

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С НЕТРАДИЦИОННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

В.С. Симанков, П.Ю. Бучацкий, А.В. Шопин

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Майкопский государственный технологический институт, Майкоп

В статье предлагается методология решения проблемы исследования и многокритериальной оптимизации энергетических комплексов (ЭК) с нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии (НВИЭ) различной природы с учетом неопределенности исходной информации. Приводится общий алгоритм решения задачи проектирования систем энергоснабжения с НВИЭ, а также математическая модель выбора рационального варианта с использованием теории нечетких множеств.

В соответствии с прогнозом [1] величина потребления энергии в мире к 2010 году возрастет на 40-50% по сравнению с 1995 годом. Это требует решения целого комплекса проблем: загрязнения окружающей среды, истощения ископаемых ресурсов, возможности аварий атомных электростанций. Традиционные источники энергии (нефть, природный газ, твердое топливо) расходуются в 100000 раз быстрее, чем формируются и могут быть исчерпаны в обозримом будущем. Так, уменьшение на 1% энергопотребления сохраняет около 55 миллионов баррелей нефти в год, стоимость \$1 миллиард [2]. Природный газ используется в эквиваленте 35 миллионов баррелей нефти каждый день и его потребление растет быстрее, чем любого другого энергоресурса.

В этих условиях все большее внимание привлекают Нетрадиционные Возобновляемые Источники Энергии (НВИЭ), являющиеся значительно экологически чище традиционных. Достаточно интенсивно осваивается солнечная, ветровая, геотермальная энергия. Развивается биоэнергетика. Начинается освоение энергии волн и приливов, энергии температурных перепадов между глубинными и поверхностными слоями воды в экваториальной части океана. Доля НВИЭ в общем энергетическом балансе к 2010 году [1] будет составлять около 18%, а вклад каждого из них связан с уровнем освоения технологии их использования.

Наиболее перспективными источниками для получения электроэнергии в настоящее время представляется энергия солнца и ветра. При десятипроцентном коэффициенте полезного действия энергосистем, использующих энергию Солнца, размещение их на 1% площади США дало бы получение энергии эквивалентной потребляемой всей страной, а использование энергии ветра позволит заместить до 20% потребности США [3, 4, 5].

Повышение эффективности энергетических комплексов с НВИЭ возможно за счет создания новых технологий и конструкций, совмещения двух или более источников (комбинированных систем), создание систем оптимального проектирования и управления ими.

Современный энергетический комплекс (ЭК) с НВИЭ является сложной системой кибернетического типа, обладает многими свойствами нестационарных систем, связанных с распределенностью структуры, многомерностью и неопределенностью параметров, определяющих состояние и условия функционирования комплекса. Проектирование таких систем приходится решать в условиях нечетко очерченных целей и ограничений, неточных и неопределенных данных, а так же нечеткости задания приоритета отдельных критериев [6, 7].

По свойству достоверности информации о параметрах проектируемого энергетического комплекса может быть принята следующая классификация [6]:

- а) детерминированная полная информация, делающая знания о событиях практически точными и имеющими минимальную дисперсию;
- б) вероятностная полная информация, при которой могут быть определены вероятностные характеристики (закон распределения, математическое ожидание, дисперсия и т.д.) с практически допустимыми погрешностями;
- в) детерминированная нечеткая информация, однозначно не определяемая конкретной детерминированной величиной, а задаваемая семейством ее возможных значений;
- г) вероятностная нечеткая информация, когда в исходных данных отсутствуют сведения о законе вероятностного распределения и они задаются с большой погрешностью своими предельными значениями.

При проектировании энергетических комплексов с НВИЭ в различной мере присутствуют все типы указанных выше информационных данных. При этом по степени достоверности одна и та же информация в различных задачах может представляться различным образом. В том случае, если при проектировании неопределенность игнорируется и используется детерминированный подход, решения могут быть малоэффективны, а иногда и ошибочны.

В задачах исследовательского характера применяются вероятностные методы, что целесообразно, когда неопределенные события и процессы обладают свойством статистической устойчивости и реально подчиняются вероятностным законам. Однако целый ряд параметров систем энергоснабжения не имеют фиксированных значений и не несут вероятностных описаний (изменение нагрузок, показатели надежности, ущербы народному хозяйству).

