

УДК 621.314

UDC 621.314

СПОСОБЫ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ

METHODS FOR SYNTHESIZING THE OPTIMAL STRUCTURE OF AUTONOMOUS SYSTEMS FOR RENEWABLE

Григораш Олег Владимирович
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой,
grigorasch61@mail.ru

Grigorash Oleg Vladimirovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of
the chair, grigorasch61@mail.ru

Корзенков Павел Геннадьевич
магистр
grigorasch61@mail.ru
*Кубанский государственный аграрный
университет, Краснодар, Россия*

Korzenkov Pavel Gennadyevich
Masters Degree
grigorasch61@mail.ru
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье рассмотрены способы синтеза оптимальных структурно-схемных решений автономных систем электроснабжения, выполненные с использованием возобновляемых источников электроэнергии, по нескольким критериям эффективности

The article describes the methods of synthesis of optimal structural schematics of autonomous power supply systems, made using renewable energy sources, for several performance criteria

Ключевые слова: ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ

Keywords: RENEWABLE ENERGY SOURCES, AUTONOMOUS POWER SYSTEM, OPERATING AND TECHNICAL SPECIFICATIONS, SYNTHESIS OF STRUCTURES

Актуальным является в настоящее время направление, связанное с внедрением в сельскохозяйственное производство возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и создание на их базе автономных систем электроснабжения (АСЭ) [1, 2, 3]. В статье рассматриваются основные способы синтеза оптимальных структурно-схемных решений АСЭ на ВИЭ на этапе проектирования с учетом основных критериев эффективности, которыми являются экономические показатели, КПД, показатели надежности, качества электроэнергии и массогабаритные показатели.

Важным вопросом при разработке новых технических решений АСЭ является определение диапазона оптимальных значений критериев оценки эффективности от правильности выбора которых зависят эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) проектируемой системы [4].

Оптимизация АСЭ одновременно по всем критериям эффективности с определением диапазона их оптимальных значений, практически неразрешимая задача [5, 6].

Один из простых и эффективных способов разработки АСЭ, имеющей хорошие ЭТХ – это использовать накопленный опыт проектирования таких систем и построить их с выбором основных функциональных узлов (источников, стабилизаторов, преобразователей электроэнергии, коммутационных устройств и устройств защиты), имеющих высокие ЭТХ. При этом необходимо учитывать требования потребителей к качеству электроэнергии, в том числе и к бесперебойности электроснабжения. В данном случае АСЭ оценивается по количественным и качественным характеристикам применяемых в ее структуре основных функциональных узлов [3, 6].

Еще один известный способ оптимизации, основан на применении многопараметрической (глобальной) оптимизации АСЭ используя обобщенный критерий вида [1, 7]

$$F = A_x X + B_y Y + C_z Z + \dots, \quad (1)$$

где X, Y, Z – критерии эффективности АСЭ; A_x, B_y, C_z – весовые коэффициенты, определяющие значимость частных критериев.

Минимизация функции F обеспечивается за счет всех критериев эффективности (X, Y, Z, \dots), однако выбор весовых коэффициентов (A_x, B_y, C_z, \dots), как правило, не является строго обоснованным и опирается на использовании субъективных факторов, в том числе при использовании экспертных оценок. Кроме того, значение критериев эффективности зависят друг от друга. Так для повышения надёжности электроснабжения необходимо в систему вводить дополнительные источники, резервные преобразователи и т. п., но это приведёт к значительному повышению капиталовложений.

Простейший подход – оптимизировать систему по одному или двум критериям, считая фиксированными остальные [8].

Более полный результат при оптимизации АСЭ, с учетом всех критериев эффективности, можно получить, используя метод компромиссов или последовательных отклонений (уступок). Суть, которого заключается в следующем, в начале фиксируются все критерии эффективности (согласно функции F (1)), кроме одного, который оптимизируется ($X \rightarrow X_{min}$). Затем назначается допустимое отклонение от критерия X_{min} в заданных пределах и находится следующий критерий эффективности Y_{min} . Далее задается допустимое отклонение от Y_{min} , при котором находится последующий критерий эффективности Z_{min} и т.д.

Наилучшие результаты обычно дает оптимизация по функции F с перебором характерных значений весовых коэффициентов и использованием ограниченных решений, в которых нельзя одновременно улучшить все критерии эффективности.

В общем случае под оптимизацией конкретного технического решения понимают обобщение экстремума числовой функции, которое формулируется так: решение эффективно, если любой из характеризующих его критериев можно улучшить, лишь за счет ухудшения остальных. Ниже приводятся примеры, иллюстрирующие это правило.

