



УДК 62-1/-9:51-74  
ГРНТИ 78.25.09:27.35.14

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА АЭРОМОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Р.В. ГУНЬКО*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*С.В. ЛАЗАРЕВ, кандидат технических наук, доцент*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*Г.И. ТРИФОНОВ*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*Н.А. БУБНОВ, кандидат военных наук*

*Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии*

*А.В. Хрулёва (г. Санкт-Петербург)*

В статье определены исходные данные и введены критерии, необходимые для разработки методики построения рациональной структуры аэромобильного средства электроснабжения летательных аппаратов с использованием структурного синтеза и метода анализа иерархий. Построен граф альтернативных вариантов структурной схемы аэромобильного средства электроснабжения, который позволяет рассчитать общее количество комбинаций. Установлены конкурирующие комбинации, среди которых будет происходить рационализация структуры. Построена иерархия, которая считается полной, поскольку каждый элемент вышестоящего уровня функционирует как критерий для всех элементов нижестоящего уровня.

*Ключевые слова:* структура, система, метод анализа иерархий, аэромобильное средство электроснабжения, дерево целей, источник, преобразователь, структурный синтез.

## DETERMINING THE CONTENT OF HIERARCHY LEVELS IN THE DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL SYNTHESIS METHOD FOR AN AIRMOBILE ELECTRIC POWER SUPPLY MEANS

*R.V. GUNKO*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*S.V. LAZAREV, Candidate of Technical sciences, Associate Professor*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*G.I. TRIFONOV*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*N.A. BUBNOV, Candidate of Military sciences*

*Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov*

*(Saint Petersburg)*

The article defines the initial data and introduces the criteria necessary for the development of a method for constructing a rational structure of an aeromobile power supply tool for aircraft using structural synthesis and the method of hierarchy analysis. A graph of alternative options for the block diagram of an aeromobile power supply facility is constructed, which allows calculating the total number of combinations. There are competing combinations among which the structure will be rationalized. A hierarchy is constructed that is assumed to be complete, since each element of the higher level functions as a criterion for all elements of the lower level.

*Keywords:* structure, system, hierarchy analysis method, aeromobile electric power supply means, goal tree, source, converter, structural synthesis.



**Введение.** Методика структурного синтеза аэромобильного средства электроснабжения летательных аппаратов представляет собой сложную задачу, которая заключается в поиске рациональной структуры сложной технической системы. В данной статье определены исходные данные и введены критерии, которые в дальнейшем дают возможность разработать данную методику.

**Актуальность.** В связи с интенсивным развитием средств обнаружения и поражения наземных целей остро стоит вопрос эффективности и оперативности перебазирования на оперативный аэродром средств аэродромно-технического обеспечения полетов и, в том числе, наземных средств электроснабжения [1]. Одним из наиболее эффективных способов перебазирования данных средств является транспортирование их на наружной подвеске летательных аппаратов. Для реализации данного способа перебазирования необходима разработка средств электроснабжения в аэромобильном исполнении. Однако решение данной проблемы сопряжено с поиском рациональной структуры аэромобильного средства электроснабжения летательных аппаратов. С этой целью необходимо разработать методику определения рациональной структуры аэромобильного средства электроснабжения летательных аппаратов.

Для разработки методики структурного синтеза рациональной схемы аэромобильной электроэнергетической системы используем метод анализа иерархий (МАИ). Данный метод заключается в декомпозиции сложной технической системы, установлении конкурирующих комбинаций, определении приоритетных критериев, установления их важности путем попарного сравнения и нахождении альтернативных решений [2]. Принцип декомпозиции подразумевает структурирование сложной задачи в виде иерархии или сети, что является первым шагом на пути реализации МАИ. В наиболее элементарном виде иерархия строится с вершины, которая является целью функционирования системы, через промежуточный уровень, включающий критерии, от которых зависят последующие уровни, к самому низкому уровню, который включает в себя конкурирующие комбинации элементов.

С целью реализации данной методики для начала необходимо установить количество элементов этой системы для определения числа комбинаций, которые и будут являться «кандидатами» и составлять третий уровень иерархии. Далее необходимо установить критерии, согласно которых будет происходить определение рациональной схемы. Данные критерии будут являться содержанием второго уровня иерархии. Первый уровень иерархии занимает цель поиска. В нашем случае это будет рациональная структурная схема аэромобильной электроэнергетической системы. Иерархия считается полной, если каждый элемент вышестоящего уровня функционирует как критерий для всех элементов нижестоящего уровня [3, 4].

