

- лов В.Б., Мостовяк И.В. Определение величины межзарядного пробега гибридных электромобилей с солнечной батареей // *Відновлювана енергетика*. – 2007. – №2. – С. 27–30.
2. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Юрченко О.Н. Гибридный электромобиль // *Технічні термодинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність"*. – Київ, 2002. – Ч. 2. – С. 21–28.
3. *Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії* / Кудря С.О. – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України ("КПІ"), 2011. – 495 с.
4. *Справочник по климату СССР*, выпуск 10, Украинская ССР, часть 1, "Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние". – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 124 с.
5. *ГОСТ 28133-89* Батареи аккумуляторные свинцовые тяговые. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
6. *Електронний ресурс, джерело доступу* [www.mitsubishielectricsolar.com](http://www.mitsubishielectricsolar.com)
7. Будько В.І., Кудря С.О., Головка В.М., Павлов В.Б. Підвищення ефективності акумулювання енергії вітру в автономних системах // *Відновлювана енергетика*. – 2009. – №2. – С. 25–31.

УДК 621. 311

**С.В.Губин**, канд.техн.наук, **М.Г.Гонтарь** (Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Харьков)

### **Постановка задачи комплексирования нетрадиционной энергетической установки для электроснабжения автономного объекта**

*В статье перечислены сферы применения и актуальность выбора ветро-солнечной энергетической установки. Рассмотрен комплексный подход описания сложных энергетических систем (ЭС). Проведен анализ характеристик элементов ЭС, на основании которого составлена математическая модель установки в общем виде.*

*У статті перераховані сфери застосування та актуальність вибору вітро-сонячної енергетичної установки. Розглянуто комплексний підхід опису складних енергетичних систем (ЕС). Проведено аналіз характеристик елементів ЕС, на основі якого складена математична модель установки в загальному вигляді.*

**Введение.** Для большинства технических систем необходимо создание автономного энергетического комплекса, который бы в полной мере обеспечил работу объекта. Поэтому проектирование системы электроснабжения напрямую зависит от потребителя. Будем рассматривать отдаленных автономных потребителей, которые не включены в общегосударственную энергетическую систему: места отдыха, прежде всего, сезонного, лечебные учреждения, локальные складские и производственные сооружения, неподготовленные и временные стройплощадки, фермерские хозяйства, частные дома, коттеджи, станции сотовой связи, пункты метеорологического и дорожно-транспортного мониторинга и т.д. Из существующего разнообразия объектов, требующих систем автономного энергообеспечения, особый интерес представляют базовые станции сотовой связи. Выбор обусловлен тем, что сотовая связь по масштабам и темпам роста объемов применения находится в числе мировых лидеров, и очевидно, что в обозримом будущем развитие этой технология будет ещё долго оставаться таким же бурным. Основанием этому является дальнейшее увеличение мощности радиосигнала на станциях сотовой связи и повышение вследствие этого её качества и эффективности при неуклонном снижении издержек и цен на различные услуги связи для массового потребителя.

В то же время расширение масштабов сотовой связи ставит перед этой сферой новые задачи, для эффективного решения которых необходимо применить принципиально иные организационные и технологические подходы. В частности, сейчас становится всё более очевидным, что в первую очередь это касается энергетического обеспечения станций сотовой связи. До сих пор наиболее интенсивное развитие сотовой связи

© С.В.Губин, М.Г.Гонтарь, 2014

происходило и происходит преимущественно в регионах с большой плотностью населения, высоко развитой инфраструктурой электрообеспечения и транспортной сетью. Здесь вопросы энергообеспечения базовых станций решаются очень просто – присоединением к электросети общего пользования с применением источника бесперебойного питания.

Как правило, большинство отдаленных объектов подключено к линии электропередач (ЛЭП). Но даже для этих случаев все чаще задача энергообеспечения базовых станций сотовой связи осложняется удалённостью их от ЛЭП и распределительных трансформаторных подстанций. В подобных случаях заказчики строительства базовых станций сотовой связи пока всё ещё ориентируются на подключение к электросетям общего пользования, хотя при этом приходится прокладывать низковольтные ЛЭП протяжённостью до 10-15 км и более. Поставка электроэнергии из национальной энергосистемы маломощным потребителям для поставщика является убыточной, если протяжённость низковольтных ЛЭП превышает 4-7 км [5].