Предположим, что требуется определить, при каких соотношениях между мощностями источников (I) и преобразователей электроэнергии ($ПЭ$) масса АСЭ принимает наименьшее значение. При этом, в качестве источников возобновляемой энергетики могут быть электромашинные генераторы (ветроэлектрических установок, малых гидроэлектростанций), солнечные батареи (солнечных фотоэлектрических станций), а в качестве преобразователей (стабилизаторов) электроэнергии

– статические преобразователи (инверторы, преобразователи частоты, выпрямители). Если структура АСЭ имеет n источников и m преобразователей, общая масса системы будет определяться по формуле

$$G_{АСЭ} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta G_{Иi} P_{Иi}}{1 - k_{Иi}} + \sum_{i=1}^n G_{Иi} + \sum_{j=1}^m \frac{\Delta G_{ПЭj} P_{ПЭj}}{1 - k_{ПЭj}} + \sum_{j=1}^m G_{ПЭj}, \quad (2)$$

где $\Delta G_{Иi}$, $\Delta G_{ПЭj}$ и $G_{Иi}$, $G_{ПЭj}$ – удельные массы и постоянные значения массы источников и преобразователей электроэнергии соответственно; $P_{Иi}$ и $P_{ПЭj}$ – установленные мощности источников и преобразователей электроэнергии; $k_{Иi}$ и $k_{ПЭj}$ – коэффициенты, учитывающие потери электроэнергии в источниках и преобразователях электроэнергии.

Множество решений выражения (2) можно получить в плоскости $P_{И}P_{ПЭ}$ (рисунок 1), содержащей семейство прямоугольных треугольников. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $P_{Иi}$ – мощность одного источника электроэнергии при отсутствии преобразователей электроэнергии (точка A), причем такая структура соответствует минимальной массе АСЭ; $P_{Иi}$ – суммарная мощность источников, используемых в АСЭ (точка B); $P_{ПЭA1} - P_{ПЭAj}$ – мощности преобразователей электроэнергии, применяемых в автономной системе (точки $A_1 \div A_j$).

Так как структуры, определяющие собой области допустимых решений, являются треугольниками, по которым определяются массовые числа АСЭ, оптимальной можно считать ту структуру, которая расположена в центре тяжести соответствующего треугольника. Такой подход позволяет вычислить оптимальное соотношение мощностей, а значит, и масс источников и преобразователей электроэнергии АСЭ. Для треугольников центры тяжести (точки C_1 , C_2 и C_j) лежат на пересечении их медиан, причем точки C_1 , C_2 и C_j – соответственно

для треугольников ABA_1 , ADA_2 и ABA_j (см. рисунок 1). Структура АСЭ, описываемая треугольником ADA_2 , имеет меньшее число источников электроэнергии и, как следствие, более низкую надежность.

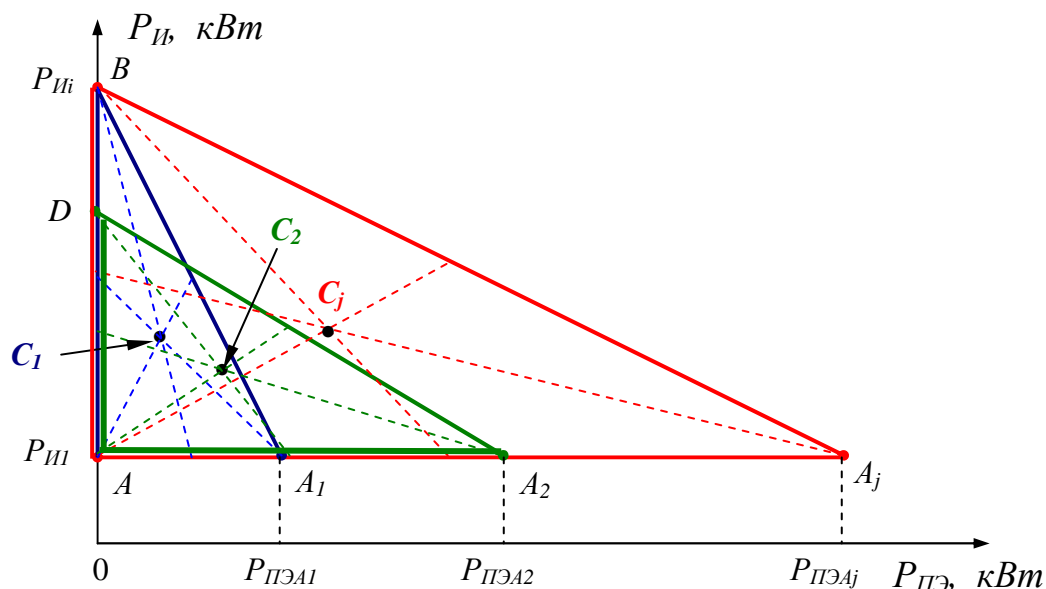


Рисунок 1 – Графики решения задачи оптимизации АСЭ

Во всех режимах работы АСЭ, как правило, функционирует только один источник электроэнергии, и его мощность $P_{иБ}$ должна превышать суммарную мощность всех преобразователей электроэнергии $P_{ПЭ}$, работающих в этом режиме, и соответственно превышать суммарную мощность всех электроприемников $P_{ЭП}$, т.е. должны выполняться условия

$$P_{ПЭ} < P_{иБ} > P_{ЭП}. \quad (3)$$

Задача оптимизации структурных вариантов СГЭ в общем виде заключается в определении минимальной массы системы по выражению (2) при соблюдении условия (3).