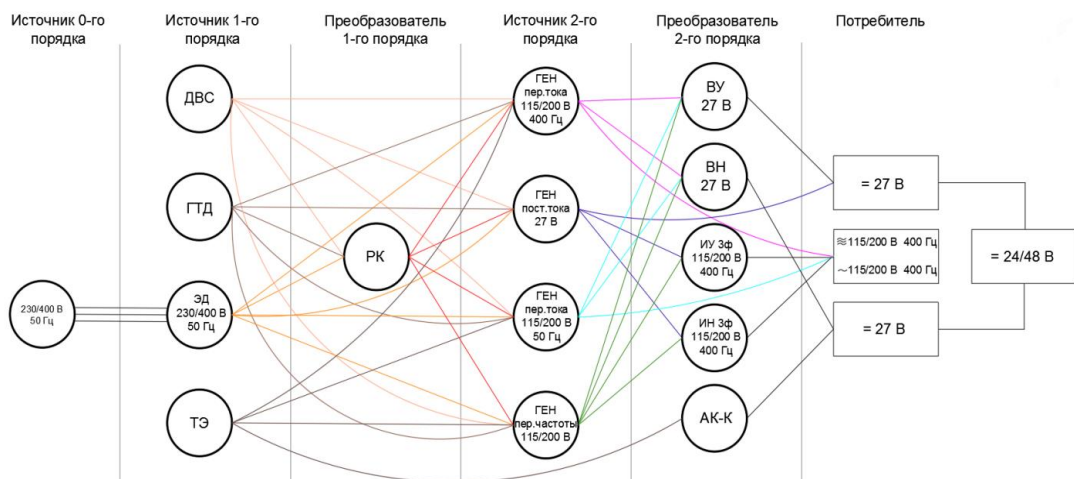


Рисунок 1 – Граф альтернативных вариантов схемы аэромобильного средства электроснабжения



Поиск рациональной структурной схемы аэромобильной электроэнергетической системы будет осуществляться, опираясь на следующие критерии: объем установки  $K_1$ , ее масса  $K_2$ , удельная мощность  $K_3$ , стоимость  $K_4$  и мощность  $K_5$ .

С целью систематизации элементов аэромобильной электроэнергетической системы необходимо их ранжировать по функциональным признакам: источники энергии нулевого, первого и второго порядков, а также преобразователи энергии первого и второго порядков. При этом необходимо учитывать, что электроэнергетические системы используются как для питания бортовых систем летательных аппаратов, так и для электростартерного запуска авиационных двигателей, а также наличие таких режимов запуска двигателей, при которых необходимо два источника энергии второго порядка [5].

Ранжированные источники энергии и преобразователи, которые могут входить в состав аэромобильной электроэнергетической системы, а также возможные связи между ними представлены на рисунке 1.

На рисунке 1 представлено: 230/400В – промышленная электрическая сеть, ДВС – двигатель внутреннего сгорания, ГТД – газотурбинный двигатель, ЭД – электродвигатель, РК – раздаточная коробка, ГЕН пер. тока – генератор переменного тока, ГЕН пост. тока – генератор постоянного тока, ВУ – выпрямитель управляемый, ВН – выпрямитель неуправляемый, ИУ – инвертор управляемый, ИН – инвертор неуправляемый, АК-К – аккумулятор конденсатор.

Следующим этапом методики является определение общего количества возможных сочетаний основных элементов перспективной рациональной структурной схемы аэромобильной электроэнергетической системы, с целью определения конкурирующих комбинаций, которые будут являться содержанием третьего уровня иерархии с использованием следующего выражения комбинаторики:

$$C_m^n = \frac{m!}{(m-n)! \cdot n!} \quad (1)$$

Перед использованием выражения (1) необходимо ввести следующее ограничение – возможное число комбинаций будет определено путем изменения состава выбранных объектов, при этом не будет учитываться их порядок [6].

Так как в графе источников нулевого порядка находится один объект, который имеет связь только с одним объектом из графы источника первого порядка, очевидно, что возможна только одна комбинация:

230/400-ЭД.

Далее данная комбинация будет рассматриваться как единый объект, способный участвовать в дальнейших комбинациях.