Комбинированные энергетические системы на основе комплекса возобновляемых источников энергии с использованием аккумуляторов энергии позволяют наиболее полно реализовать преимущества каждого возобновляемого источника энергии, входящего в комплекс. При этом длительный срок могут работать автономно, в отличие, например, от дизельных или бензиновых электрогенераторов (ДЭГ и БЭГ). Комплексный подход к использованию возобновляемых источников и аккумуляторов энергии обеспечивает максимальное использование ресурса энергетических установок в автономной наземной энергетике. Необходимость комбинирования во многом вызвана различной периодичностью действия возобновляемых источников энергии и различной эффективностью ее накопления. В состав комбинированной системы (рис. 1) входят ветровые электрогенерирующие установки (ВЭУ), фотоэлектрические батареи (БФ) и электрохимические аккумуляторы (БХ). В редких случаях эти системы в качестве резервного источника генерирования электричества могут комплектоваться

ещё ДЭГ или БЭГ для обеспечения высокой степени гарантированного энергоснабжения.

По выработке энергии: ветроагрегат – импульсный, более мощный и менее длительного действия, а солнечные батареи – более стабильный вклад, но с временным ограничением (летом – в течение 10-12 часов, зимой – около 6 часов).

Использование ветроэлектрических и солнечных установок для электропитания автономных удаленных потребителей позволяет экономить органическое топливо, сокращает транспортные расходы на его доставку, уменьшает капитальные расходы на строительство линий электропередач, уменьшает отрицательное воздействие на окружающую среду [2].

Задачей работы является формализация принципов построения комплексных систем автономного энергоснабжения, позволяющих варьировать количеством и мощностью их составных единиц (ВЭУ, БФ, ДЭГ, БХ) таким образом, чтобы всегда можно было минимизировать удельную стоимость энергии при различных метеоусловиях и максимуме коэффициента готовности.

Решение поставленной задачи базируется на комплексном использовании энергии. Комплексование состоит в синтезе системы, которая должна обеспечить автономность, высокую суммарную производительность и надежность. В целом комплексная установка позволит сократить или ликвидировать потребление дизельного топлива, минимизировать расходы на сервисное обслуживание, улучшить санитарную и экологическую ситуацию в местах работы такой энергосистемы.

**Принцип решения задачи с привлечением комплекса методов и алгоритмов.** Одной из главных задач этапа предварительного проектирования многих объектов является обоснование структуры и параметров его ЭС, осуществляющей получение, преобразование и распределение энергомассовых потоков в рамках технической системы.

Основными факторами, определяющими целесообразность выбора той или иной ЭС, являются предполагаемые условия функционирования объекта и требования, предъявляемые к нему системой более высокого иерархического уровня. Анализ этих факторов частично ограничивает

множество принципиально возможных вариантов построения ЭС, но не решает задачу выбора наилучшей альтернативы из числа конкурирующих. Корректное решение этой задачи может быть реализовано при учете взаимного влияния и взаимодействия всех элементов и подсистем ЭС и требует разработки специальной методики комплексной оптимизации структуры и параметров объекта проектирования.



Рис. 1. Общий вид ветро-солнечной ЭС и потребителя.

Системотехнический анализ ЭС показывает, что она является сложной технической системой и характеризуется:

- разнообразием предъявляемых к ней функциональных требований, которые заключаются в необходимости обеспечения внешних потребителей множеством качественно разных материальных потоков (МП);
- многообразием и сложностью режимов функционирования, в ходе которых осуществляется целенаправленное получение, преобразование и распределение МП;
- сложностью и неоднородностью состава, что является следствием разнообразия функциональных требований;
- обилием взаимосвязей между элементами, обусловленных наличием в системе большого числа потоков различной природы;
- многообразием принципиально возможных вариантов построения ЭС.