Использование предложенной методики решения задачи оптимизации дает возможность при проектировании АСЭ выбирать оптимальные структуры системы на этапе проектирования по

показателям массы при заданных мощностях источников и преобразователей электроэнергии. Такой подход может быть применён и для оценки других критериев эффективности автономной системы [7, 9].

Рассмотренные способы предполагают решение оптимизационной задачи по двум критериям эффективности. Более сложный путь, когда оптимизация АСЭ осуществляется с использованием трех критериев эффективности.

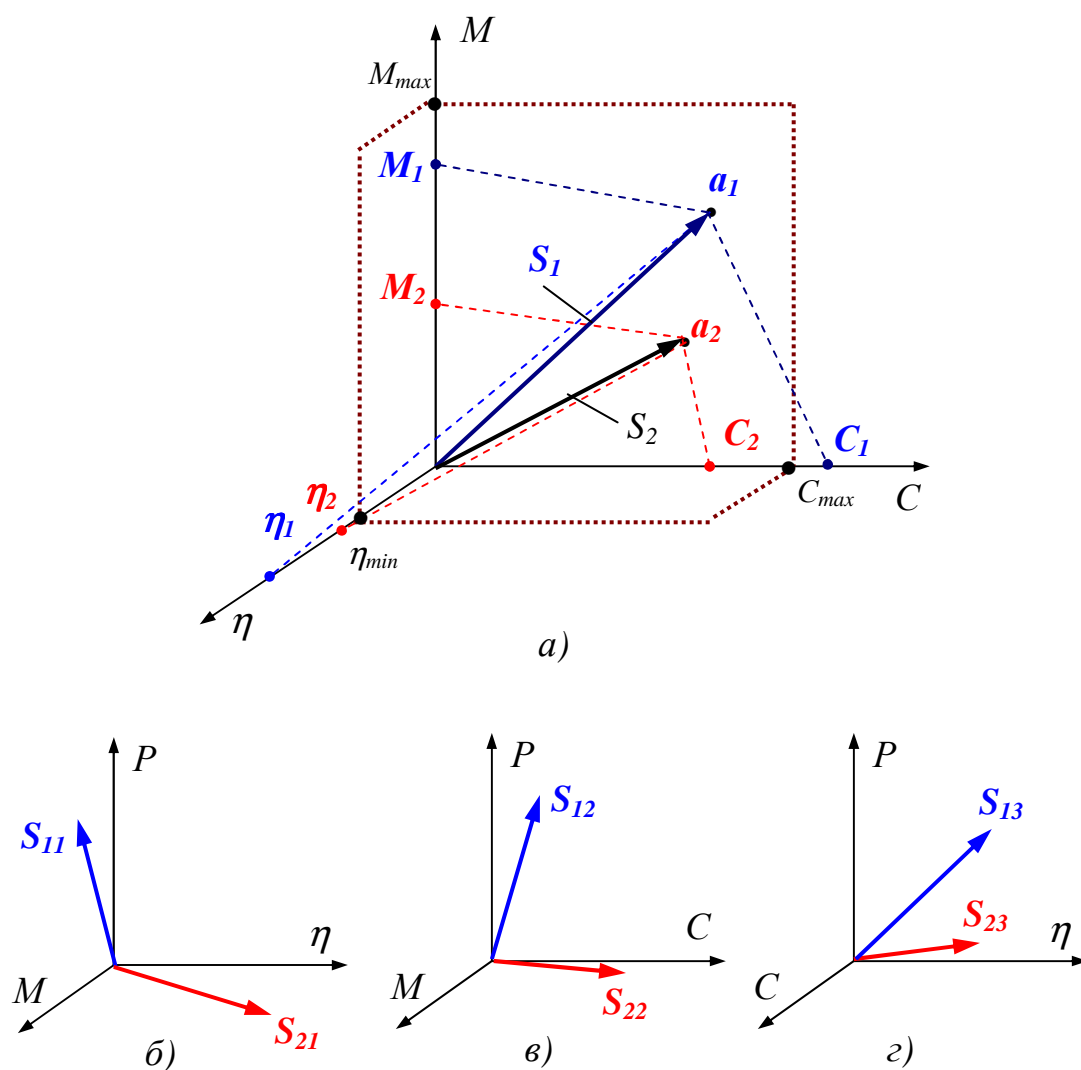


Рисунок 2 – Сравнение двух вариантов схем АСЭ по трем критериям эффективности: КПД η , массе M и стоимости C , с учетом вероятности безотказной работы P

Эффективность АСЭ может оцениваться положением некоторой точки a в трехмерном пространстве (рисунок 2, a). Проекции этой точки на оси критериев эффективности характеризуют их значения. Обобщенный показатель эффективности характеризуется вектором S , соединяющим начало координат с точкой a .

На каждый из критериев эффективности АСЭ могут быть наложены ограничения (т.е., к примеру АСЭ должна иметь минимальный КПД η_{min} , максимальную массу M_{max} и стоимость не превышаемую C_{max} , см. рисунок 2, a), по которым определяется, удовлетворяет ли данная АСЭ техническому заданию на проектирование или нет.

