связей между элементами системы. Размерность матрицы определяется общим количеством элементов.

Исходя из этого, структурное воздействие (т. е. воздействие, приводящее к изменению матрицы s) может быть двух видов – изменение количества элементов либо изменение способа соединения элементов. Количественной характеристикой структурного воздействия может быть матрица, получающаяся сложением по модулю двух матриц s_i и s_{i+1} (до и после воздействия), которые приведены к матрице суммарной размерности. Приведение матрицы означает, что столбцы (и строки) обеих матриц соответствуют одним и тем же элементам СЭС, которые не обязательно должны входить в состав каждого из проектных решений, но должны обязательно входить в одно из них.

Предложенный способ количественной оценки структурного воздействия позволяет оценить степень изменения эффективности проектного решения.

Задача построения функциональной зависимости между структурными воздействиями и изменениями всех показателей эффективности является нетривиальной, и в настоящее время не существует методов ее решения.

Однако одним из возможных путей решения данной задачи видится использование диаграмм взаимного влияния, с помощью которых возможно получить некоторые «приведенные» показатели эффективности элементов, влияющих на показатели эффективности системы.

Пример показателя «конструктивная масса» – добавление одного элемента увеличивает массу системы на величину его массы, при этом изменяется перераспределение токов нормальных и аварийных режимов, которое приводит к изменению массы проводов и коммутационной аппаратуры, их теплоотдачи и, возможно, системы их охлаждения (радиаторы и т. п.) и т. д. Результирующая масса системы при добавлении одного элемента изменится на массу, пропорциональную массе добавляемого элемента с учетом структуры СЭС (рис. 8). Учет структуры может быть осуществлен либо введением коэффициентов, либо в виде другой зависимости, которая зависит от способа расчета конкретного показателя эффективности и от их взаимного влияния (оцениваемого по диаграмме взаимного влияния).

Аналогично показателю «конструктивная масса», показатель «надежность» – добавление одного элемента приводит к изменению расчетных показателей работоспособности системы, что в свою очередь оказывает влияние на выбор элементной базы, и, как следствие, изменяются показатели безотказности как отдельных устройств, так и системы в целом.

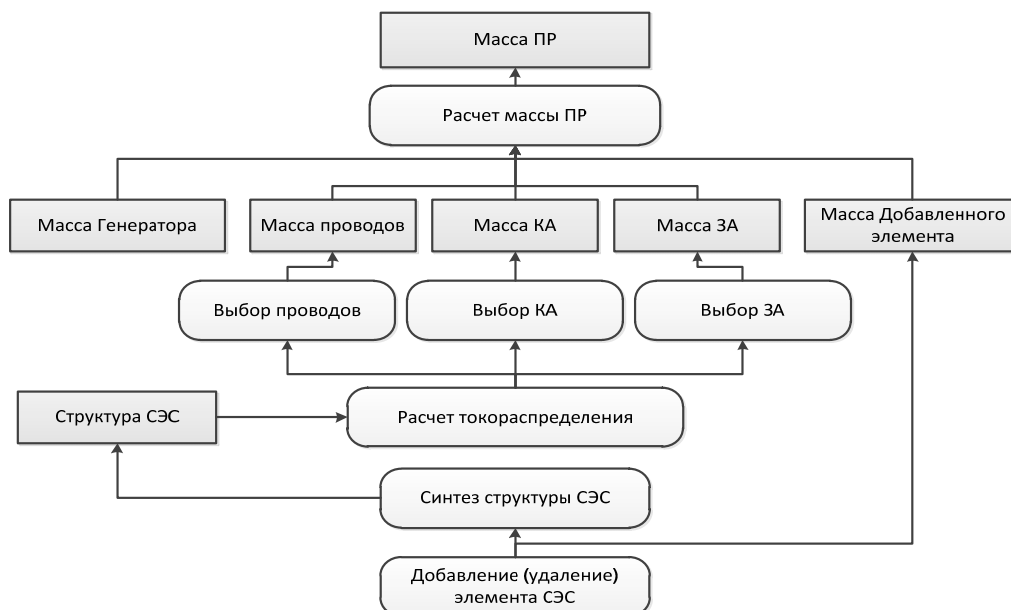


Рис. 8. Диаграмма взаимосвязи по массе при добавлении (удалении) элемента
Fig. 8. Mass relationship diagram when adding (deleting) an element

Воздействия на элементы

Количественные характеристики изменения элементов определяются исключительно через свойства конкретных элементов, которые не представляется описать функциональной зависимостью, и могут быть получены только из паспортных данных этих элементов.

