

Система поддержки принятия решений для обоснования выбора проектных параметров автономных систем энергоснабжения

Бобронников В.Т., Терещенко Т.С.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: vlbobronnikov@yandex.ru*

***e-mail: tatiana.s.abramova@gmail.com*

Аннотация

Разработана система поддержки принятия решений (СППР) для обоснования выбора проектных параметров автономных систем энергоснабжения (АСЭС) на основе возобновляемых источников энергии – ветра и Солнца. Отличительной особенностью СППР является использование имитационных моделей случайных природных факторов, оказывающих влияние на функционирование системы. СППР предполагается использовать для оценки эффективности и сравнения различных вариантов построения АСЭС и выработки рекомендаций по их применению, в том числе в авиационно-космической отрасли.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, имитационное моделирование, автономные энергетические системы

Введение

В настоящее время во всем мире большое внимание уделяется созданию систем энергоснабжения, основанных на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ) - энергии ветра, Солнца, биологического топлива и других. В связи с этим сейчас существует множество компаний – производителей и поставщиков оборудования для автономного энергоснабжения с использованием ВИЭ. Поэтому одной из существенных проблем для потребителя, принявшего решение использовать систему энергоснабжения на основе альтернативных источников энергии, является выбор компонентов АСЭС, отвечающих его потребностям и эффективных в климатических условиях эксплуатации системы.

В данной работе объектами исследования являются системы энергоснабжения наземных потребителей, в которых источниками энергии служат именно ветер и солнечное излучение. Рассматривается автономный вариант построения системы энергоснабжения (АСЭС), при котором потребитель получает всю необходимую ему энергию только от ветрогенератора (ВГ) и/или солнечных батарей (СБ), поскольку сетевая энергия ему недоступна. В периоды безветрия и в ночное время энергия подается потребителю из накопителя энергии (НЭ), например, аккумуляторных батарей (АКБ), в котором накапливается и хранится избыточная энергия, вырабатываемая ВГ и СБ при ветре и в солнечную погоду. Также возможен гибридный вариант построения АСЭС, при котором для обеспечения бесперебойного снабжения потребителя энергией дополнительно к ВГ и СБ в систему вводится углеводородный источник энергии (обычно дизельный генератор (ДГ)), включаемый при недостатке энергии, вырабатываемой ВГ и СБ, и одновременно при полностью разряженном НЭ. Управление потоками энергии и

преобразование напряжений в системе осуществляется с помощью контроллера-инвертора (КИ).

Следует отметить, что АСЭС применяются для снабжения энергией не только индивидуальных потребителей, но и промышленных объектов инфраструктуры, находящихся в удаленных районах и не имеющих доступа к централизованной системе подачи электроэнергии.

В области аэрокосмической техники простейшим примером АСЭС является система энергоснабжения космических аппаратов, в которой источником возобновляемой энергии является солнечное излучение, преобразуемое в электричество с помощью СБ.

В наземной инфраструктуре аэрокосмического комплекса потребителями энергии АСЭС могут выступать, прежде всего, наземные измерительные пункты (НИП), малые аэродромы, ретрансляторы радиорелейных линий и другие объекты, расположенные в удаленных районах страны. Такие объекты часто не имеют возможности получать сетевую энергию и поэтому вырабатывают ее с помощью автономных электрогенераторов, работающих на традиционном углеводородном топливе, например, ДГ.

Однако стоимость энергии, вырабатываемой для таких потребителей с помощью ДГ, существенно возрастает по сравнению со стоимостью сетевой энергии из-за больших затрат на доставку топлива в удаленные районы. Использование АСЭС взамен или в дополнение к существующим дизельным системам может позволить сократить затраты на энергоснабжение потребителей энергии указанного типа.

Необходимо отметить важное отличие АСЭС, использующих энергию ветра и Солнца на земной поверхности, от АСЭС, работающей на борту КА. Это отличие заключается в том, что и ветер, являющийся функциональным входом ВГ, и облачность, являющаяся помехой при работе СБ, - это сильно коррелированные во времени случайные процессы. Статистические характеристики этих процессов зависят от климата в месте развертывания АСЭС и эти характеристики существенно влияют на выбор структуры и проектных параметров системы для потребителя энергии. В частности, коррелированность процессов определяет требования к емкости накопителя энергии, снабжающего потребителя энергией в периоды безветрия и/или ночью и в пасмурную погоду.

Кроме того, при использовании НЭ ограниченной емкости АСЭС является нелинейной динамической системой. Как следствие, формирование АСЭС с учетом ветра и облачности как случайных процессов должно основываться на рассмотрении статистических показателей эффективности АСЭС как нелинейной стохастической динамической системы.

Таким образом, целью исследования, результаты которого представлены в данной работе, является разработка системы поддержки принятия решений, предназначенной для использования при формировании АСЭС из существующих компонентов для конкретных потребителей с учетом количества потребляемой ими энергии, географических и климатических особенностей местоположения системы. Исследования проводятся с использованием принципов и методов системного анализа и математического моделирования [1], [2], [3], [4].

1. Актуальность исследования

Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих актуальность исследования и необходимость создания подобной СППР.

Например, при построении АСЭС на основе ВГ основной характеристикой системы является номинальная мощность ВГ $N_{ном}$. Для различных моделей ВГ и у различных производителей приводятся значения $N_{ном}$, измеренные при различных значениях скорости ветра V . Чаще всего указываются значения $N_{ном}$, оцениваемые при $V = 10-12$ м/с. Однако на территории России такие значения скорости ветра являются достаточно редкими. Так, ВГ, обладающий номинальной мощностью $N_{ном} = 4$ кВт при скорости ветра 12 м/с, при $V = 3$ м/с вырабатывает всего 0,05 кВт.