Рассмотрев возможные сочетания элементов первых двух граф, необходимо проследить дальнейшее преобразование энергии. Рисунок 1 указывает возможные связи двигателя внутреннего сгорания, газотурбинного двигателя и электродвигателя как с раздаточной коробкой, так и с источниками второго порядка напрямую. Используя выражение (1) для начала необходимо определить количество комбинаций со следующими элементами: двигатель внутреннего сгорания, газотурбинный двигатель, электродвигатель, раздаточная коробка:

$$C_{ист.1-пр.1общ} = \frac{4!}{(4-2)! \cdot 2!} = 6. \quad (2)$$



Далее необходимо установить количество комбинаций элементов, взаимосвязь между которыми недопустима в виду отсутствия в комбинации элемента одной из подгрупп:

$$C_{ист.1-пр.1недоп.} = \frac{3!}{(3-2)!2!} = 3. \quad (3)$$

В результате определены следующие комбинации:

ДВС-РК,  
ГТД-РК,  
ЭД-РК.

Далее вышеуказанные комбинации будут рассматриваться как единый объект, способные участвовать в построении итоговых комбинаций.

Следующим этапом данной методики является определение возможных комбинаций между элементами подгруппы «источники энергии 1-го порядка» и элементами подгруппы «источники энергии 2 порядка»:

$$C_{ист.1-ист2.общ.} = \frac{10!}{(10-2)!2!} = 45. \quad (4)$$

На данном этапе необходимо определить количество комбинаций элементов, взаимосвязь между которыми недопустима:

$$C_{ист.1-ист2.общ.} = \frac{10!}{(10-2)!2!} = 45. \quad (5)$$

В результате установлено 28 комбинаций с учетом комбинаций с топливным элементом.

Далее необходимо рассматривать указанные ниже комбинации как самостоятельные элементы, способные участвовать в последующих комбинациях:

ДВС-ГЕН пер. т.,  
ДВС-ГЕН пост. т.,  
ДВС-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
ДВС-ГЕН пер. част.,  
ДВС-РК-ГЕН пер. т.,  
ДВС-РК-ГЕН пост. т.,  
ДВС-РК-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
ДВС-РК-ГЕН пер. част.,  
ГТД-ГЕН пер. т.,  
ГТД-ГЕН пост. т.,  
ГТД-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
ГТД-ГЕН пер. част.,  
ГТД-РК-ГЕН пер. т.,  
ГТД-РК-ГЕН пост. т.,  
ГТД-РК-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
ГТД-РК-ГЕН пер. част.,  
230/400В-ЭД-ГЕН пер. т.,  
230/400В-ЭД-ГЕН пост. т.,



230/400В-ЭД-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
230/400В-ЭД-ГЕН пер. част.,  
230/400В-ЭД-РК-ГЕН пер. т.,  
230/400В-ЭД-РК-ГЕН пост. т.,  
230/400В-ЭД-РК-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
230/400В-ЭД-РК-ГЕН пер. част.,  
ТЭ-ГЕН пер. т.,  
ТЭ-ГЕН пер. т. 50 Гц,  
ТЭ-ГЕН пер. част.,  
ТЭ-АК-К.

Следующим этапом данной методики является исключение комбинаций, элементы которых, учитывая вышеуказанные критерии, очевидно не могут быть использованы. В данном случае необходимо исключить комбинации с использованием электродвигателя в качестве источника электроэнергии в виду его структурной зависимости от промышленной сети. Также необходимо исключить комбинации с использованием топливного элемента, так как его эксплуатация предусматривает использование водорода, который вступает в реакцию с кислородом и становится взрывоопасным, что усложняет его хранение и использование, в результате чего категорически усложняется процесс эксплуатации самого топливного элемента. Также стоит исключить комбинации с использованием двигателя внутреннего сгорания и генераторов переменного тока с частотой 50 Гц, ввиду их очевидно недопустимых объемов. В результате установлено 6 нижеперечисленных комбинаций:

ГТД-ГЕН пост. т.,  
ГТД-ГЕН пер. т.,  
ГТД-ГЕН пер. част.,  
ГТД-РК-ГЕН пер. т.,  
ГТД-РК-ГЕН пер. част.,  
ГТД-РК-ГЕН пос. т.