Горизонтальная обособленность проявляется в том, что система представлена независимо работающими ВЭУ и БФ (таблица 1). Что касается аккумуляторной батареи, то на её параметры влияет выработка ВЭУ и БФ. Следовательно, при

проверке на целостность нижнего уровня БХ не может находиться на одном уровне с источниками энергии.

Таблица 1. Основные свойства, присущие рассматриваемой ЭС

Общие свойства ЭС	Структура	Динамика
Физическая Искусственная Малой сложности Дискретная Динамическая	Иерархическая упорядоченность (модульный принцип построения) Вертикальная целостность Горизонтальная обособленность	Стабильность Адаптивность Инерционность

Одним из способов уменьшения структурно-функциональной сложности объекта является метод декомпозиции. Он заключается в разбиении сложной системы на ряд подсистем по функциональному признаку, а нарушенные связи заменяются рядом ограничений. Далее оптимизируются структура и параметры отдельных подсистем, а затем полученные решения определенным образом координируются. Недостатком метода является то, что удается получить, как правило, только допустимое решение, которое может оказаться неоптимальным для всей ЭС. За счет использования математических моделей подсистем, которые оказываются упрощенными, главные проблемы переносятся на координацию полученных оптимальных решений для подсистем.

Учет неопределенности исходной информации значительно усложняет задачу проектирования. Оптимизация ЭС при замене заданных параметров их средними значениями (математическими ожиданиями) может привести к ошибкам, а замена их экстремальными (максимальными или минимальными) параметрами приведет к увеличению затрат, связанных с реализацией системы.

Моделирование функционирования ЭС связано с анализом трех множеств: элементы, взаимосвязи между ними (потоки ЭС) и режимы функционирования ЭС. Сложность анализа работы ЭС обусловлена большой разностью этих множеств. Поэтому методика комплексной оптимизации не должна содержать ограничений на

разность множеств [4]. Методика состоит из следующих этапов:

1. Содержательная постановка задачи выбора рациональной структуры и параметров ЭС, в результате которой формируется цель функционирования ЭС.

2. Анализ и декомпозиция цели функционирования, заканчивающаяся формированием функциональных требований к ее подсистемам и элементам.

3. Анализ способов и средств удовлетворения предъявленным требованиям, результатом которого является формирование элементной базы ЭС.

4. Формализация функциональных требований к ЭС, которая необходима для реализации математических методов исследования.

5. Построение структурно-поточной схемы функционирования ЭС (схемы обеспечения внешних потребителей материальными потоками).

6. Формирование математической модели функционирования (модели целенаправленного получения, преобразования и распределения МП).

7. Классификация информации, необходимой для исследования математической модели, выявление и сбор недостающей информации.

8. Определение показателей качества ЭС и критерия оптимизации.

9. Математическая формулировка задачи оптимизации структуры и параметров ЭС.

10. Выбор математических методов решения задачи оптимизации.

11. Решение задачи оптимизации.

12. Анализ полученных результатов и выработка практических рекомендаций.

Применение методов декомпозиции приводит к тому, что единая задача оптимизации режима энергосистем распадается на ряд отдельных подзадач, решаемых в разное время на разных иерархических уровнях. Выработка рекомендаций по ведению режима энергосистем производится на основе решения этих подзадач и занимает значительное время.

Как правило, комплекс составляется из основного алгоритма, обеспечивающего приближенное решение задачи, и дополнительных, при-

влекаемых для уточнения решения. В качестве основного выбирается алгоритм оптимизации режима по максимуму коэффициента готовности. При этом накладываются ограничения на выходные параметры ЭС:

- обеспечение потребителя требуемой мощностью  $P$ , кВт. Для базовой станции сотовой связи  $P = 5$  кВт;

- качество электроэнергии (поддержание стабильного напряжения 48 В).