Среднегодовые значения скорости ветра в различных регионах обширной территории России сильно различаются. Для центральной части европейской части России они составляют 3-4 м/с, на побережье Северного Ледовитого океана, в степях Северного Кавказа - 5-6 м/с, в Восточной Сибири - 3 м/с, на Тихоокеанском побережье - 7-8 м/с [5]. Следовательно, во многих регионах страны ВГ, выбранный с учетом его номинальной мощности, может быть неэффективен.

На рисунках 1, 2 показаны распределения скорости ветра и энергии, вырабатываемой ВГ ($N_{ном} = 4$ кВт, рабочий диапазон скоростей ветра 3 - 40 м/с), в течение 10 лет для г. Владивосток (средняя скорость ветра – 5,5 м/с) и г. Элиста (средняя скорость ветра – 5,8 м/с).

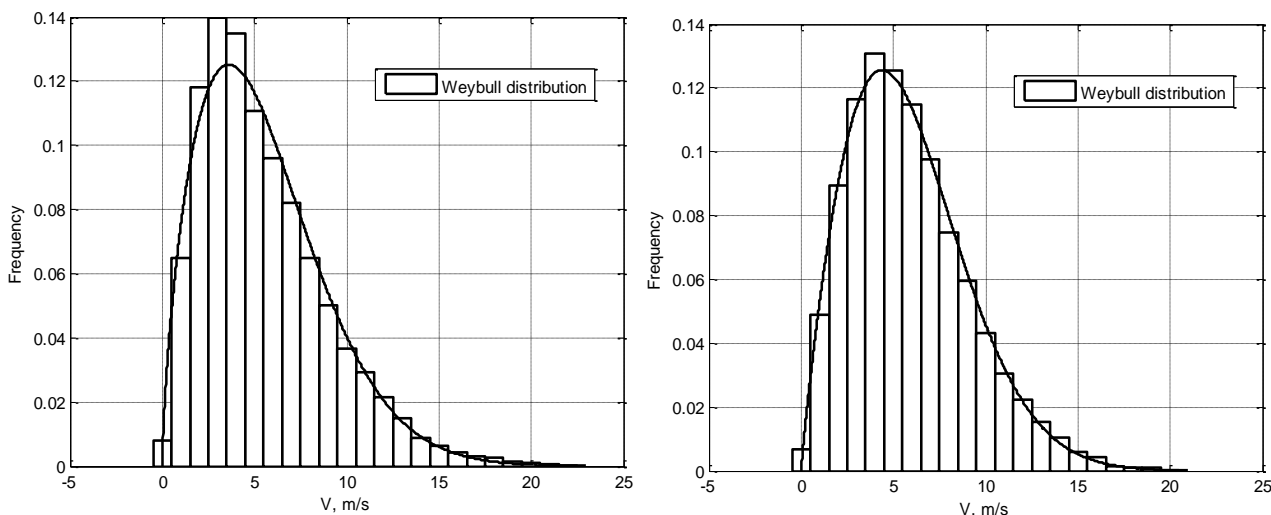


Рисунок 1. Распределения скорости ветра (г. Владивосток и г. Элиста)

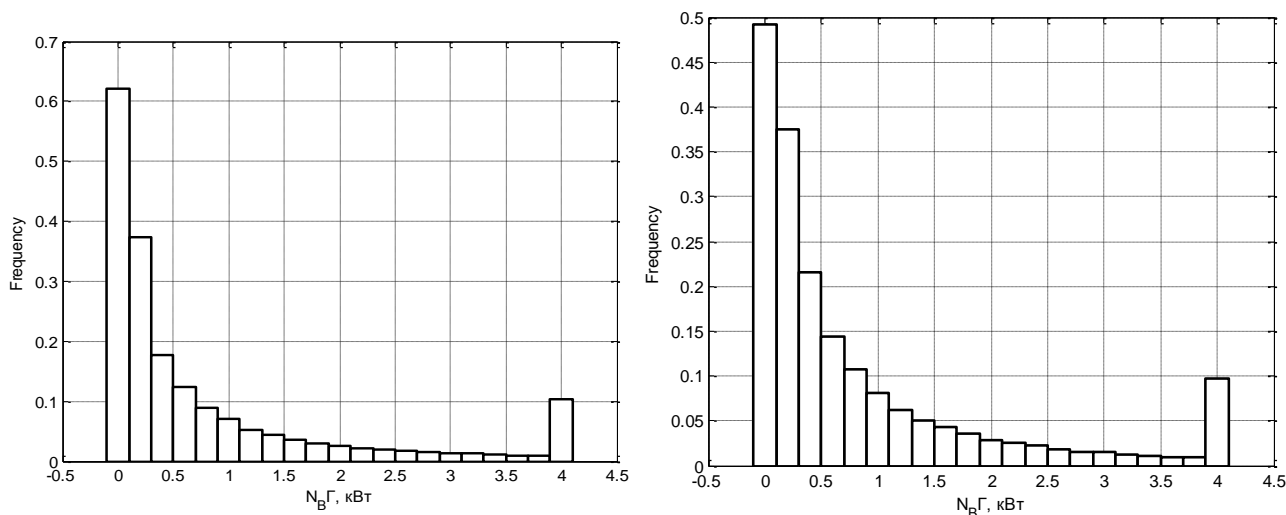


Рисунок 2. Распределения мощности ВГ (г. Владивосток и г. Элиста)

При этом среднее количество энергии, выработанной системой, равно всего 0,76 кВт-ч для г. Владивосток и 0,82 кВт-ч для г. Элиста. Время, в течение которого ВГ вырабатывает номинальную мощность составляет 5,3% для г. Владивосток и 5,0% для г. Элиста от времени функционирования системы. Периоды, когда скорость ветра меньше стартовой скорости ВГ, составляют 26,1% для г. Владивосток и 19,9% для г. Элисты.