Для структурного решения первого варианта АСЭ по положению точки a_1 (рисунок 2, a) она не удовлетворяет техническому заданию по показателю стоимости C_1 . Изменив структуру АСЭ или включив в ее состав преобразователи с меньшей стоимостью (получив при этом второй вариант системы), но естественно с худшими другими показателями, можно добиться положения вершины вектора S_2 в точке a_2 оставляя в заданных пределах другие критерии оптимизации. Во втором варианте показатель стоимости системы C_2 будет удовлетворять требованию на техническое задание, однако снизится КПД АСЭ до уровня η_2 (рисунок 2, a).

Каждой совокупности характеристик соответствует множество схемных решений АСЭ, качество которых характеризуется векторами $S_1 - S_n$. Максимальное значение вектора S , при прочих выполненных ограничениях, будет соответствовать оптимальному значению трех критериев эффективности проектируемой АСЭ. Однако максимальное значение вектора может быть достигнуто при уменьшении требований по ограничению хотя бы к одному критерию эффективности, при этом повышаются требования к двум остальным критериям. В этом случае дополнительно к графику, показанному на рисунке 2, a строятся

пространственные координаты, которые имеют дополнительный критерий эффективности, в рассматриваемом примере это вероятность безотказной работы P (рисунок 2, б – г). Здесь практически уже будет проходить оптимизация системы с учетом четырех критериев эффективности, т.е. по показателям η , M , C и P .

Суммарная длина векторов для двух вариантов структуры САЭ будет определяться по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sum S_{B1} &= S_1 + S_{11} + S_{12} + S_{13}, \\ \sum S_{B2} &= S_2 + S_{21} + S_{22} + S_{23}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Следующим примером является решение оптимизационной задачи при сравнении трех вариантов АСЭ, но уже по четырем критериям эффективности: общей массе – G , КПД системы – η , вероятности безотказной работы P и стоимости системы – C , с учетом, что все четыре сравниваемые АСЭ имеют равную выходную мощность, и автономные источники и преобразователи (стабилизаторы), обеспечивают потребители электроэнергией требуемого качества (рисунок 3). В рассматриваемом случае значение КПД АСЭ определяется с учетом КПД автономных источников и преобразователей электроэнергии, работающих в основном режиме функционирования системы [10, 11].

На каждый из показателей эффективности, в том числе на мощность, могут быть также наложены ограничения по максимальному или минимальному значениям, по которым на начальном этапе проектирования определяется удовлетворяет ли АСЭ требованиям технического задания (на рисунке 3 эти области ограничены штриховкой).

На рисунке 3 показаны попарные зависимости параметров (C от G , G от η , P от η) четырех систем, определяемые положением

некоторой точки $S_{n(i-j)}$, где обозначения в индексе: n – номер системы; i и j – критерии эффективности системы. На рисунке 3 значения КПД η и вероятности безотказной работы $P(t)$, относительно оси абсцисс, отградуированы в обратной последовательности, т.е. начало координат соответствует максимальному значению рассматриваемых критериев (равному 1).