Это объясняется тем, что для большинства видов расчетов в качестве исходной информации используются активные нагрузки ЭС, сведения о составе работающих агрегатов и другие данные, определяемые в результате применения этого алгоритма. Кроме того, расчеты активной мощности выполняются сравнительно быстро и дают решения, близкие к оптимальным. Хотя в результате привлечения дополнительных алгоритмов эти решения могут измениться, они обычно являются хорошим начальным приближением, использование которого ускоряет расчеты.

Уточнив условия задачи учетом ежегодного проведения профилактических и ремонтных работ, вызывающих планируемые простои в работе всей ЭС или определенных источников энергии, можно обнаружить нехватку резервной мощности. Уточненную задачу будем решать на интервале в один год, сопоставляя располагаемую мощность ЭС с годовым графиком месячных максимумов нагрузки.

Показатель готовности к работе энергосистем служит для оценки полноты и длительности использования оборудования в целях электроснабжения, уровня эксплуатации энергооборудования и эффективности проведенного на нем ремонта, а также характеризует степень совершенства и качества техники. Коэффициент готовности ( $K_G$ ) определяется через отношение отпущенной энергосистемой электроэнергии к общей ее потребности:

$$K_G = \frac{T_{\text{раб}} - T_{\text{рем}}}{T_{\text{раб}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{раб}}$  – календарный отрезок времени, на который планируется готовность оборудования к

работе, ч;  $T_{рем}$  – планируемая (фактическая) продолжительность всех ремонтов в течение рассматриваемого периода, ч.

Также коэффициент готовности к работе может определяться так:

$$K_G = \frac{P_{ЭС} - \Delta P_{ЭС}}{P_{ЭС}}, \quad (2)$$

где  $P_{ЭС}$  – годовая потребность в электроэнергии, Вт;  $\Delta P_{ЭС}$  – математическое ожидание недоотпуска электроэнергии за год вследствие дефицита мощности, Вт. Нормативное минимальное значение  $K_G = 0,999$ .

Взаимодействие программ организовано таким образом, чтобы возложить наибольшую часть работы на более простой и быстро работающий алгоритм оптимизации. С этой целью процесс оптимизации подразделяется на два этапа.

На первом этапе производится оптимизация режима только по максимуму коэффициента готовности. На этом этапе учитываются ограничения по активным мощностям, выбирается оптимальный состав агрегатов и т.д., т.е. решаются все вопросы, требующие многократного пересчета режима. Как правило, найденное на этом этапе распределение активных мощностей между энергообъектами и выбранный состав работающих агрегатов близки к оптимальному. Некоторые неточности вызваны главным образом зависимостью относительных приростов потерь активной мощности от режима ЭС (напряжения, мощности, КПД).

В связи с этим задачей второго этапа является дооптимизация (уточнение) решения, найденного на первом этапе путем оптимизации режима по всем переменным. Одновременно на этом этапе определяются оптимальные значения переменных, характеризующих режим работы ЭС. В соответствии со сказанным выше, дооптимизация необходима лишь для некоторых моментов времени (часов). В случае если дооптимизация вызывает существенное отклонение коэффициента готовности объектов от найденных на первом этапе, принципиально возможна новая оптимизация для максимума коэффициента готовности по активной мощности для уточнения оптимального состава работающих агрегатов и режима ЭС с

последующей дооптимизацией.

Комплексная оптимизация по всем переменным в два этапа, согласно описанным принципам, требует в десятки раз меньшего времени для расчета, чем комплексная оптимизация для всей ЭС в один прием, при практически одинаковой точности решения. Уменьшается до приемлемых размеров и объем исходной информации [3].

Важным этапом в исследовании сложных систем является идентификация параметров построенной модели. Он играет ключевую роль при оценке адекватности модели по отношению к реальной системе. Некоторые параметры рассматриваемых систем плохо формализованы с точки зрения реальных процессов. Задача усложняется невозможностью одновременного наблюдения за всеми компонентами системы во всех диапазонах их изменения, разобщенностью экспериментальных данных и повышенной требовательностью к вычислительным ресурсам для проведения компьютерного эксперимента. Для систем, состоящих из множества элементов, приходится строить модель не только всей системы, но и модели отдельных элементов. Процесс функционирования сложной системы представим в виде определенного алгоритма, реализуемого на ЭВМ; суть такого подхода используется при разработке имитаторов. Как и для аналитического подхода, разработка модели-имитатора ведется с использованием некоторой совокупности гипотез. Имитационный подход позволяет максимально использовать всю имеющуюся в распоряжении исследователя информацию о системе. Работа с имитатором представляет собой вычислительный эксперимент, осуществляемый на ЭВМ, который во многом сродни эксперименту с реальной системой [1].