Это говорит о том, что эффективность эксплуатации АСЭС, использующей энергию ветра, существенно зависит не только от средней скорости ветра, но также

от ее изменчивости во времени как случайного процесса. При малой корреляции скорость ветра быстро меняется, и вероятность наличия больших скоростей значительно выше, чем при сильно коррелированном процессе, где скорость ветра меняется медленно. Во втором случае периоды штиля или небольших скоростей будут наиболее вероятны и будут наблюдаться в течение более продолжительных периодов времени, что негативно повлияет на эффективность работы ВГ. Таким образом, необходимо исследовать влияние временной коррелированности скорости ветра на эффективность работы АСЭС на основе ВГ в течение всего периода функционирования системы.

В случае использования в составе АСЭС солнечных батарей аналогичное влияние на работу системы оказывает количество облачности и его временная изменчивость. На рисунке 3 в качестве примера приведены графики изменения мощности, вырабатываемой СБ, без учета и с учетом облачности как случайного процесса.

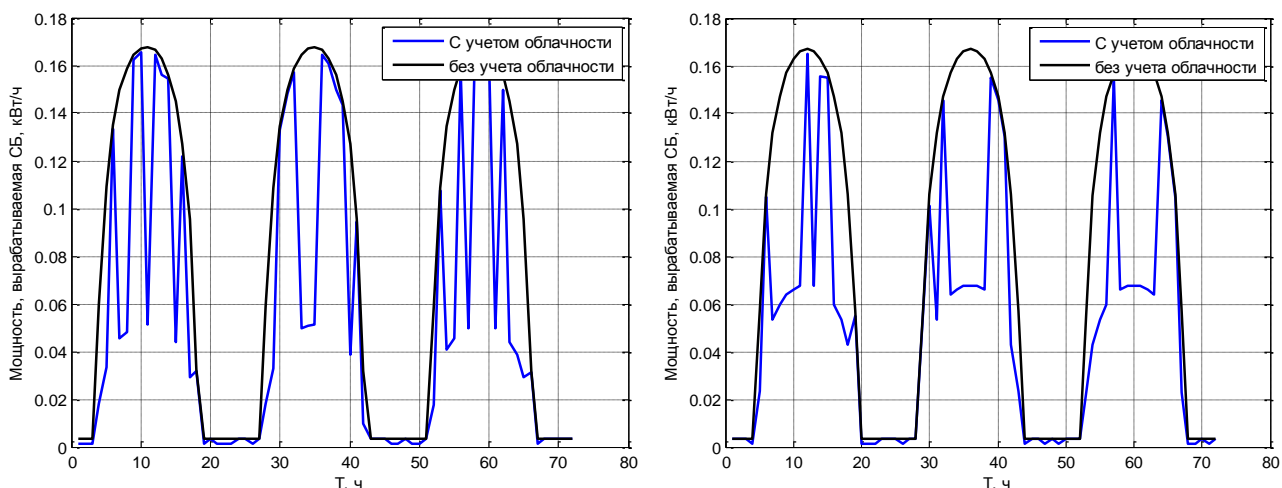


Рисунок 3. Графики изменения мощности СБ (г. Владивосток и г. Элиста)

Таким образом, потребителю необходимо предложить удобный инструмент для анализа различных вариантов построения АСЭС при выборе оптимального состава и характеристик системы с учетом конкретных потребностей в энергии и климатических условий в месте эксплуатации системы.

Процесс создания СППР можно разбить на следующие этапы:

1. Разработка имитационной модели автономной гибридной ветро-солнечно-дизельной системы энергоснабжения, предназначенной для оценки целевых и затратных показателей эффективности системы.

2. Разработка математических моделей ветра и облачности как коррелированных во времени и существенно негауссовских случайных процессов.

3. Расчет параметров разработанных моделей ветра и облачности для разных климатических зон на территории России путем статистической обработки результатов многолетних наблюдений на наземных метеостанциях [6].

4. Разработка и исследование алгоритмов оптимизации структуры и параметров компонентов АСЭС, в том числе с использованием методов многокритериальной оптимизации.

5. Разработка макета СППР для формирования АСЭС из существующих компонентов.

6. Проведение параметрических исследований для анализа эффективности разработанной СППР.

2. Структура АСЭС

Функциональная схема АСЭС представлена на рисунке 4.