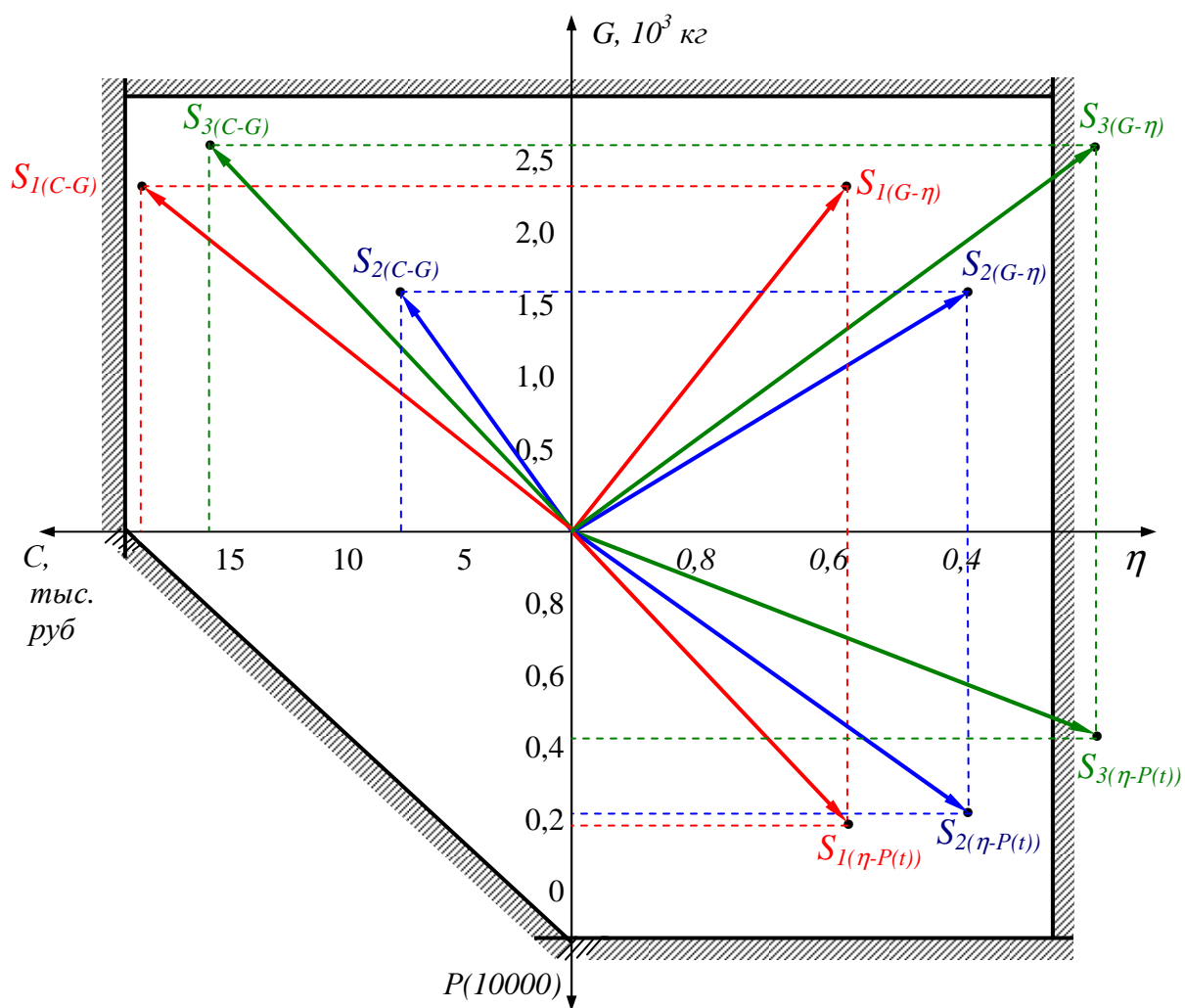


Рисунок 3 – Сравнение трёх вариантов АСЭ по четырём критериям эффективности

Зависимость двух критериев системы определяется длиной вектора, соединяющего начало координат и точку $S_{n(i-j)}$ (см. рисунок 3). Очевидно, оптимальной системой будет та, которая, во-первых, удовлетворяет

требованиям по предельному ограничению критериев эффективности (максимальному или минимальному), а во-вторых, у которой длина суммы векторов $(S_{n(C-G)} + S_{n(G-\eta)} + S_{n(\eta-P(t))})$ будет иметь наименьшее значение.

Несмотря на то, что критерии эффективности АСЭ имеют различные единицы измерения и независимо от масштабирования осей ординат и абсцисс сравнительная оценка АСЭ будет являться объективной [3, 8].

Интересным является направление введение общего экономического критерия оценки АСЭ, в котором все частные критерии выражаются с помощью стоимостных эквивалентов или соответствующих затрат (капитальных и эксплуатационных). В этом случае оптимизация АСЭ может проводиться на достаточно строгой основе. Однако колебания стоимостных критериев в настоящих экономических условиях позволяют использовать такой подход в весьма ограниченных случаях.

Целесообразно синтез сложных структурных решений АСЭ проводить с использованием графов [8], в которых вершинами являются виды энергии (по роду тока его частоте и уровню напряжения), а ребрами графа являются функциональные узлы автономной системы. Или наоборот: вершины – функциональные узлы АСЭ, а ребра – виды энергии. Графы удобны при описании структур АСЭ с многоступенчатым преобразованием электроэнергии. Графы кодируются матрицами инцидентий. Каждая структура АСЭ состоит из набора цепей или маршрутов между возможными источниками электроэнергии \mathcal{E}^i , в том числе и преобразователей, и заданными параметрами потребителей электроэнергии \mathcal{E}^j . Для нахождения оптимальных или близких к ним вариантов каждому элементу АСЭ (вершине или ребру) приписывается определенная числовая характеристика (масса,

стоимость, вероятность отказа или обобщенный критерий F), называемая мерой, и затем выбирается маршрут (цепь) от \mathcal{E}^i до \mathcal{E}^j с минимальной суммой выбранного показателя [6].

Для примера на рисунке 4 приведены структурные схемы двух вариантов АСЭ. Основной исходной энергией \mathcal{E}^{01} является механическая энергия ветроколеса (ВК) ветроэлектрической установки, а резервным источником энергии \mathcal{E}^{02} являются солнечные батареи (СБ) солнечных фотоэлектрических станций.

