

УДК 004.032.26 + 338.27 + 004.896
ББК 31.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ С ИСТОЧНИКАМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Май Н. Т.¹, Ха В. М.², Камаев В. А.³, Щербаков М. В.⁴,
*(Волгоградский государственный технический
университет, Волгоград, Россия)*

Тхай Куанг Винь⁵
*(Институт информационной технологии, Ханой,
Вьетнам)*

Цель исследования заключается в минимизации потерь и затрат на потребление электроэнергии. Представлена интеллектуальная система управления процессом переключения между источниками энергии в реальном времени с учетом прогнозированных данных о потреблении и производстве электроэнергии. В качестве метода управления используется генетический алгоритм для формирования оптимальной стратегии покупки электроэнергии. Для обоснования предлагаемого подхода выполнены испытания на разработанной модели гибридной энергетической установки.

¹ Нгок Тханг Май, аспирант (Волгоград, пр. Ленина, д.65, тел. (8442) 24-81-00, mnthang464@mail.ru).

² Ван Муон Ха, студент (Волгоград, пр. Ленина, д.65, тел. (8442) 24-81-00, тmuon.ha@mail.ru).

³ Валерий Анатольевич Камаев, доктор технических наук, профессор (Волгоград, пр. Ленина, д.65, тел. (8442) 24-81-00, катаев@unix.cad.vstu.ru).

⁴ Максим Владимирович Щербаков, кандидат технических наук (Волгоград, пр. Ленина, д.65, тел. (8442) 24-81-00, vstu@gebeus.ru).

⁵ Куанг Винь Тхай, директор института информационной технологии (Ханой, Вьетнам, tqvinh@ioit.ac.vn).

Ключевые слова: гибриды, интеллектуальная энергосистема, источник возобновляемой энергии, нейронная сеть, прогноз, оптимизация, HRES.

1. Введение

Эффективное управление энергосистемами является важной задачей в энергетической политике многих стран в связи с глобальным потеплением и значительным увеличением цен на традиционные источники энергии. Однако управление энергопотоками в подобных системах является сложной задачей, так как зависит от различных факторов. Более того, процесс управления энергосистемой также как и выбор источника электроэнергии, должен осуществляться в режиме реального времени для обеспечения максимального баланса между поставщиком и потребителем.

В работе предлагается интеллектуальная гибридная энергосистема с источниками возобновляемой энергии, функционирование которой основано на прогнозе потребления и производства электроэнергии в системе. На основе модели энергосистемы можно формировать прогноз потребления, производства электроэнергии, а также вырабатывать оптимальную стратегию переключения между источниками электроэнергии в системе.

2. Интеллектуальная гибридная энергетическая система

2.1. СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Под интеллектуальной гибридной энергосистемой с источниками возобновляемой энергии будем понимать энергосистему, которая объединяет множество традиционных источников и источников возобновляемой энергии в единую энергосистему с применением устройств, реализующих интеллектуальные алгоритмы для управления компонентами системы.

В данной работе гибридная энергосистема, схема которой представлена на рис. 1, включает в себя следующие компоненты: солнечные панели (1); аккумуляторные батареи (АКБ) (2); контроллер заряда-разряда (3); метеостанция (4); цифровой счётчик электроэнергии (5, 6); двунаправленный инвертор (7) и интеллектуальный контроллер (8) для управления энергопотоками; сервер (9).

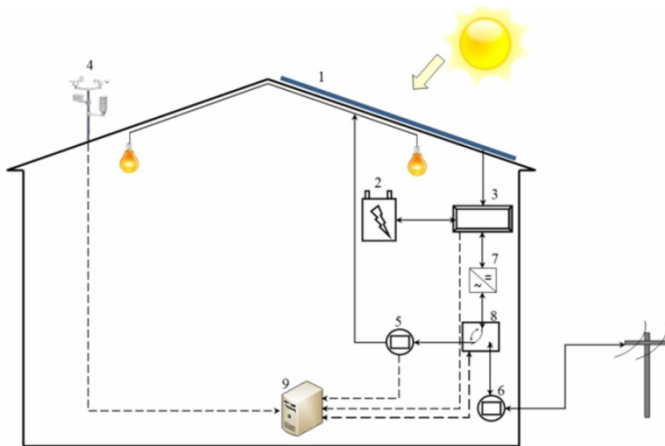


Рис. 1. Схема гибридной энергосистемы

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ

Внешняя электросеть. Внешняя электросеть подключается к системе при условии недостаточной мощности других источников (например, солнечных панелей), а батарейный блок уже разряжен до минимального значения (10%).