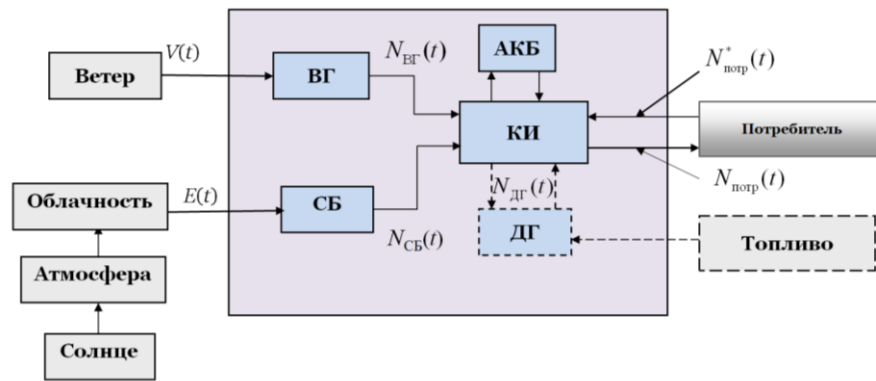


Рисунок 4. Функциональная схема автономной системы энергоснабжения

На этой схеме:

$N_{вг}(t)$, $N_{сб}(t)$ и $N_{дг}(t)$ - мощности, вырабатываемые ВГ, СБ и ДГ соответственно;

$V(t)$ – скорость ветра в текущий момент времени;

$E(t)$ –уровень солнечной инсоляции, падающей на панель СБ;

$N_n^*(t)$ и $N_n(t)$ – мощность, необходимая потребителю и получаемая им из СППР в текущий момент времени, соответственно.

АСЭС функционирует по следующему сценарию. ВГ вырабатывает мощность $N_{вг}(t)$ в зависимости от скорости ветра $V(t)$. Мощность $N_{сб}(t)$, поступающая от СБ, зависит от широты места расположения АСЭС, дня года, времени суток, ориентации панели СБ, прозрачности атмосферы, состояния облачности в текущий момент времени. Выработанная энергия используется для удовлетворения нужд потребителя энергии, характеризуемых запрашиваемой им мощностью $N_n^*(t)$.

Избыток вырабатываемой энергии накапливается и хранится в АКБ для отдачи потребителю в периоды недостатка мощности, вырабатываемой ВГ или/и

СБ. Дефицит энергии может также восполняться энергией, вырабатываемой резервным углеводородным источником (ДГ).

Основными природными факторами внешней среды, подлежащими учету при моделировании процесса функционирования АСЭС, являются:

- скорость ветра в атмосфере $V(t)$;
- мощность солнечного излучения за пределами земной атмосферы $E_0(t)$;
- состояние земной атмосферы, в которой излучение $E_0(t)$ частично поглощается, отражается и рассеивается;
- состояние облачного покрова в месте размещения АСЭС, приводящего к дополнительному отражению и рассеянию солнечного излучения в атмосфере.

Совместно солнечное излучение, атмосфера и облачность определяют уровень инсоляции панели СБ, т.е. поток солнечной энергии $E(t)$, падающей на панель.

При построении модели АСЭС ветер и облачность необходимо рассматривать как коррелированные во времени случайные процессы. Статистические характеристики этих процессов существенно зависят от климатических условий в месте размещения системы.

Фактором внешней среды по отношению к АСЭС также является потребитель, циклограмма потребления энергии $N_n^*(t)$ которого непосредственно влияет на режим работы системы.

Как уже говорилось выше, при наличии АКБ АСЭС является динамической системой. Ее состояние в каждый момент времени зависит не только от входов

системы в этот момент (скорости ветра, инсоляции СБ, нагрузки потребителя), но также от состояния АКБ, характеризуемого ее зарядом, динамически меняющимся во времени.

3. Показатели эффективности АСЭС

При формировании АСЭС из компонентов, представленных на рынке, в качестве основных показателей эффективности системы в работе предлагается рассматривать:

- надежность снабжения потребителя энергией, характеризуемую вероятностью P получения потребителем необходимого ему количества энергии $N_n^*(t)$ при случайных изменениях скорости ветра (для ВГ) и инсоляции СБ;
- стоимость $C_{\text{кВт-час}}$ одного киловатт-часа энергии, полученной потребителем, вычисляемую как отношение затрат на приобретение и эксплуатацию системы к количеству энергии, поставленной потребителю в течение заданного (длительного) периода T эксплуатации системы.

Дополнительные показатели эффективности АСЭС:

- коэффициент дефицита энергии, характеризующий количество энергии, недополученное потребителем в процессе функционирования системы (в варианте без ДГ) из-за случайных изменений природных факторов (ветра, солнечного излучения, облачности);
- коэффициент потерь энергии, возникающих в связи с возможным избытком энергии, вырабатываемой ВГ и СБ, при ограниченной емкости АКБ.

Очевидно, что надежность снабжения потребителя энергией можно повысить, увеличивая номинальные мощности источников энергии (ВГ и СБ) и емкость АКБ. Однако это неизбежно повлечет увеличение стоимости системы и стоимости киловатт-часа вырабатываемой энергии. Использование в составе системы резервного источника энергии (ДГ) обеспечит бесперебойное снабжение энергией потребителя, но также приведет к удорожанию системы, в том числе из-за дополнительных затрат на топливо.

4. Программная реализация СППР

Блок-схема программного комплекса, реализующего СППР, показана на рисунке 5. Она отражает состав СППР, взаимодействие компонентов системы друг с другом и с факторами внешней среды.