Основной характеристикой неопределенных факторов является интервал их измерения, дополненный обоснованными допущениями о достоверности различных значений неопределенных факторов (выделение более или менее ожидаемых подынтервалов). Это позволяет раскрыть отчасти неопределенность на основе опыта, знания и интуиции квалифицированных специалистов на основе вероятностно-нечеткого подхода.

Системы энергоснабжения с НВИЭ характеризуются целым рядом признаков и свойств, отражающими взаимодействие элементов с внешними и внутренними связями, значительная часть которых не точно поддается денежному выражению, а ряд и количественному определению. Отсюда следует, что энергетические комплексы с НВИЭ являются многоцелевыми по своей природе, а их оптимизация должна проводиться по совокупности критериев эффективности на основе задачи принятия решений по многим критериям, что требует применения специальных математических методов, учитывающих специфику задачи - это совместное применение теории нечетких множеств, экспертных оценок и векторной оптимизации [7].

Таким образом, исследование и оптимизация энергетических комплексов (ЭК), использующих совокупность нетрадиционных возобновляемых источников энергии различной природы представляет собой сложную проблему, вследствие необходимости учета неопределенности исходной информации и ее многокритериальности. Непосредственное исследование таких систем путем организации натурного эксперимента связано со значительными трудностями и материальными затратами. Поэтому основным инструментом изучения ЭК и процессов, протекающих в них, является моделирование, которое позволяет рассматривать большое число альтернативных вариантов, совершенствовать процесс принятия решений и точнее прогнозировать их последствия.

При исследовании и оптимизации ЭК могут быть применены физические, математические и гибридные модели.

Физическая модель ЭК представляет собой аналоговую модель, в которой между параметрами объекта и модели одинаковой физической природы существует однозначное соответствие [8]. В этом случае элементом системы ставятся в соответствие физические эквиваленты, воспроизводящие структуру, основные свойства и соотношения изучаемого объекта. При физическом моделировании, основой которого является теория подобия, сохраняются особенности проведения эксперимента в натуре с соблюдением оптимального диапазона изменения соответствующих физических параметров.

Математической моделью ЭК [9] является система математических соотношений, описывающих изучаемый объект. Процессы поступления энергии от источников преобразования ее в генераторах и потребления энергии нагрузкой ставятся в соответствие математических эквивалент, имеющий входные и выходные параметры, обеспечивающие синтез системы в математическую модель.

В случае, когда аналитические способы описания модели отсутствуют или затруднены, используют имитационное моделирование [10] - проведение на ЭВМ численных экспериментов с математической моделью, описывающих поведение системы в течение периодов времени заданной продолжительности. Анализ и оптимизация ЭК обеспечивается проведением на ЭВМ численных экспериментов, описывающих функционирование системы. Вместе с тем, одной из важнейших характеристик математической модели ЭК является степень ее адекватности реальным процессам, которые в условиях высокой неопределенности исходной информации требует проведения детальных экспериментальных исследований. При ограниченной возможности проведения натурных экспериментов на ЭК для этой цели используются гибридные модели.

Гибридная модель ЭК [12] - модель, объединяющая математические и физические эквиваленты элементов ЭК с помощью ЭВМ и устройством связи в единый контур моделирования. Такое объединение позволяет создать более гибкую систему моделирования, сочетающую достоинства обоих методов.

В ряде случаев, когда элементы ЭК не имеют достаточного математического и физического эквивалента, в замкнутый контур моделирования для исследования системы в целом могут быть включены реальные объекты. Наряду с этим реально функционирующие АЭК могут быть дополнены математическими или физическими эквивалентами объектов, создание которых только предполагается.

Гибридные модели можно различать по отношению к масштабу времени моделирования и по способу воздействия на модель. В первом случае модели разделяются на модели, функционирующие в реальном масштабе, и модели, допускающие использование в любом техническом реализуемом режиме времени.