Влияние их на показатели эффективности всей системы может быть оценено аналогично влиянию изменения структуры с помощью диаграмм взаимосвязи.

Процесс управления проектным решением состоит из двух операций (рис. 9):

- процесса оценки проектного решения на соответствие требованиям и формирования информации об отклонении расчетных данных от требуемых ΔZ ;
- формирования управляющих воздействий $U = \{U^s, U^z\}$ с целью достижения требуемых результатов проектирования.

Графическая интерпретация оценки проектного решения на соответствие требованиям ТЗ может быть представлена в виде лепестковой диаграммы (рис. 10).

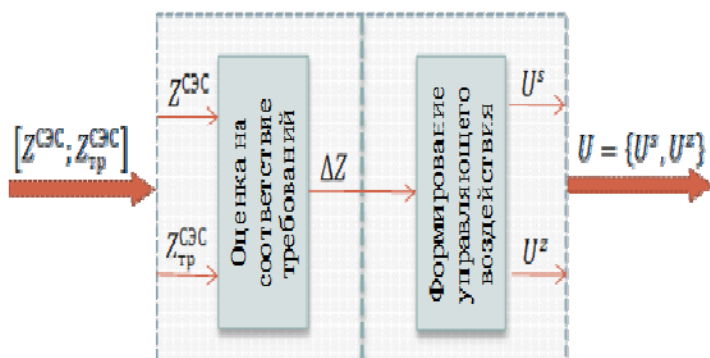


Рис. 9. Управление проектным решением
Fig. 9. The management of a project solution

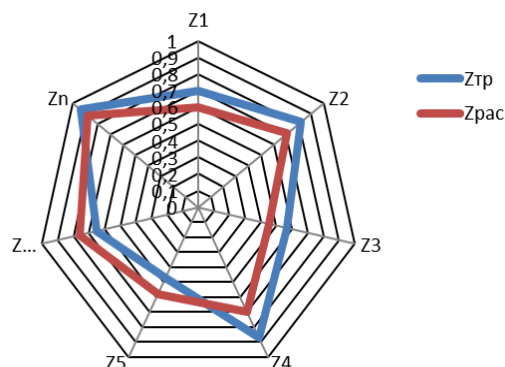


Рис. 10. Оценка проектного решения по показателям эффективности
Fig. 10. Evaluation of a project solution on performance factors

Очевидно, что при условии нахождения расчетных показателей внутри границы, определяемой требуемыми значениями, проектное решение удовлетворяет поставленным услови-

ям. В противном случае выполняется оценка отклонений и формируются управляющие воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект автоматизации можно достаточно просто автоматизировать, что приведет к повышению эффективности процесса проектирования СЭС ВС на основе учета его особенностей за счет применения инструментальных средств, реализующих предлагаемые методы проектирования.

При автоматизации процесса проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объекта автоматизации необходимо решить ряд задач, основными из которых являются:

- формирование единого информационного пространства, обеспечивающего процесс проектирования СЭС ВС, разработка методов создания, наполнения, использования его информационных ресурсов, а также технологии ролевого доступа к ним;
- проектирование архитектуры программного комплекса, основанной на классифицированной совокупности общесистемных и прикладных сервисов, обслуживающих полный перечень функциональных информационных и управленческих задач, в определенной (заданной) методической последовательности проектирования СЭС ВС;
- разработка совокупности математических методов, моделей и алгоритмов, используемых в процессе проектирования СЭС ВС;
- обоснование комплекса технических средств, необходимого для функционирования ПК;
- формирование перечня документов, определяющих структуру, технологию и применение методов проектирования СЭС ВС, а также правила работы пользователей с ПК;
- выработка согласованных стандартов описания данных проектного решения, формирование отчетности по результату проектирования СЭС ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация проектирования систем электроснабжения воздушных судов: монография / С.П. Халютин, П.С. Горшков, Б.В. Жмуров, А.П. Патрикеев. М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2015. 116 с.
2. Горшков П.С. Ресурсно-ограничительный метод исследования сложных информационных систем // Труды симпозиума «Надежность и качество». Пенза, 2008.
3. Горшков П.С., Бачкало Б.И. Ресурсно-ограничительный метод исследования сложных информационных систем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2008. Т. 1. С. 274–277.
4. Горшков П.С., Жмуров Б.В., Халютин С.П. Моделирование жизненного цикла авиационного оборудования на основе ресурсно-ограничительного подхода // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2009. Т. 1. С. 384–386.
5. 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». Пенза: ПГУ, 2012. Т. 1. С. 483–484.
6. Потемкин А.В. Методика синтеза структурных схем авиационных систем электроснабжения на основе ресурсно-ограничительного подхода // Труды международной научно-практической конференции «ИНФО-2012». М.: МИЭМ, 2012.
7. Халютин С.П., Жмуров Б.В. Структурно-функциональное моделирование электроэнергетических систем самолета // Проблемы безопасности полетов. 2009. № 6. С. 45–53.