Солнечная панель (СП). Солнечная панель характеризуется номинальной мощностью. Номинальная мощность характеризует количество электроэнергии, которое может произвести фотоэлектрический модуль при оптимальных условиях. Номинальная мощность солнечной панели зависит от солнечного облучения и температуры на поверхности панели. Диаграмма зависимости номинальной мощности солнечной панели 100 Вт от солнечного облучения при условии, что

температура на поверхности панели равна 25 °С, представлена на рис. 2 [7].

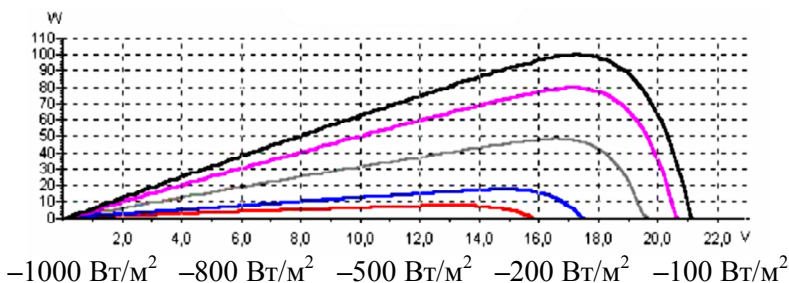


Рис. 2. Зависимость номинальной мощности солнечной панели от солнечного облучения

Мощность СП определяется по формуле [5]:

$$(1) P_{\text{солн}} = \begin{cases} P_{\text{СТ}} \frac{G_{\text{СИ}}}{G_{\text{СТ}}} (1 + \alpha(T_{\text{СП}} - T_{\text{СИ}})), & \text{если } G_{\text{СИ}} \geq C, \\ 0, & \text{если } G_{\text{СИ}} < C; \end{cases}$$

где $P_{\text{солн}}$ – мощность, вырабатываемая солнечной панелью (Вт);

$P_{\text{СТ}}$ – мощность солнечной панели в стандартных условиях (Standard Test Condition – STC), т.е. мощность солнечной радиации 1000 Вт/м², температура элементов – 25 °С и солнечный спектр на широте 45°) (Вт) [8];

$G_{\text{СИ}}$ – коэффициент солнечного излучения (лк);

$G_{\text{СТ}}$ – коэффициент солнечного излучения в стандартных условиях (лк);

α – температурный коэффициент (°С);

$T_{\text{СП}}$ – температура поверхности солнечной панели (°С);

$T_{\text{СИ}}$ – устанавливается равной 25 °С (температура – в стандартных условиях);

C – коэффициент производства энергии, который зависит от характеристики солнечной панели (безразмерный).

Блок аккумуляторных батарей (АКБ). АКБ обеспечивают запас электрической энергии, необходимой для электроснабжения потребителей в ночное время, в облачную погоду. Также обеспечивается компенсация пиковых нагрузок, которые не могут быть покрыты фотоэлектрическими

модулями. Кроме этого, АКБ выполняет роль стабилизатора напряжения на нагрузке, так как выходное напряжение СП в соответствии с его вольт-амперной характеристикой может изменяться в широких пределах. АКБ характеризуется степенью зарядки (SOC – Stage Of Charge). Во избежание снижения способности работы АКБ необходимо выполнять следующие условия:

- изменение степени зарядки в час не должно превышать 10% максимального значения;
- степени зарядки не должно быть меньше 10% максимального значения.

Контроллер заряда-разряда. Контроллер заряда-разряда – электронное устройство, которое защищает АКБ от чрезмерной зарядки и глубокой разрядки, что позволяет значительно продлить срок службы аккумулятора. Контроллер заряда-разряда обеспечивает защиту от коротких замыканий в нагрузке и от подключения АКБ обратной полярностью.

Метеостанция. Метеостанция (может быть цифровой) – комплекс для ежедневного мониторинга погоды, температуры, давления и влажности воздуха. В памяти метеостанции сохраняются данные о погоде за все время ее использования. Данные о погоде могут использоваться для прогнозирования производства электроэнергии солнечными панелями.