Стоит учитывать, что для запуска газотурбинного двигателя структурно предусмотрен стартер-генератор постоянного тока (С. ГЕН), который в дальнейшем может быть использован как второй источник электроэнергии для запуска летательных аппаратов в режиме 24/48В. Тогда вышеуказанные комбинации будут иметь следующий вид:

ГТД-С. ГЕН-ГЕН пост. т.,  
ГТД-С. ГЕН.-ГЕН пер. т.,  
ГТД-С. ГЕН-ГЕН пер. част.,  
ГТД-РК-С. ГЕН.-ГЕН пер. т.,  
ГТД-РК-С. ГЕН-ГЕН пер. част.,  
ГТД-РК-С. ГЕН.-ГЕН пос. т.

Далее, используя вышеуказанный метод, необходимо определить итоговые комбинации с использованием уже сформированных комбинаций с элементами подгруппы преобразователей второго порядка. В результате установлено 12 комбинаций, которые и будут являться содержанием 3-го уровня иерархии:

ГТД-С. ГЕН-ГЕН пост. т.-ИУ,  
ГТД-С. ГЕН-ГЕН пост. т.-ИН,  
ГТД-С. ГЕН-ГЕН пер. част.-ВУ,



ГТД-С. ГЕН-ГЕН пер. част.-ВН,  
ГТД-С. ГЕН.-ГЕН пер. т.-ВУ,  
ГТД-С. ГЕН.-ГЕН пер. т.-ВН,  
ГТД-РК-С. ГЕН-ГЕН пер. част.-ВУ,  
ГТД-РК-С. ГЕН-ГЕН пер. част.-ВН,  
ГТД-РК-С. ГЕН.-ГЕН пос. т.-ИУ,  
ГТД-РК-С. ГЕН.-ГЕН пос. т.-ИН,  
ГТД-РК-С. ГЕН.-ГЕН пер. т.-ВУ,  
ГТД-РК-С. ГЕН.-ГЕН пер. т.-ВН.

Анализ полученных данных дает возможность построить конечный вариант иерархии, который представлен на рисунке 2. Это даст возможность решить поставленную задачу, то есть найти рациональную структурную схему аэромобильной электроэнергетической системы.