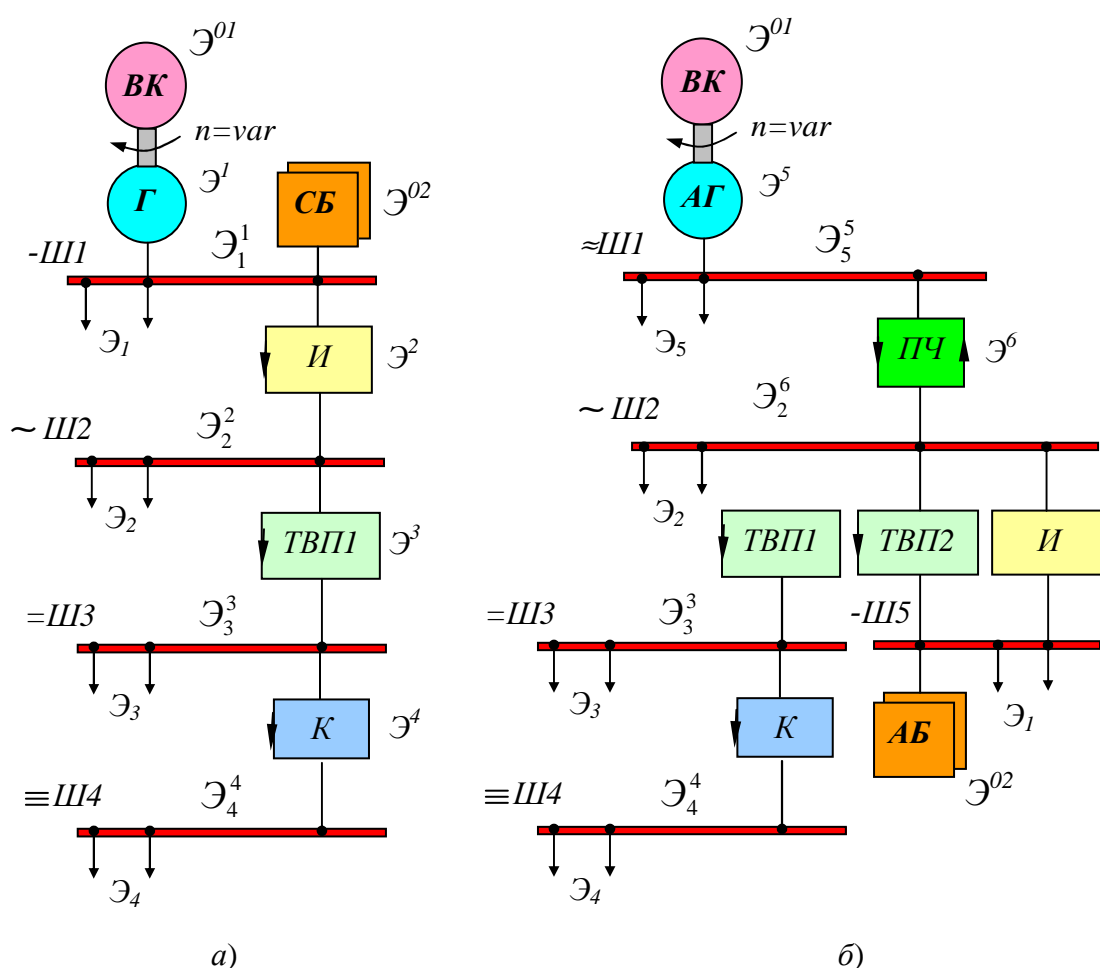


Рисунок 4 – Структурные схемы двух вариантов АСЭ на ВИЭ

В схеме АСЭ рисунок 4, *a* энергия \mathcal{E}^{01} механическая энергия ВК преобразуется генератором G в энергию постоянного тока \mathcal{E}^1 , поступающую на шину Ш1 и далее к потребителям \mathcal{E}_1 . Двойная индексация энергии на шинах указывает на источник (показатель

степени) и потребитель электроэнергии (индекс). Инвертор I преобразует энергию постоянного тока \mathcal{E}_1^1 в энергию переменного тока \mathcal{E}_2^2 , которая поступает на шину $Ш2$, с которой осуществляется питание потребителей и трансформаторно-выпрямительного преобразователя $ТВП$, преобразующего энергию переменного тока \mathcal{E}_2^2 в энергию постоянного тока \mathcal{E}_3^3 , которая затем конвертором K преобразуется в энергию постоянного тока с другим уровнем напряжения \mathcal{E}_4^4 .

В структурной схеме на рисунке 4, б энергия \mathcal{E}^{01} асинхронным генератором $АГ$ преобразуется в энергию переменного тока нестабильной повышенной частоты, которая преобразователем частоты $ПЧ$ преобразуется в энергию стабильной промышленной частоты, поступающей на шину $Ш2$. Энергия постоянного тока \mathcal{E}_1^1 с шины $Ш5$ от аккумуляторной батареи $АБ$ поступает на шину $Ш2$ через инвертор I . Инвертор предназначен для электроснабжения потребителей переменного тока и подзаряда $АБ$. В приведённой схеме аккумуляторная батарея $АБ$ выполняет функцию аварийного источника электроэнергии.

На рисунке 5 приведены графы для обеих схем АСЭ (красный цвет для схемы, приведённой на рисунке 4, а, а синий – для схемы, приведённой на рисунке 4, б). Анализируя временные интервалы режимов работы АСЭ и возможные аварийные ситуации определяется структура системы удовлетворяющая требованиям потребителей по критериям эффективности.

Эффективность решения задачи синтеза структур сложных АСЭ возможно только на основе полной и логически строгой систематизации всех альтернативных вариантов структур, удовлетворяющих по своим характеристикам требованиям потребителей электроэнергии [1, 5]. На рисунке 6 приведён общий алгоритм проектирования нового структурно-схемного решения АСЭ.