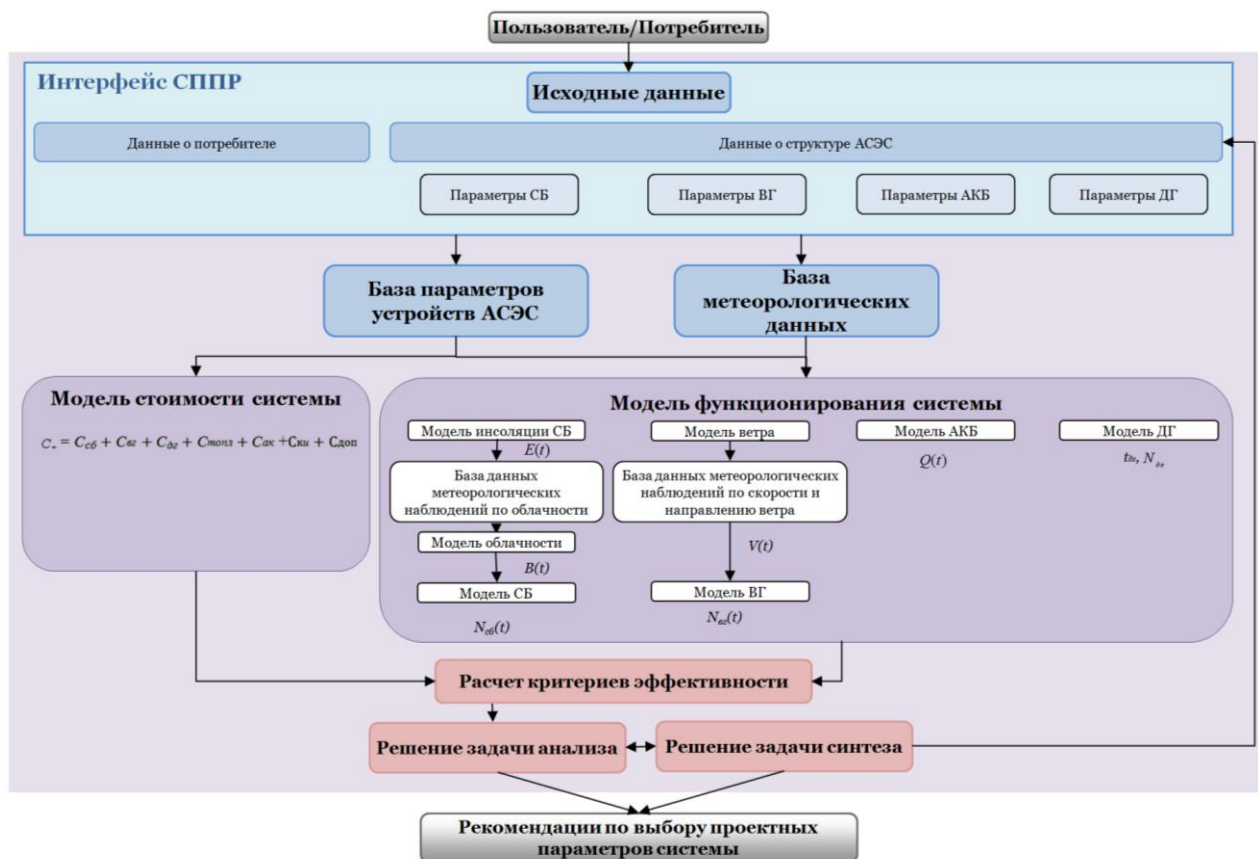


Рис. 5. Блок-схема программного комплекса

Программный комплекс формируется с использованием принципа его декомпозиции, чтобы обеспечивать возможность варьирования состава и параметров отдельных компонентов системы, не затрагивая при этом другие компоненты. Использование данного принципа также позволяет разрабатывать отдельные модули комплекса независимо друг от друга.

В качестве исходных данных при работе с СППР задаются:

- географические координаты нахождения АСЭС λ, φ ;
- номинальное значение или циклограмма мощности, необходимой потребителю $N_n^*(t)$;

- рассматриваемый вариант состава системы (ВГ, СБ, ДГ);
- основные технические характеристики устройств, включенных в систему;
- расчетное время эксплуатации системы T ;

Задаваемые технические характеристики СБ:

- Номинальная мощность $N_{ном}^{сб}$;
- Габариты панели СБ L, H ;
- Количество СБ $n_{сб}$;
- КПД СБ $\eta_{сб}$
- Угол наклона панели β ;
- Стоимость $C_{сб}$.

Задаваемые технические характеристики ВГ:

- Номинальная мощность $N_{ном}^{вг}$;

- Номинальная скорость $V_{ном}$;
- Стартовая скорость V_{min} ;
- Максимальная скорость V_{max} ;
- Высота ВГ h ;
- Число ВГ $n_{вг}$;
- Стоимость $C_{вг}$.

Задаваемые технические характеристики АКБ:

- Номинальная емкость Q_{max} ;
- Номинальное напряжение $u_{ном}$;
- Число АКБ $n_{акб}$;
- КПД АКБ $\eta_{акб}$;
- Стоимость АКБ $C_{акб}$;

Задаваемые технические характеристики ДГ:

- Номинальная мощность $N_{дг}$;
- расход топлива на единицу мощности $m_{тон}$;
- Стоимость $C_{дг}$.

В состав программного комплекса входят следующие модели компонентов АСЭС:

- модель функционирования ВГ;
- модель функционирования СБ;
- модель функционирования АКБ;
- модель функционирования ДГ;

- алгоритм работы КИ.

При формировании СППР особое внимание было уделено разработке математических моделей природных факторов – ветра и облачности как случайных процессов, существенно влияющих на функционирование АСЭС как динамической системы. Подробное описание разработанных математических моделей представлено в работах авторов [7], [8], [9].

Также необходимо отметить, что в варианте использования в составе системы солнечных батарей предусматривается возможность расчета параметров функционирования АСЭС для зимнего сезона, так как зимой условия функционирования СБ являются наиболее трудными не только в связи с самым коротким световым днем, но также в связи с максимальным количеством облачности. Поэтому определение наилучшей конфигурации системы для зимнего сезона обеспечивает нахождение минимаксного решения задачи, т.е. при наихудших условиях эксплуатации СБ.