Цифровой счётчик электроэнергии. Цифровой счётчик электроэнергии применяется для мониторинга, а также статистических исследований, таких как вычисление средней мощности потребления нагрузки и ее дисперсии, хранения информации о накопленной энергии за произвольные промежутки времени. В экспериментах, рассмотренных в статье, используются многотарифные счетчики электроэнергии.

Двунравленный инвертор. Для преобразования постоянного тока, вырабатываемого солнечной батареей, в переменный ток синусоидальной формы необходим инвертор. Основными техническими характеристиками инвертора являются величина напряжения на входе и выходе, выходная частота и мощность. Качественный инвертор должен обеспечивать высокий КПД и стабилизацию выходного

напряжения, низкий коэффициент гармоник и способность выдерживать возможные перегрузки.

Переключатель (реле). Переключатель – механизм, управляемый контроллером и осуществляющий переключение энергетических потоков в соответствии с командами, поступающими от сервера.

Сервер. Сервер применяется для обработки и хранения данных из метеостанции и счётчика электроэнергии, прогнозирования потребления и производства электроэнергии в ближайшее время, а также форматирования стратегии покупки электроэнергии в зависимости от тарифного плана.

3. Построение модели интеллектуальной гибридной энергетической системы

В статье интеллектуальная гибридная энергетическая система моделируется в среде симуляции PVSOL. Среда PVSOL обеспечивает возможность построения гибридной энергетической системы, построения 3D-модели и моделирование с учетом реальных данных о погоде (температуры, коэффициента солнечного облучения, скорости ветра).

Объект моделирования – энергетическая система корпуса «В» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) в 2011 году. Входные данные моделирования – данные о погоде и о потреблении электроэнергии здания по часам. Данные о погоде измеряются метеостанцией «Волгоград первый». Выходные данные – стратегия покупки электроэнергии, представлена в виде массива из 24 элементов, соответствующих 24 часам в день. Значение элемента массива равно –1 при продаже электроэнергии из внешней сети; 0 при использовании собственной электроэнергии; 1 при покупке электроэнергии.

Модель корпуса «В» ВолгГТУ с установленной гибридной энергетической системой представлена на рис. 3.

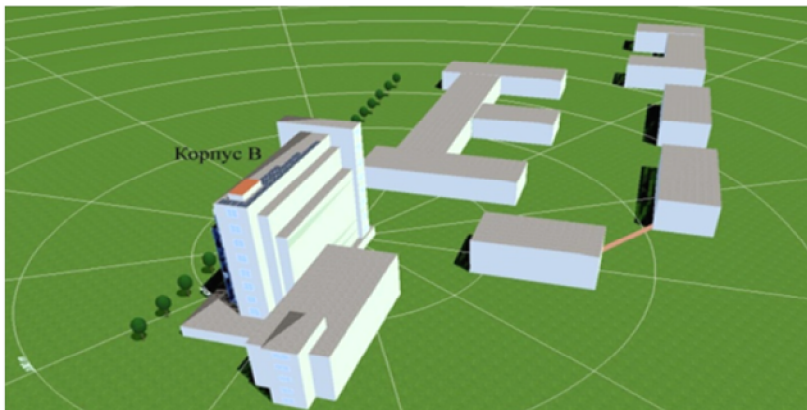


Рис. 3. Модель корпуса «В» ВолгГТУ

Производство электроэнергии солнечными панелями зависит от погодных условий. По данным о погоде можно определить место нахождения и угол наклона солнечных панелей, а также максимальную мощность производства электроэнергии. Диаграмма зависимости погодных условий (среднемесячной температуры воздуха, коэффициента солнечного облучения и скорости ветра) от времени в месте проведения испытания за каждый месяц 2011 года показана на рис. 4.

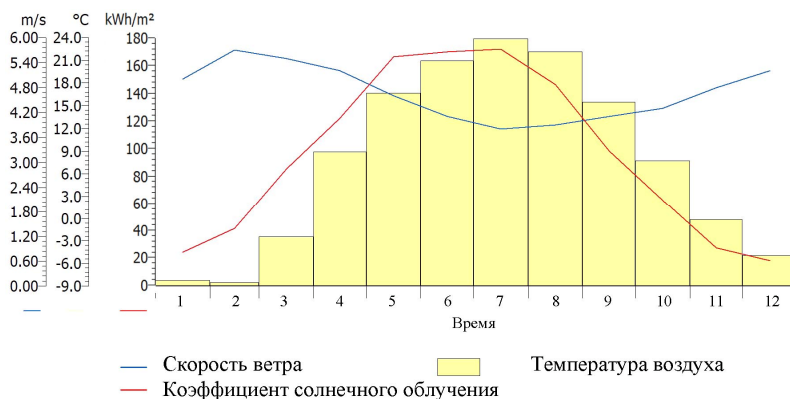


Рис. 4. Зависимость погодных условий от времени в 2011 году

По результатам анализа данных об электропотреблении в [2] предлагается, что:

– электропотребление в выходные и в праздничные дни меньше чем в рабочие дни (электропотребление в субботу равно 60%, а в воскресенье равно 10% среднего потребления рабочих дней);

– энергопотребление в промежутках времени с 9 до 11 часов и с 17 часов до 21 часа локально максимальное, и, соответственно, это пиковая цена электроэнергии.

Профиль моделируемого потребления электроэнергии корпуса «В» ВолгГТУ в 2011 году показан на рис. 5.

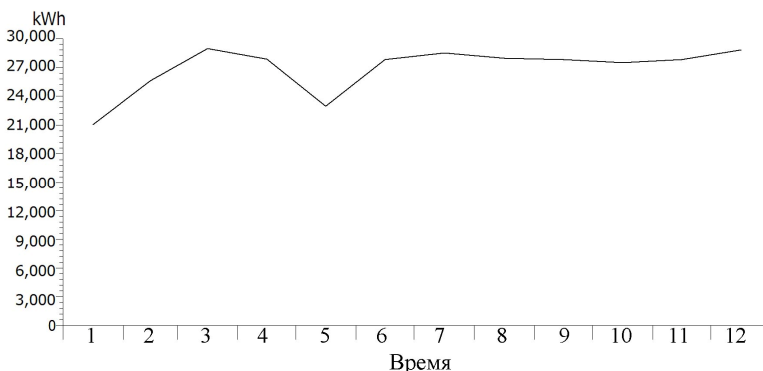


Рис. 5. Профиль потребления электроэнергии корпуса «В» ВолгГТУ за каждый месяц 2011 года

Выходные данные моделирования используются для прогнозирования электропотребления и производства электроэнергии в следующие дни. В работе для формирования прогноза применяются нейронные сети. Оценка качества прогнозирования выполняется с использованием оценок MAE (Mean Absolute Error – средняя абсолютная ошибка) и MSE (Mean Square Error – среднеквадратичное отклонение) [3, 6].

Функция потерь (целевая функция) J определяется по формуле

$$(2) \quad J = \sum_{i=1}^{24} k_i \cdot (p_i^{\text{потр}} - p_i^{\text{произв}}) + \sum_{i=1}^{24} (100\% - S_i) \cdot k_i \cdot E_{\text{макс}} ,$$

где k_i – тарифный план электроэнергии в промежутке времени i (руб/кВт·ч);

$p_i^{\text{потр}}$ – энергопотребление в промежутке времени $[i, i+1]$ (кВт·ч);

$p_i^{\text{произв}}$ – энергопроизводство в промежутке времени $[i, i+1]$ (кВт·ч);

S_i – состояние АКБ в момент времени i (%);

$E_{\text{макс}}$ – максимальная электроемкость АКБ (кВт·ч или А·ч).

Так как цель исследования заключается в формировании оптимальной стратегии переключения между источниками энергии, формулу (1) можно переписать с учетом «коэффициента стратегии покупки электроэнергии» str_i ($i = 1, \dots, 24$), зависящего от текущего тарифного плана электроэнергии

$$(3) \quad J = \sum_{i=1}^n [(p_i^{\text{потр}} - p_i^{\text{произв}}) + (100\% - S_i) \cdot E_{\text{макс}}] \cdot k_i \cdot str_i,$$

$$(4) \quad str_i = \begin{cases} -1, & \text{при продаже электроэнергии,} \\ 0, & \text{при использовании собственной электроэнергии,} \\ +1, & \text{при покупке электроэнергии.} \end{cases}$$

В каждый момент времени система находится в одном из трех состояний: использование собственной электроэнергии, продажа электроэнергии и покупка электроэнергии. Входные данные системы сохраняется каждый час, таким образом, имеются 24 наблюдения в день. Цель оптимизации стратегии покупки электроэнергии заключается в нахождение таких значений str_i ($i = 1, \dots, 24$) при которых достигается минимальное значение целевой функции J . Количество возможных стратегий покупки электроэнергии равно 3^{24} . Для уменьшения времени вычислений в статье используется генетический алгоритм. Параметры для алгоритма представляются таким образом: количество особей – 100, количество поколений – 1000, вероятность скрещивания – 80%, вероятность мутации – 5%, число генов особи – 24. Для формирования стратегии переключения между источниками электроэнергии выделяются следующие этапы генетического алгоритма:

Шаг 1. Задание целевой функции J для особей популяции.