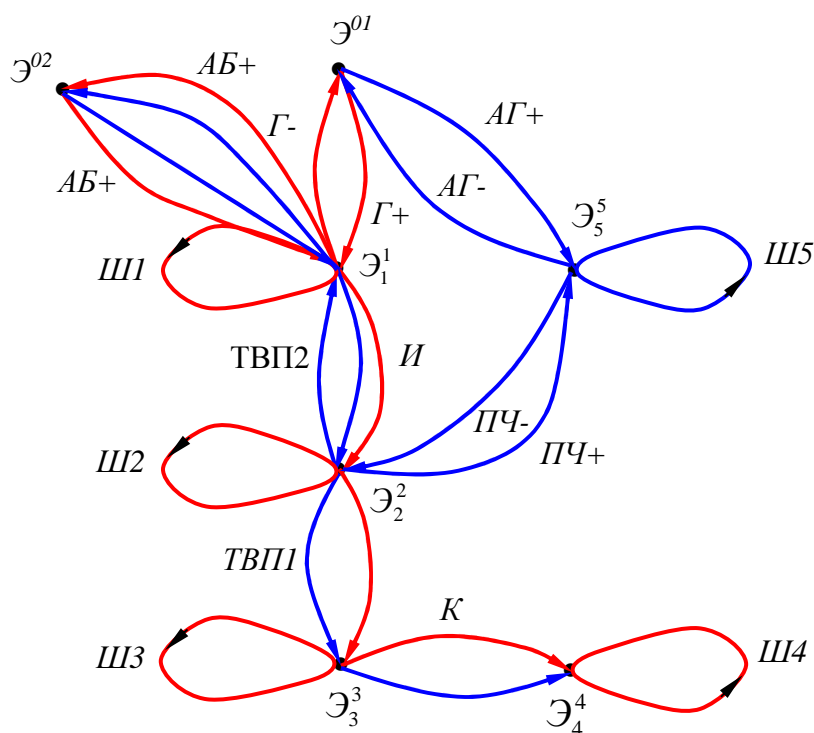


Рисунок 5 – Графи структурных схем, приведённых на рисунке 4

Таким образом, рассмотренные способы синтеза оптимальной структуры АСЭ позволят повысить эффективность предпроектных работ по созданию систем с улучшенными ЭТХ. В основном выбор способа синтеза зависит от вида применяемых ВИЭ и от требований потребителей по качеству электроэнергии и бесперебойности электроснабжения.