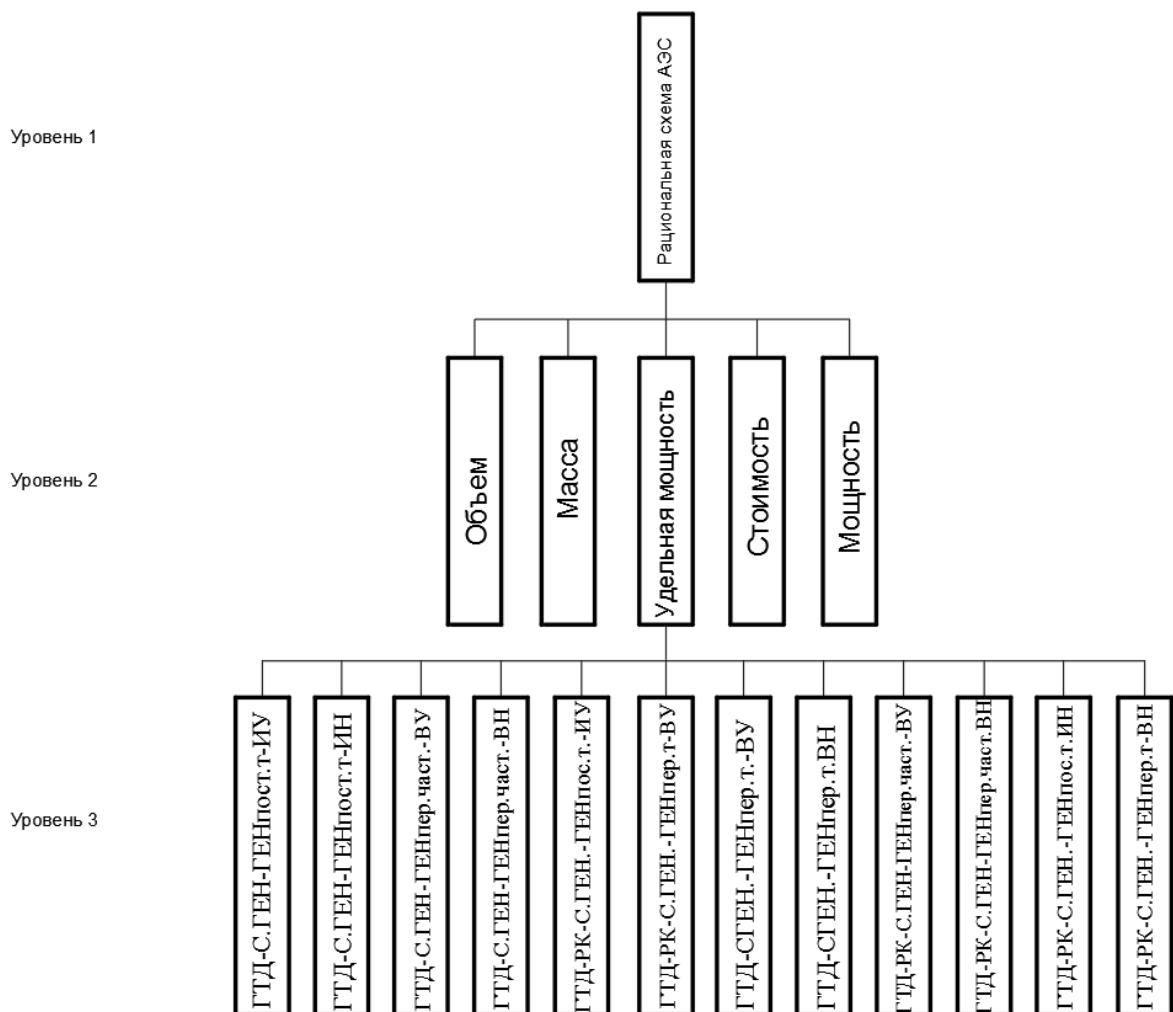


Рисунок 2 – Декомпозиция задачи выбора рациональной структуры на уровни

**Вывод.** Метод анализа иерархии дает возможность лицу, ответственному за разработку аэромобильного средства электроснабжения, определить рациональную структурную схему аэромобильной электроэнергетической системы. Построен граф альтернативных вариантов структурной схемы аэромобильного средства электроснабжения, который позволяет рассчитать общее количество комбинаций. Установлены конкурирующие комбинации, среди которых будет происходить рационализация структуры. В качестве содержания 2-го уровня иерархии





определены следующие критерии: объем, масса, удельная мощность, стоимость и мощность. Построенная иерархия считается полной, так как каждый элемент вышестоящего уровня функционирует как критерий для всех элементов нижестоящего уровня.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники. М.: Граница, 2015. 304 с.
2. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Издательство «Радио и связь», 1991. 224 с.
3. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. Изд.: Астрель, 2010. 992 с.
4. Просветов Г.И. Линейная алгебра и аналитическая геометрия: задачи и решения. М.: Альфа-Пресс, 2009. 208 с.
5. Скребов Н.Н., Медведков Ю.В., Поляруш В.П. Средства обеспечения энергией. М.: Воениздат, 1995. 424 с.
6. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархии // Известия РГПУ им. А. И. Герцена, 2010. № 122. С. 108–115.

#### REFERENCES

1. Buravlev A.I., P'yankov A.A. Upravlenie tehničeskim obespečeniem zhiznennogo cikla vooruzheniya i voennoj tehniki. M.: Granica, 2015. 304 p.
2. Saati T., Kerns K. Analiticheskoe planirovanie. Organizaciya sistem / per. s angl. R.G. Vachnadze. M.: Izdatel'stvo «Radio i svyaz'», 1991. 224 p.
3. Vygodskij M.Ya. Spravochnik po vysshej matematike. Izd.: Astrel', 2010. 992 p.
4. Prosvetov G.I. Linejnaya algebra i analiticheskaya geometriya: zadachi i resheniya. M.: Al'fa-Press, 2009. 208 p.
5. Skrebov N.N., Medvedkov Yu.V., Polyarush V.P. Sredstva obespecheniya `energiej. M.: Voenizdat, 1995. 424 p.
6. Korobov V.B., Tutugin A.G. Preimuschestva i nedostatki metoda analiza ierarhii // Izvestiya RGPU im. A. I. Gercena, 2010. № 122. pp. 108–115.

© Гунько Р.В., Лазарев С.В., Трифонов Г.И., Бубнов Н.А., 2020

Гунько Роман Викторович, адъюнкт 22 кафедры аэродромно-технических средств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Лазарев Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, начальник 22 кафедры аэродромно-технических средств, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Трифонов Григорий Игоревич, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А, [trifonov\\_gi@mail.ru](mailto:trifonov_gi@mail.ru).

Бубнов Никита Александрович, кандидат военных наук, преподаватель кафедры МТО, Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8.