Кроме того, разрабатываемая СППР позволяет оценить эффективность использования СБ с произвольной ориентацией и углом наклона панели, в том числе функционирующих в «следающем режиме», когда СБ обращена к Солнцу так, что солнечные лучи всегда падают перпендикулярно ее поверхности, что обеспечивает максимальное количество вырабатываемой энергии.

Для математического моделирования рассматриваемой системы, функционирующей при действии существенно негауссовских и коррелированных во времени случайных процессов, целесообразно использовать имитационную модель, т.е. проводить моделирование по методу Монте-Карло.

Имитационная модель функционирования АСЭС обеспечивает решение задачи анализа системы, т.е. расчет показателей эффективности системы путем осреднения их значений, рассчитанных в течение длительного периода (10 и более лет) эксплуатации системы.

Также в состав СППР входит модель расчета стоимости системы, отражающая суммарные затраты C_{Σ} на создание и эксплуатацию системы в течение всего срока ее функционирования, и модель стоимости киловатт-часа энергии, полученной потребителем в течение этого срока.

Результаты отображаются в виде графиков реализаций переменных состояния системы, демонстрирующих работу рассматриваемого варианта АСЭС во времени, в том числе:

- скорости ветра;
- мощности, вырабатываемой ВГ;
- интенсивности солнечного излучения, падающего на панель СБ;
- мощности, вырабатываемой СБ;
- текущего заряда АКБ;
- энергии, вырабатываемой ДГ, и других.

Основными итоговыми показателями эффективности системы являются следующие стоимостные и временные показатели:

- суммарная стоимость приобретения и эксплуатации системы за весь планируемый период ее использования;
- стоимость 1 кВт-ч энергии, полученной потребителем от АСЭС;

- стоимость использованного топлива при наличии ДГ в составе системы;
- коэффициент дефицита энергии как отношение энергии, недополученной потребителем, к общему количеству энергии, запрашиваемой им за весь период эксплуатации системы;
- коэффициент потерь энергии из-за ограниченной емкости АКБ по отношению к количеству энергии, которое могло бы быть выработано системой при неограниченной емкости АКБ;
- доля энергии, выработанной отдельно ВГ, СБ и ДГ по отношению к суммарному количеству энергии, выработанному АСЭС, и другие.

5. Пример анализа эффективности АСЭС с использованием СППР

Рассмотрим работу СППР на примере анализа эффективности определенных вариантов АСЭС. На рисунках 6,7 приведен интерфейс, используемый в СППР для задания исходных данных, а также для вывода результатов расчетов.

Исходные данные

Москва
Астрахань
Владивосток
Элиста
Задается пользователем

Широта: 46.19 Долгота: 44.16 Срок службы АСЭС: 10

Разница со временем по Гринвичу: 4

Циклограмма необходимой мощности

1-6: 1 7-12: 1 12-18: 1 18-24: 1

Элементы АСЭС

СБ (все сезоны)
 СБ (зимний сезон)
 ВГ
 ДГ

Анализ
Синтез
Удалить данные

Параметры элементов АСЭС

СБ		ВГ		АКБ	
Номинальная мощность	1	Номинальная мощность	3	Емкость	250
Габариты, L	1	Номинальная скорость	12	Номинальное напряжение	12
Габариты, H	1	Стартовая скорость	3	Количество АКБ	2
Количество СБ	2	Максимальная скорость	40	Мощность	6
КПД	0.18	Высота	10	КПД	0.9
Угол наклона панели	0	Количество ВГ	1	Стоимость	20000
Полярный угол наклона	0	Стоимость	150000	ДГ	
<input type="checkbox"/> Следящий режим				Номинальная мощность	
Стоимость	35000			Расход топлива	
				Стоимость	