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

9. Халютин С.П., Жмуров Б.В., Матюшина А.В. Особенности выбора структуры системы электроснабжения летательного аппарата по циклограмме потребления мощности // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2012. Т. 1. С. 493–494.

10. Халютин С.П. Моделирование сложных электроэнергетических систем летательных аппаратов: монография / С.П. Халютин, М.Л. Тюляев, Б.В. Жмуров, И.Е. Старостин. М.: Издание ВУНЦ ВВС ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. 188 с.

11. Халютин С.П., Жмуров Б.В. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2010. Т. 1. С. 425–429.

12. Халютин С.П., Жмуров Б.В., Морошкин Я.В. Моделирование ненормальных режимов систем электроснабжения летательных аппаратов на основе объектно-энергетического подхода // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2008. Т. 1. С. 391–394.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

AIRCRAFT POWER SUPPLY SYSTEM DESIGN PROCESS AS AN AUTOMATION OBJECT

Boris V. Zhmurov¹

¹ *Experimental Laboratory NaukaSoft, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The process of designing aviation electrical power systems (EPS) is related to the need to fulfill a number of requirements of normative and technical documents and to conduct a large number of calculations. Experience has shown that it is not possible to obtain reliable initial data on the nature and magnitude of electricity consumption by electricity receivers (end users) at the early stages of design. The composition of the electric power receivers and the power consumption of electricity during the design process are repeatedly changed. This leads to the need to repeatedly perform tasks related to the synthesis of primary and secondary systems of generation and calculation.

The desire to improve the efficiency of EPS led to the emergence of new standardized types of electrical energy - 270 V DC and 380 V three-phase AC of stable and unstable frequency. It follows that it is possible to implement a rather large number of options for EPS structures, and there may be several secondary EPS or, in general, EPS of a third or higher level.

The lack of ready-made aviation energy converters implies the impossibility of using ready-made components, and the development of specific devices should be coordinated with the development of EPS. In this case, one of the results of EPS design will be a set of requirements for the devices and units of the EPS projected.

In any case, the design process for EPS aircraft requires a lot of iterations that take into account the change in both the raw data and the constraints on the EPS elements and the design process itself.

The traditional approach to the design of EPS aircraft, assuming the knowledge of the designer of dozens of GOSTs (State All-Union standards) and OSTs (All-Union standards) regulating the design stages of EPS, as well as the existence of standard EPS structures, from which a specific choice is made, is practically impossible at present. The only way to consciously approach the problem of designing EPS aircraft and take into account all the requirements of the customer and the regulatory and technical documentation is its automation.

Automation of the design of EPS aircraft as an optimization task involves the formalization of the object of optimization, as well as the choice of the criterion of efficiency and control actions. Under the object of optimization in this

case we mean the design process of the EPS, the formalization of which includes formalization and the design object – the aircraft power supply system.

Key words: design, automation, electrical power system, aircraft, optimization, design solution.