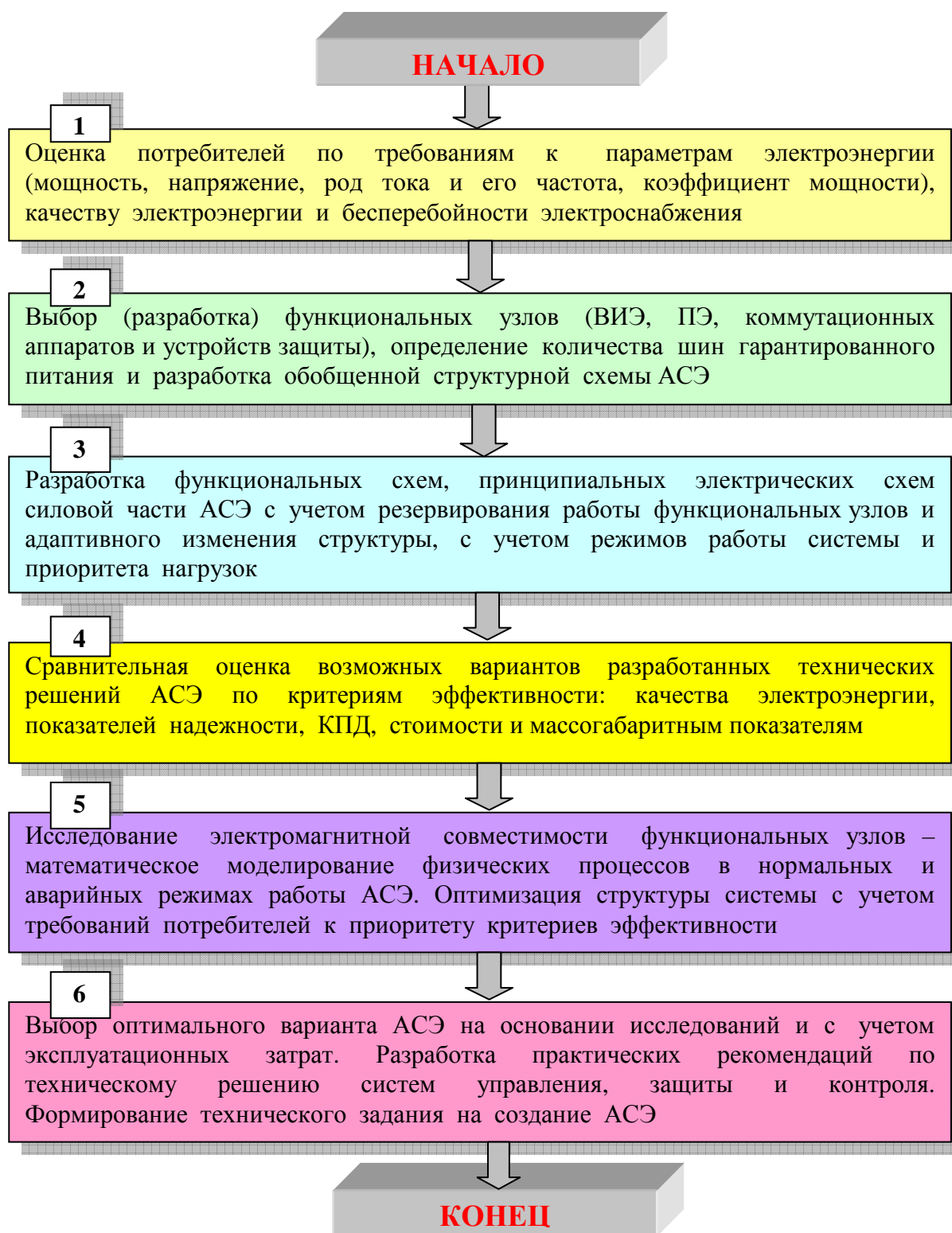


Рисунок 6 – Алгоритм оценки эффективности АСЭ

Список литературы

1. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. – М.: КолосС, 2003. – 532 с.
2. Григораш О.В., Ступура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. – Краснодар: КубГАУ, 2012, – 272 с.
3. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения. – Краснодар: Б/И. – 2001. – 333 с.
4. Амерханов Р.А., Цыганков Б.К., Бегдай С.Н. и др. Перспективы использования возобновляемых источников энергии. Труды КубГАУ. – Краснодар. – 2013. – № 42. – С. 185 – 189.
5. Никитенко Г.В., Коноплев Е.В., Коноплев П.В. Оценка вариантов автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 1. – С. 16–17.
6. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. – Краснодар: КВВАУЛ. – 2005. – 306 с.
7. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии. Краснодар, 2012. 174 с.
8. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Казаков Д.А. Математический аппарат для оценки эффективности систем гарантированного электроснабжения. Под редакцией Н.И. Богатырева. Краснодар. 2002. 285 с.
9. Богатырев Н.И., Григораш О.В., Курзин Н.Н. и др. Преобразователи электрической энергии: основы теории, расчета и проектирования. Краснодар, 2002.
10. Григораш О.В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О.В. Григораш, П.Г. Корзенков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №09(093). С. 364 – 376. – IDA [article ID]: 0931309024. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/24.pdf>.
11. Григораш О.В. Преобразователи и стабилизаторы параметров электроэнергии возобновляемых источников с улучшенными техническими характеристиками / О.В. Григораш, А.С. Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №09(093). С. 377 – 393. – IDA [article ID]: 0931309025. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/25.pdf>.

References

1. Amerhanov R.A. Optimizacija sel'skhozjajstvennyh jenergeticheskih ustano-vok s ispol'zovaniem vozobnovljaemyh vidov jenerгии. – М.: KolosS, 2003. – 532 s.
2. Grigorash O.V., Stupura Ju.P., Sulejmanov R.A. i dr. Vozobnovljaemye is-tochniki jelektrojenerгии. – Krasnodar: KubGAU, 2012, – 272 s.
3. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N. Sistemy avtonomnogo jelektro-snabzhenija. – Krasnodar: B/I. – 2001. – 333 s.
4. Amerhanov R.A., Cygankov B.K., Begdaj S.N. i dr. Perspektivy ispol'zova-nija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии. Trudy KubGAU. – Krasnodar. – 2013. – № 42. – S. 185 – 189.

5. Nikitenko G.V., Konoplev E.V., Konoplev P.V. Ocenka variantov avtonomno-go jelectrosnabzhenija sel'skhozjajstvennyh potrebitelej. Tehnika v sel'skom hozjaj-stve. – 2012. – № 1. – S. 16–17.

6. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelectrosnabzhenija. – Krasnodar: KVVAUL. – 2005. – 306 s.

7. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr. Avtonomnye istochniki jelectrojenergii. Krasnodar, 2012. 174 s.

8. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Kazakov D.A. Matematicheskij apparat dlja ocenki jeffektivnosti sistem garantirovannogo jelectrosnabzhenija. Pod redakciej N.I. Bogatyreva. Krasnodar. 2002. 285 s.

9. Bogatyrev N.I., Grigorash O.V., Kurzin N.N. i dr. Preobrazovateli jelectri-cheskoj jenergii: osnovy teorii, rascheta i proektirovanija. Krasnodar, 2002.

10. Grigorash O.V. Avtonomnye sistemy jelectrosnabzhenija na vozobnovljaemyh istochnikah jenergii / O.V. Grigorash, P.G. Korzenkov // Politematicheskij setevoj jelectronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelectronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – №09(093). S. 364 – 376. – IDA [article ID]: 0931309024. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/24.pdf>.

11. Grigorash O.V. Preobrazovateli i stabilizatory parametrov jelectrojener-gii vozobnovljaemyh istochnikov s uluchshennymi tehničeskimi harakteristikami / O.V. Grigorash, A.S. Os'kina // Politematicheskij setevoj jelectronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelectronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – №09(093). S. 377 – 393. – IDA [article ID]: 0931309025. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/25.pdf>.