Рисунок 6. Интерфейс СППР с исходными данными

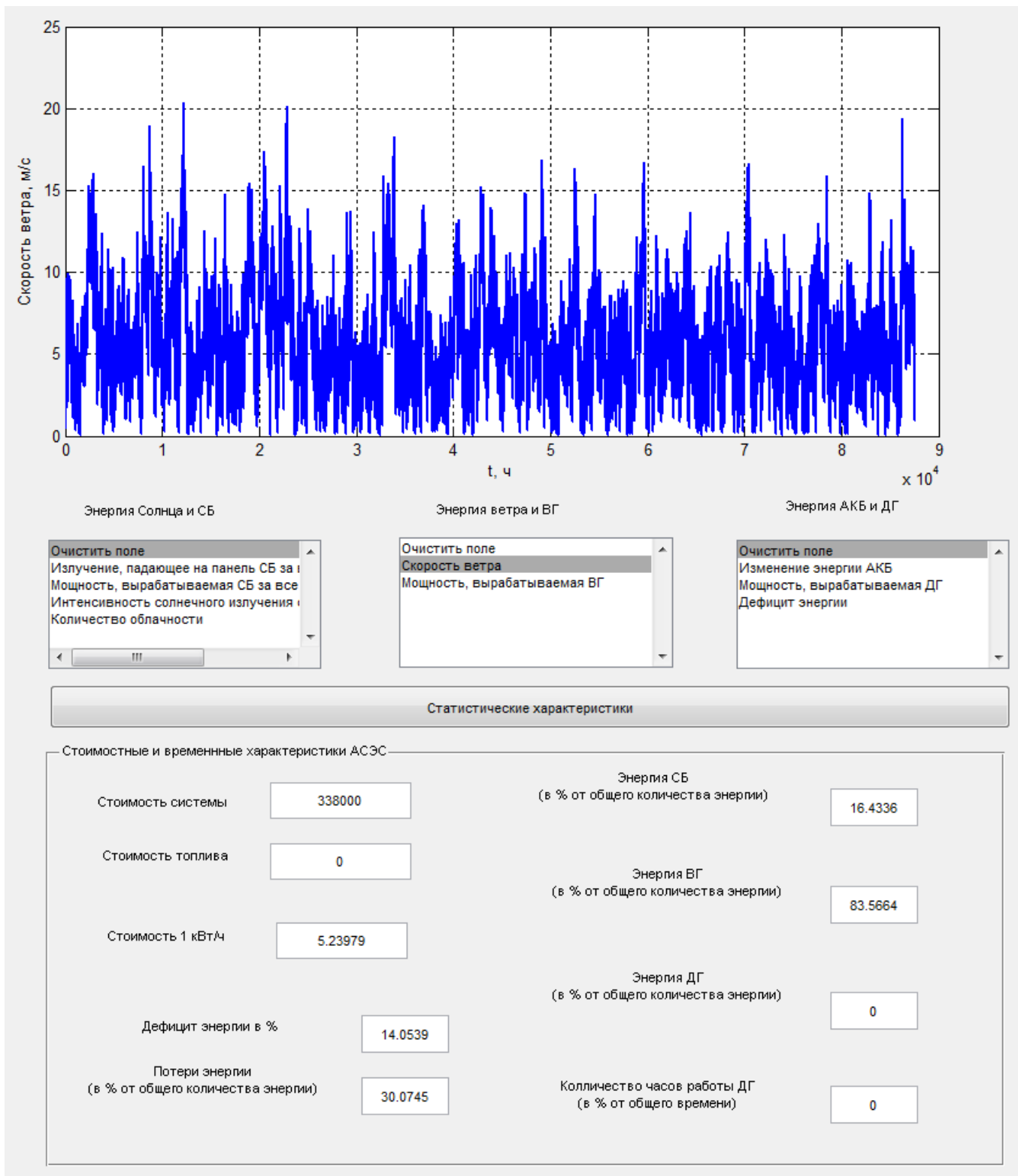


Рисунок 7. Интерфейс СППР с результатами расчетов

Основные параметры и рассчитанные с помощью СППР показатели эффективности для различных вариантов АСЭС представлены в таблице 1.

Численные результаты

№	Характеристика АСЭС	Конфигурация 1	Конфигурация 2	Конфигурация 3
1	Номинальная мощность ВГ, кВт	4	4	4
2	Номинальная мощность СБ, кВт	-	2	2
3	Емкость АКБ, кВт	6	6	6
4	Номинальная мощность ДГ, кВт	-	-	1
5	Надежность снабжения потребителя энергией, %	83,09	85,71	100
6	Потери энергии, %	41,47	40,40	26,58
7	Количество энергии/Время работы ДГ, %	-	-	35,32/48,10
8	Стоимость энергии, руб/кВт	3,07	3,45	20,6

СППР также дает возможность познакомиться со статистическими характеристиками природных факторов и параметров функционирования системы (рисунок 8). Данная функция будет интересна специалистам в области системного анализа, занимающихся моделированием и прогнозированием скорости ветра, облачности, солнечной инсоляции для решения различных технических задач.