REFERENCES

1. **Khalyutin S.P., Gorshkov P.S., Zhmurov B.V., Patrikeev A.P.** *Avtomatizacija proektirovaniya sistem jelektrosnabzhenija vozdushnyh sudov. Monografija* [Automation of the design of aircraft power supply systems. Monograph]. M., Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publishing House, 2015. 116 p. (in Russian)
2. **Gorshkov P.S.** *Resursno-ogranichitel'nyj metod issledovaniya slozhnyh informacionnyh sistem* [Resource-restrictive method of research of complex information systems]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, 2008. (in Russian)
3. **Gorshkov P.S., Bachkalo B.I.** *Resursno-ogranichitel'nyj metod issledovaniya slozhnyh informacionnyh sistem* [Resource-restrictive method of research of complex information systems]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, PSU publ., 2008, Vol. 1, pp. 274–277. (in Russian)
4. **Gorshkov P.S., Zhmurov B.V., Khalyutin S.P.** *Modelirovanie zhiznennogo cikla aviacionnogo oborudovaniya na osnove resursno-ogranichitel'nogo podhoda* [Modeling the life cycle of aircraft equipment based on a resource-restrictive approach]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, PSU publ., 2009, Vol. 1, pp. 384–386. (in Russian)
5. **Potjomkin A.V., Gorshkov P.S., Zhmurov B.V.** *Sintez metodiki proektirovaniya sistemy jelektrosnabzhenija vozdushnogo sudna na osnove resursno-ogranichitel'nogo podhoda* [Synthesis of methodology for designing the aircraft power supply system based on the resource-restrictive approach]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, PSU publ., 2012, Vol. 1, pp. 483–484. (in Russian)
6. **Potjomkin A.V.** *Metodika sinteza strukturnykh shem aviacionnykh sistem jelektrosnabzhenija na osnove resursno-ogranichitel'nogo podhoda* [Methodology of synthesis of structural circuits of aviation power supply systems on the basis of resource-restrictive approach]. *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "INFO-2012"* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference INFO-2012]. M., MIEM publ., 2012. (in Russian)
7. **Khalyutin S.P., Zhmurov B.V.** *Strukturno-funkcional'noe modelirovanie jelektroenergeticheskikh sistem samoleta* [Structurally functional modeling of electric power systems of aircraft]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Problems of flight safety], 2009, Vol. 6, pp. 45–53. (in Russian)
8. **Khalyutin S.P., Zhmurov B.V., Kornilov S.V.** *Razvitie strukturno-funkcional'nogo modelirovaniya jelektroenergeticheskikh sistem samoleta* [Development of structural and functional modeling of electric power systems of aircraft]. *Problemy bezopasnosti poletov* [Problems of flight safety], 2009, Vol. 8, pp. 53–62. (in Russian)
9. **Khalyutin S.P., Zhmurov B.V., Matyushina A.V.** *Osobennosti vybora struktury sistemy jelektrosnabzhenija letatel'nogo apparata po ciklogramme potrebleniya moshhnosti* [Peculiarities of the choice of the structure of the aircraft power supply system according to the cyclogram of power consumption]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, PSU publ., 2012, Vol. 1, pp. 493–494. (in Russian)
10. **Khalyutin S.P., Tyulyaev M.I., Zhmurov B.V., Starostin I.E.** *Modelirovanie slozhnykh jelektroenergeticheskikh sistem letatel'nykh apparatov. Monografija* [Modeling of aircraft complex electric power systems. Monograph.]. M., Edition of the Military educational scientific centre of Zhukovskiy, Gagarin Air Force Engineering Academy publ., 2010, 188 p. (in Russian)

11. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V. *Algoritm opredelenija sostava i parametrov pervichnyh istochnikov jelektroenergii BPLA* [Algorithm for determining the composition and parameters of primary power sources of UAV]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, PSU, 2010, Vol. 1, pp. 425–429. (in Russian)

12. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V., Moroshkin Ya.V. *Modelirovanie nenormal'nyh rezhimov sistem jelektrosnabzhenija letatel'nyh apparatov na osnove ob'ektno-jenergeticheskogo podhoda* [Modeling of abnormal modes of power supply systems for aircraft based on the object-energy approach]. *Trudy simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International symposium "Reliability and quality"]. Penza, PSU, 2008, Vol. 1, pp. 391–394. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Boris V. Zhmurov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Designer – Deputy SEO LLC "Experimental Laboratory NaukaSoft", bzhmurov@xlab-ns.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

09.09.2017
28.12.2017

Received
Accepted for publication

09.09.2017
28.12.2017