Во втором случае рассматривается взаимодействие различных частей гибридных моделей. Если математический эквивалент модели может менять состояние физического эквивалента, то модель будет считаться активной. В случае изменения математического эквивалента под воздействием только внешних условий, либо физического эквивалента, модель считаем пассивной.

Структурная схема гибридной модели, реализованная в НИЛ “Альтернативные системы” КубГТУ для гелио-ветро-волновых энергетических комплексов приведена на рис. 1.

Математическая постановка задачи выбора рационального варианта системы энергоснабжения с НВИЭ в терминах нечетких множеств представляется следующим образом. Пусть $A = \{a_j\}_{j=1}^n$ множество рассматриваемых вариантов, а $P = \{f_i(x)\}_{i=1}^s$ множество критериев эффективности систем энергоснабжения, по которым оценивается качество проектных решений. Критерии представляют собой скалярные функции $f_i(a, h_1, x_{11}, \dots, x_{1k}, \dots, x_{1g}), \dots, f_s(a, h_s, x_{s1}, \dots, x_{sg})$, в которых h_i - контролируемые параметры, $x_{ir}, i \in 1..s, r \in 1..g$ - неконтролируемые неопределенные параметры, описанные нечетко в форме нечетких подмножеств числовой оси $(x_{ik} | K_{ir}^j(x_{ir}))$, где $K_{ir}^j(x_{ir})$ - функция принадлежности нечетких множеств.

К контролируемым параметрам относятся технико-экономические характеристики элементов систем энергоснабжения (тип, количество, режим работы, стоимостные характеристики, установленная мощность и др.), к неконтролируемым параметрам нечеткого типа относятся показатели надежности элементов, инсоляция, ветровая нагрузка, удельные ущербы и т.п.

Нечеткие числовые параметры x_{ir} могут описываться либо дискретно, либо непрерывно.

Критерии эффективности ранжируются по возможности с использованием экспертных методов в виде нечеткого отношения $M: P * P \rightarrow [0, 1]$ (величина $M(P_i, P_j)$ принимается как степень, с которой критерий P_j считается не менее важным, чем критерий P_i).

Решение задачи выбора рационального варианта системы энергоснабжения осуществляется с помощью построения обобщенного отношения предпочтения между альтернативами с последующим выделением нечеткого подмножества недоминируемых вариантов.

При анализе метода принятия многокритериальных решений с учетом фактора неопределенности исходной информации и выборе метода для решения рассматриваемой задачи принималось во внимание условие универсальности метода, заключающееся в возможности его применения для различных уровней информационного обеспечения (определенности, риска, нечеткости и неопределенности) при условии ограничения объема привлекаемой экспертной информации. Одновременное выполнение указанных требований и другие положительные моменты послужили основой выбора для решения задачи оптимизации ЭК с НВИЭ математического аппарата теории нечетких множеств и теории возможностей.

Общий алгоритм решения задачи проектирования систем энергоснабжения объектов с НВИЭ состоит из следующих основных этапов:

а) формирование альтернативного множества оптимальных вариантов систем энергоснабжения при различных уровнях автономности подсистем электро- и теплоснабжения объекта с использованием теории нечетких множеств (подэтап предварительной оптимизации);

б) выбор рационального проектного решения из множества альтернативных вариантов с использованием концепции приведенных затрат (подэтап окончательно оптимизации).

В соответствии с методологией теории нечетких множеств и теории возможности задача принятия решения для рассматриваемого уровня автономности описывается множеством допустимых вариантов структур системы энергоснабжения $A = \{a_j\}_{j=1}^n$, определенными (стохастическими или нечеткими) описаниями критериев эффективности для каждого проектного варианта $Y(a_j, x_j, P)$, нечетким отношением важности критериев $M(P, P)$, основанным на экспертных оценках. В качестве критериев эффективности систем энергоснабжения рассматривается их совокупность, выбираемая на основе полной системы критериев эффективности ЭК с НВИЭ (рис. 2).

Алгоритм выбора рациональных технических решений на этапе предварительной оптимизации в зависимости от степени значимости критериев эффективности предполагает выполнение сравнения альтернатив с использованием обобщенного отношения предпочтения при неравнозначных критериях и через максимальное комбинирование областей недоминирования проектных альтернатив при равнозначных критериях.