**Анализ параметров энергетической системы.** При достаточно глубоком знании поведения реальной системы и правильном представлении в имитаторе феноменологической информации имитаторы характеризуются большей близостью к реальной системе, чем аналитические и численные модели. В значительной степени такая близость обусловлена блочным принципом

построения имитатора, который позволяет выполнять верификацию каждого блока до его включения в общую модель, а также благодаря тому, что имитатор может включать зависимости более сложного характера, которые трудно (а иногда невозможно) учесть с помощью математических соотношений.

Будем рассматривать 3 вертикальных уровня:

- потребитель;
- центральная шина (ЦШ), БХ;
- источники энергии (ВЭУ, БФ).

Работу системы и взаимосвязь между ее элементами можно представить в виде структурной схемы (рис. 2). Источники энергии соединяются параллельно при помощи центральной шины. На шину от ВЭУ и БФ через широтно-импульсный модулятор (ШИМ) подается постоянный ток. Напряжение на ЦШ соответствует максимальному зарядному напряжению БХ, равному 55 В, что позволит обойтись без зарядно-разрядного устройства. Стабилизатор обеспечит потребителя требуемым напряжением.

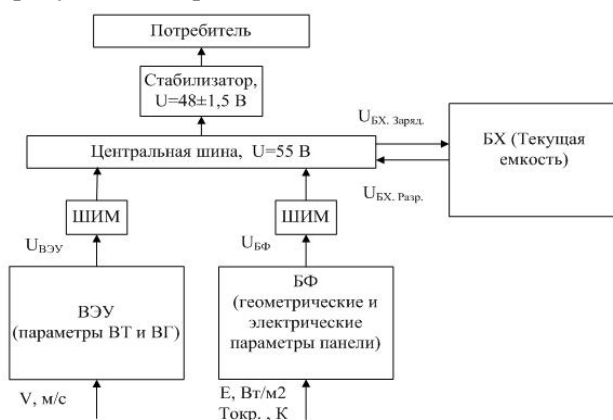


Рис. 2. Структурная схема ЭС.

Проведение имитационных экспериментов с моделями сложных систем существенным образом зависит от инструментальных средств, используемых для моделирования, то есть, от набора аппаратно-программных средств. В общем виде описание работы ветро-солнечной системы имеет вид:

$$\begin{cases} U_{ВЭУ} = f(R_{BT}, \rho, V, C_m, C_p, \varphi, \omega); \\ U_{БФ} = f(E_k, T, U_{xx}, I_{кз}, S, \eta, dUt, dIt); \\ U_{БХ} = f(Q, t, I, E_0, U_r), \end{cases} \quad (3)$$

где  $U_{ВЭУ}$  – напряжение ветрогенератора, В;  $U_{БФ}$  – напряжение батареи фотоэлектрической, В;  $U_{БХ}$  –

напряжение батареи химической, В;  $R_{BT}$  – радиус ветроколеса, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $C_m$  – коэффициент момента;  $C_p$  – коэффициент мощности;  $\varphi$  – угол атаки, °;  $\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>;  $E_k$  – среднемесячное дневное суммарное количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность приемника солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $T$  – температура батареи, °С;  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода, В;  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания, А;  $S$  – площадь батареи, м<sup>2</sup>;  $\eta$  – КПД фотопреобразователя;  $dUt$  – температурный коэффициент напряжения, В/°С;  $dIt$  – температурный коэффициент тока, А/°С;  $Q$  – ёмкость батареи, А·ч;  $t$  – время заряда (разряда), ч;  $I$  – ток заряда (разряда) батареи, А;  $E_0$  – ЭДС заряженного аккумулятора, В;  $U_r$  – падение напряжения на полном внутреннем сопротивлении, Ом.