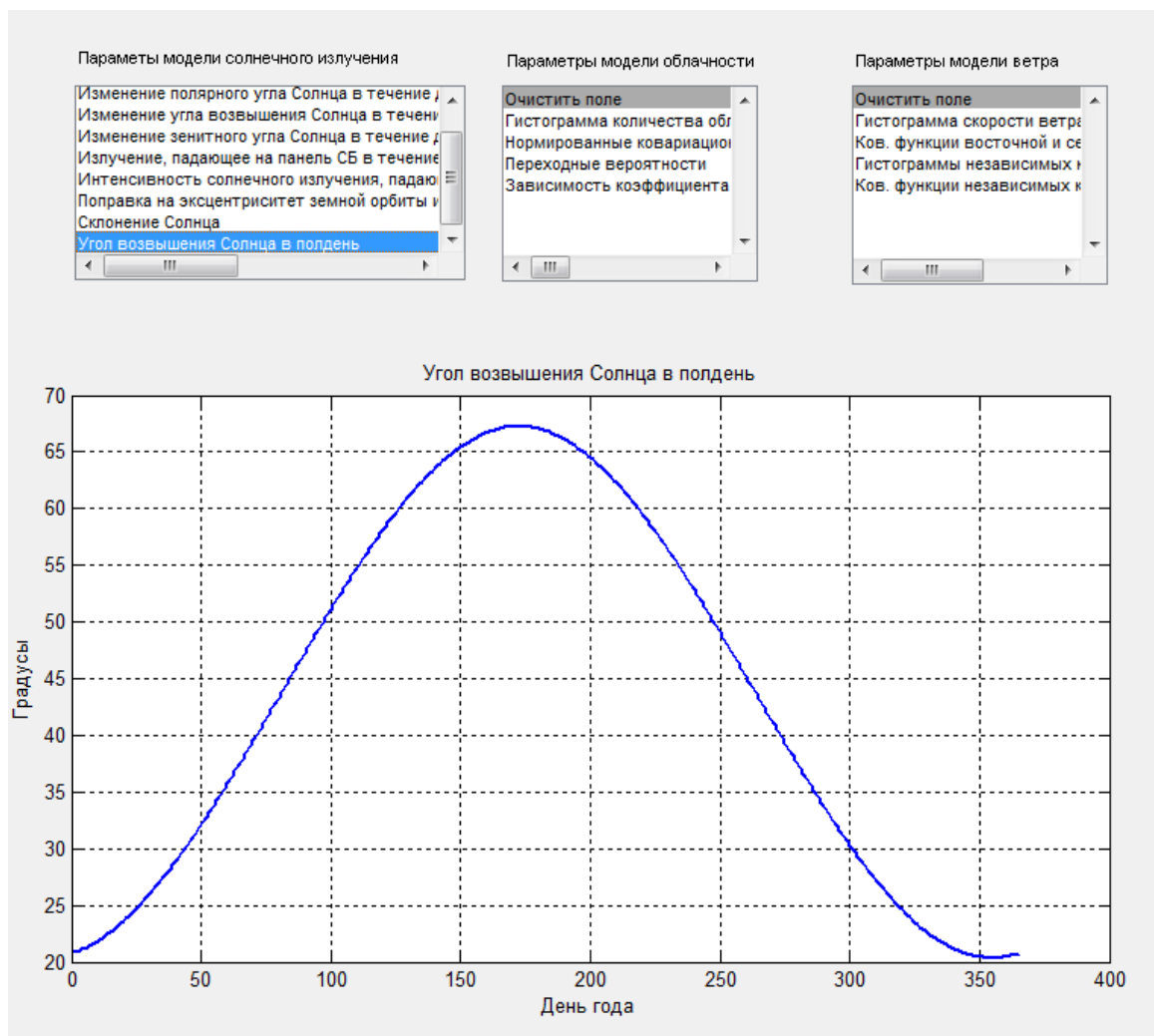


Рисунок 8. Статистические данные.

Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. Разработан и реализован макет программного комплекса СППР, предназначенной для использования при выборе оптимальной конфигурации системы энергоснабжения, основанной на использовании возобновляемых источников энергии (ветра и Солнца), для потребителей, не имеющих возможности пользоваться сетевой электроэнергией. СППР также может быть использована для выработки рекомендаций по применению систем энергоснабжения

рассматриваемого типа в различных регионах на территории РФ и для выявления регионов, где использование системы наиболее эффективно.

2. В программном комплексе предусмотрено имитационное моделирование функционирования АСЭС как нелинейной динамической системы, в том числе основных устройств входящих в ее состав (СБ, ВГ, ДГ, АКБ), а также природных факторов, значимо влияющих на ее работу, - ветра, солнечного излучения и облачности.

3. Для выбора оптимального варианта построения АСЭС в макете СППР предусмотрено использование алгоритма и программы оптимизации структуры и параметров системы. Для ускорения процесса решения задачи оптимизации планируется дополнить имитационную модель упрощенной эмпирической моделью, построенной с использованием результатов имитационного моделирования.

4. Использование разработанных моделей позволяет получить более точные результаты, наиболее приближенные к реальным условиям эксплуатации систем рассматриваемого класса, в то время как в существующих моделях (см., например, [10]) при анализе эффективности таких систем обычно учитываются только их простейшие статические характеристики (среднегодовые значения, распределения вероятностей значений), а динамические свойства процессов, описывающие их изменчивость во времени, никак не учитываются.

6. В дальнейшем предполагается использовать разработанную СППР для синтеза АСЭС, при котором на основе географических координат местонахождения системы и циклограммы мощности для конкретного потребителя будет

подбираться оптимальный состав системы и параметры системы, способные обеспечить потребителя необходимым количеством энергии при минимальных затратах на установку и обслуживание.

7. После заполнения баз данных, входящих в состав СППР и содержащих данные о технических характеристиках и стоимости компонентов, которые представлены на рынке и могут быть включены в систему, а также о статистических характеристиках ветра и облачного покрова в возможных местах эксплуатации системы, данная СППР может быть использована в организациях, занимающихся созданием или реализацией автономных систем энергоснабжения или их отдельных компонентов.

Библиографический список

1. Лебедев А.А. Введение в анализ и синтез систем: Учебное пособие - М.: Изд-во МАИ, 2001. – 352 с.
2. Основы синтеза систем летательных аппаратов / Под ред. А.А. Лебедева, - М.: Изд-во МАИ, 1996. – 443 с.
3. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов / Под ред. М.Н Красильщикова, В.В. Малышева. - М.: Альянс, 2013. – 468 с.
4. Заковряшин А.И. Особенности интеллектуальной поддержки принятия решений // Труды МАИ, 2012, №61: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35525>
5. Попель О.С. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии // Энергосбережение. 2006. № 3. С. 21-30.

6. Единый Государственный Фонд Данных, ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.meteo.ru (дата обращения: 13.04.2016).
7. Бобронников В.Т. Математическая модель автономной ветроэнергетической системы с учетом характеристик ветра как коррелированного случайного процесса // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. №. 5. С. 114–125.
8. Абрамова Т.С., Бобронников В.Т., Кадочникова А.Р. Векторная модель ветра для анализа эффективности автономных ветроэнергетических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. №. 3. С 80-87.
9. Bobronnikov V., Abramova T. Efficiency analysis of a small isolated wind energy generation system taking into account characteristics of a wind as time-correlated random process // Conference proceedings of International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. 2014. Vol. 1. P. 149-156.
10. Bagen. Reliability and Cost/Worth Evaluation of Generating Systems Utilizing Wind and Solar Energy // PhD thesis, University of Saskatchewan. – 2005. – 253 pp.