Алгоритм этапа предварительной оптимизации систем энергоснабжения с НВИЭ состоит из следующей последовательности процедур:

- построение нечетких отношений нестрогого предпочтения вариантов по каждому показателю эффективности;
- определение нечеткого подмножества недоминирования вариантов при фиксированном критерии эффективности;
- построение матрицы индуцированного нечеткого отношения предпочтения на множестве исходных вариантов по всем рассматриваемым показателям эффективности;
- нахождение соответствующего индуцированного нечеткого подмножества недоминируемых вариантов проектных решений;
- выбор наиболее рационального проектного решения для рассматриваемых уровней автономности систем электро- и теплоснабжения и формирование множества альтернативных вариантов для дальнейшей оптимизации.

Построение нечетких отношений нестрогого предпочтения в классе нечетких функций критериев эффективности производится по следующему выражению [11]:

$$Y(a_i, a_j, P) = \sup_{\substack{z, y \in R^1 \\ z \leq y}} \{ Y(a_i, z) \wedge Y(a_j, y) \} \quad (1)$$

где $Y(a_i, z)$, $Y(a_j, y)$ - нечеткие описания значений критерия эффективности P соответственно для i -го и j -го варианта.

Алгоритмом задачи предусмотрена возможность определения нечеткого отношения нестрогого предпочтения проектных вариантов при ступенчатом и кусочно-линейном нечетком описании критериев эффективности, а также непосредственного задания матрицы нечеткого отношения нестрогого предпочтения.

Для детерминированных критериев эффективности отношение предпочтительности вариантов технических решений определяется нормированием их к минимальному значению:

$$Y(a_i, a_j, p) = \begin{cases} 1, & \text{если } f_i(a_i) \leq f_i(a_j); \\ \frac{f_i(a_j)}{f_i(a_i)}, & \text{если } f_i(a_i) > f_i(a_j); \end{cases} \quad (2)$$

где $f_i(a_i)$, $f_i(a_j)$ - детерминированные значения критериев эффективности p соответственно для i -го и j -го варианта.

Полученные нечеткие отношения нестрогого предпочтения позволяют выделить в множестве вариантов подмножество недоминируемых альтернатив по рассматриваемым критериям эффективности

$$Y^{H\partial}(a_i, p) = \inf_{i=1, \dots, n} [1 - Y^S(a_j, a_i, p)] = 1 - \sup_{a_i \in A} Y^S(a_j, a_i, p) \quad (3)$$

Матрицы нечеткого отношения строгого предпочтения имеют вид

$$Y^S(a_j, a_i, p) = \begin{cases} Y(a_j, a_i, p) - Y(a_i, a_j, p), & \text{если } Y(a_j, a_i, p) \geq Y(a_i, a_j, p) \\ 0, & \text{если } Y(a_j, a_i, p) < Y(a_i, a_j, p) \end{cases} \quad (4)$$

При выборе проектного решения по одному показателю эффективности наиболее рациональным признается вариант, достигший наибольшего значения функции принадлежности $Y^{H\partial}(a_i, p)$. Так как сравнение вариантов системы энергоснабжения предполагается проводить по нескольким признакам, найдем нечеткое отношение нестрогого предпочтения двух альтернатив по всей совокупности критериев эффективности. Матрица индуцированного нечеткого отношения предпочтения на множестве рассматриваемых вариантов по множеству показателей определяется по следующему выражению:

$$\eta(a_i, a_j) = \sup \min \{ Y^{H\partial}(a_i, p), Y^{H\partial}(a_j, p), M(p, p) \} \quad (5)$$

Выбор наиболее рационального проектного варианта (или некоторого ограничения подмножества вариантов) системы энергоснабжения при рассматриваемых уровнях автономности осуществляется на скорректированном множестве недоминирования:

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}^{H\partial}(a_i) &= 1 - \sup_{a_j \in A} \eta^3(a_j, a_i) = 1 - \sup_{a_j \in A} [\eta(a_j, a_i) - \eta(a_i, a_j)]; \\ \eta^{H\partial} &= \bigcap [\tilde{\eta}^{H\partial}(a_i), \eta(a_i, a_j)] = \min \{ \tilde{\eta}^{H\partial}(a_i), \eta(a_i, a_j) \}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$A^* \Rightarrow \max_{a_i \in A^{H\partial}} \eta^{H\partial}(a_i).$$

При равнозначности критериев выбор рационального варианта производится, опираясь на максимальную композицию областей недетерминирования по критериям эффективности

$$\begin{aligned} A^* \Rightarrow \max \{ \min [Y^{H\partial}(a_1, p_1), Y^{H\partial}(a_1, p_2), \dots, Y^{H\partial}(a_1, p_s)], \dots, \\ \min [Y^{H\partial}(a_n, p_1), Y^{H\partial}(a_n, p_2), \dots, Y^{H\partial}(a_n, p_s)]. \end{aligned} \quad (7)$$

В результате многократного прохождения процедур этапа предварительной оптимизации при различных уровнях автономности системы электро- и теплоснабжения формируется множество альтернативных вариантов проектных решений. Дальнейший выбор наиболее перспективного и экономически обоснованного варианта системы энергоснабжения производится минимизацией критерия суммарных приведенных затрат с учетом ущерба от недоотпуска энергии, экологических последствий применения традиционных источников энергии, приведенных затрат на систему централизованного энергоснабжения и положительного дополнительного эффекта от использования биоэнергетических установок (получение высококачественных удобрений, обеспечение экологической чистоты местности и т.п.) и паро-гидротермальных систем теплоснабжения (получение редких металлов).

В общем случае при различных уровнях автономности системы энергоснабжения суммарные приведенные затраты определяются по следующему выражению:

$$\begin{aligned} \zeta = & \hat{A}_f * \hat{E} + \hat{E} + \left(\frac{1 - \gamma_{\hat{f}}}{\gamma_{\hat{D}}} \right) * \hat{A}_{\hat{f}} * \hat{O}_{\hat{f}} + \left(\frac{1 - \gamma_{\hat{d}}}{\gamma_{\hat{D}}} \right) * \hat{A}_{\hat{d}} \hat{O}_{\hat{d}} + \hat{O}_0 \Delta W + \hat{A}_f \hat{E}_{\hat{N}} + \\ & + \hat{E}_{\hat{N}} + \hat{O}_{0\hat{N}} \Delta W_c + \left(\frac{1 - \gamma_{\hat{d}}}{\gamma_{\hat{D}}} \right) * \hat{A}_{\hat{d}} * (\hat{O}_{\hat{f}\hat{B}\hat{O}} * \hat{E}_{\hat{B}\hat{O}} + \hat{O}_{\hat{f}\hat{E}\hat{I}} * R_{\hat{E}\hat{I}} + \hat{O}_{\hat{f}\hat{E}\hat{I}} * R_{\hat{E}\hat{I}}) - (8) \\ & - \hat{Y}_{\hat{D}\hat{I}} - \hat{Y}_{\hat{A}\hat{E}\hat{I}}, \end{aligned}$$

где E_H - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K, И$ - капитальные вложения и эксплуатационные издержки в систему энергоснабжения с НВИЭ;

$K_C, И_C$ - капитальные вложения и эксплуатационные издержки в систему централизованного энергоснабжения сельскохозяйственного объекта;

$B_{\mathcal{E}}, B_T$ - замещенное годовое электро- и теплотребление объекта, т.у.т.:

$$\begin{aligned} B_{\mathcal{E}} &= 0.123 * 10^{-3} * \frac{\gamma_{\mathcal{E}}}{\eta_{\mathcal{E}}} * \mathcal{E}_{\mathcal{E}} \\ B_T &= 0.143 * \frac{\gamma_T}{\eta_T} * \mathcal{E}_T \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mathcal{E}_{\mathcal{E}}, \mathcal{E}_T$ - годовое электропотребление (в кВт*ч) и годовое теплотребление объекта (Гкал);

$\gamma_{\mathcal{E}}, \gamma_T$ - коэффициенты автономности систем электро- и теплоснабжения;