$$T = f(c, m, t, E_k, S, T_{окр}, \alpha, \varepsilon, \sigma, k_{зан}), \quad (4)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала панели БФ, Дж/кг·К;  $m$  – удельная масса панели, кг/м<sup>2</sup>;  $T_{окр}$  – температура окружающей среды;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\varepsilon$  – интегральный коэффициент излучения лицевой поверхности панели БФ;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;  $k_{зан}$  – коэффициент заполнения панели БФ фотоэлектрическими преобразователями.

Модульный принцип построения систем энергообеспечения станций сотовой связи позволит минимизировать капитальные затраты на их сооружение во всех климатических зонах. В зависимости от климатических условий, с учётом уровня цен на ВЭУ и БФ и прогнозных показателей по производству ими электрической энергии, доля электроэнергии, выработанной ВЭУ в составе гибридных систем ВЭУ+БФ, может составлять в пределах 30-100%, а выработанной БФ – соответственно 0-70%.

Учитывая, что наиболее часто среднегодовые электрические нагрузки систем энергообеспечения базовых станций сотовой связи в различных климатических зонах Земли в настоящее время составляют 4-7 кВт (иногда и 10 кВт), а в перспективе эти нагрузки будут превышать 10 кВт, модульные гибридные системы типа ВЭУ+БФ должны комплектоваться ВЭУ единичной мощ-

ностью в 3,0; 10,0 и 20 кВт, а БФ мощностью 3-20 кВт с системами слежения за положением Солнца [5].

Значения показателей качества, характеризующие свойства электрической энергии, установленные ГОСТ 13109-97, не должны выходить за нормальные допустимые значения в течение 95% времени каждых суток и не должны выходить за предельно допустимые значения в течение 5% времени суток.

Таким образом, разработанная модель должна позволять отслеживать движение МП по системе, накопление или передачу между элементами ЭС. Для этого необходимо учесть в описании систему управления всей установки, а при разработке модели каждого элемента – обеспечить его чувствительность к изменениям во всей системе (применительно к БХ). Ответить на вопросы: будет недостаток или переизбыток мощности, и при каких обстоятельствах. В зависимости от расположения установки и мощностных характеристик каждого источника возможны оба варианта, но в разное время года. Следовательно, модель должна позволить подобрать оптимальные параметры  $K_T$  с ограничением по мощности и стоимости ЭС для обеспечения автономности, а также для поддержания качества электроэнергии для питания электроники потребителя. Для оценки эффективности следует рассмотреть разные режимы работы ЭС в зависимости от погодных условий: штиль и

пасмурно или, наоборот, энергоприход максимальный.

**Выводы.** 1. В ходе выполнения данной работы были определены основные факторы, то есть, предполагаемые условия функционирования объекта, влияющие на целесообразность выбора той или иной ЭС и состава оборудования для обеспечения электрической энергией отдаленных автономных потребителей с высоким  $K_T$ , которые не включены в общегосударственную энергетическую систему.

2. Проведен анализ параметров элементов системы и методов расчета комплексной ЭС.

3. Также введены зависимости для разработки модели ЭС с помощью программы-имитатора.

1. Романов В.Н. Системный анализ для инженеров. – СПб: СЗГЗТУ – 2002. – 186 с.

2. Безручко К.В., Губин С.В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии / – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2007. – 310 с.

3. Горништейн В.М., Мирошниченко М.П., Пономарев А.В. Методы оптимизации режимов энергосистем. – М. Энергия, 1981. – 336 с.

4. Тимашев С.В., Кузьмин М.А., Чилин Ю.Н. Оптимизация энергетических систем орбитальных пилотируемых станций. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.

5. Миханюк В.Н., Коробко Б.П., Марончук И.Е., Кулюткина Т.Ф., Люшня А.А. О комплектовании базовых станций сотовой связи системами автономного электрообеспечения. – ООО НПО "ПланЭКО". – 35 с.