$\gamma_{\mathcal{E}\mathcal{P}}, \gamma_{T\mathcal{P}}$ - преобразованные коэффициенты автономности для определения суммарных замыкающих затрат базового варианта с использованием централизованного электро- и теплоснабжения;

$U_{\mathcal{E}}, U_T$ - удельные замыкающие затраты в систему централизованного электро- и теплоснабжения;

U_0, U_{0C} - удельный ущерб от недоотпуска энергии соответственно в системах местного (на НВИЭ) и централизованного энергоснабжения;

$\Delta W, \Delta W_C$ - недоотпуск энергии соответственно в системах местного и централизованного энергоснабжения вследствие аварийных отказов и плановых отключений:

$$\Delta W = (\mathcal{E}_{\mathcal{E}} + K * \mathcal{E}_T) \pi_H \quad (10)$$

где K - поправочный коэффициент;

π_H - относительная необеспеченность энергии;

$U_{\mathcal{E}KУ}, U_{\mathcal{E}KH}, U_{\mathcal{E}KP}$ - удельный экологический ущерб от применения традиционных видов топлива (угля, мазута, природного газа);

$K_{HУ}, K_{ИМ}, K_{ИП}$ - коэффициенты использования угля, мазута, природного газа в системе централизованного энергоснабжения;

$\mathcal{E}_{\mathcal{P}H}, \mathcal{E}_{\mathcal{B}ИО}$ - годовой положительный эффект от использования парогидротермальных систем теплоснабжения и биоэнергетических установок.

Для принятия окончательного решения множество альтернативных вариантов дополняется базовым вариантом системы энергоснабжения объекта от систем централизованного электро- и теплоснабжения.

Наиболее предпочтительным вариантом системы энергоснабжения считается вариант, обеспечивающий

$$A_0^* \Rightarrow \min_{a_i \in A_0^*} 3(a_i^*) \quad (11)$$

где A_0^* - множество альтернативных перспективных вариантов энергоснабжения, включая базовый вариант.

Предлагаемый подход реализован при разработке автономного гелио-ветро-биоэнергетического комплекса [13].

Литература

1. World Resources, 1990-1991, World Resources Institute, 1992.
2. Statistical Abstract of the United States: 1993, 113th edition, U.S. Department of Commerce, 1994.
3. Renewable Energy: A New National Commitment, Science Policy Research Division, Congressional Research Service, April 27, 1993.
4. Zweibel, Ken. Harnessing Solar Power, 1990.
5. По материалам *Renewable Energy Group* (head: Prof. G.T.Wrixon). Internet. <http://nmrc.ucc.ie/rem/solar.htm>. Multimedia System for Renewable Energy (REMS) впервые представлена на 13th Photovoltaic Solar Energy Conference.

6. *Пиковский А.А., Таратин В.А.* Техничко-экономические расчеты в энергетике в условиях неопределенности. - Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1981.
7. *Кини Р., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. - М.: Радио и связь, 1981. - 560 с.
8. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирования. - М.: Высшая школа, 1976. - 176 с.
9. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 1985. - 271 с.
10. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем - искусство и наука. - М.: Мир, 1978. - 301 с.
11. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. - М., Наука, 1981.
12. *Симанков В.С., Зангиев Т.Т., Тыщенко В.Ю.* Имитационное моделирование при исследовании и проектировании энергетических комплексов с нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии // Моделирование электроэнергетических систем. - Рига, 1987.
13. *Симанков В.С., Лыжко В.М.* Патент №1777641 на изобретение: "Установка автономного энергоснабжения".

Methodology of modeling the physical processes in energy complexes with nontraditional energy sources and the optimization of their parameters

V.S. Symankov, P.Yu. Buchatski, A.V. Shopin

In the article the authors suggest the methodology of solving the problem of researching and the multicriterion optimization of energy complexes (EC) with nontraditional renewal energy sources of different nature in consideration of uncertainty of initial information. The common algorithm is given for solving the problem of projecting the systems of energy supplying with nontraditional renewal energy sources, and also mathematical model of choice of rational alternative with using the theory of slipshod sets.