Шаг 2. Создание начальной популяции.

Шаг 3. Если количество поколений $i < 100$

- {*
- размножение (скрещивание);*
- мутирование;*
- вычисление значений целевой функции для всех особей;*
- формирование нового поколения.*
- }*

Шаг 4. Определение оптимального решения.

Показатель эффективности создания интеллектуальной гибридной энергосистемы E определяется по формуле:

$$(5) \quad E = \frac{C_{\text{без HRES}} - C_{\text{HRES}}}{C_{\text{обор.}}},$$

где $C_{\text{без HRES}}$ – затраты на электроэнергию без применения интеллектуальной гибридной энергетической системы;

C_{HRES} – затраты на электроэнергию с применением интеллектуальной гибридной энергетической системы;

$C_{\text{обор.}}$ – затраты на приобретение оборудования системы.

Затраты на приобретение оборудования системы равны сумме затрат на приобретения компонент гибридной системы:

$$(6) \quad C_{\text{обор.}} = n_{\text{СП}} \cdot C_{\text{СП}} + n_{\text{АКБ}} \cdot C_{\text{АКБ}} + C_0$$

где $n_{\text{СП}}$ – количество солнечных панелей;

$C_{\text{СП}}$ – стоимость одной солнечной панели;

$n_{\text{АКБ}}$ – количество АКБ;

$C_{\text{АКБ}}$ – стоимость одного АКБ;

C_0 – стоимость остальных компонентов системы.

Чем выше показатель эффективности E , тем меньше время окупаемости системы. Следовательно, в статье проводится испытание для определения количества установленных солнечных панелей и АКБ в корпусе «В» ВолгГТУ, а также оптимальной стратегии покупки электроэнергии.

4. Результаты испытаний

Для апробации предлагаемых подходов была построена модель гибридной энергетической системы в среде PVSOL.

Данные о потреблении и производстве электроэнергии измерялись каждый час и сохранялись на сервере [2].

Испытание интеллектуальной гибридной энергетической системы проводилось в течение произвольно выбранного дня 14.9.2011 г. Для прогнозирования потребления и производства электроэнергии 14.9.2011 г. использовались нейронные сети. Согласно [1], на потребление электроэнергии в момент времени t наибольшее влияние оказывает потребление электроэнергии в этот же момент времени 1 неделю, 2 недели, 3 недели и 4 недели назад. Следовательно, входными сигналами нейронных сетей в момент t являются потребление и производство электроэнергии в моменты $t = 24.1.7$, $t = 24.2.7$, $t = 24.3.7$, $t = 24.4.7$. Структура нейронной сети для проведения испытаний показана на рис. 6.

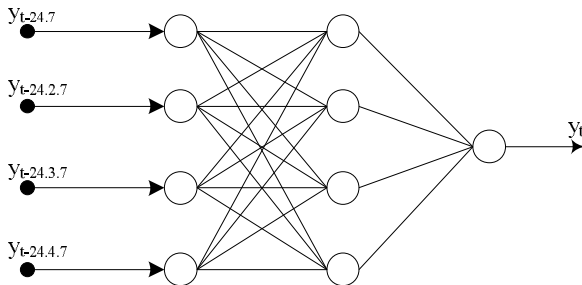


Рис. 6. Структура нейронной сети для прогнозирования потребления и производства электроэнергии

Значения модельных и прогнозируемых данных о потреблении электроэнергии для проведения испытания показаны на рис. 7.

На основе полученных данных в процессе моделирования можно по формуле (1) определить количество электроэнергии, вырабатываемой одной солнечной панелью. Следовательно, можно определить количество электроэнергии, вырабатываемой $n_{СП}$ солнечными панелями.

В статье проводилось 60 испытаний с разными конфигурациями системы (разными количества установленными солнечными панелями и АКБ) для определения оптимальной

конфигурации гибридной энергетической системы корпуса «В» ВолгГТУ. Оценка качества построенной интеллектуальной гибридной энергетической системы определяет коэффициентом эффективности по формуле (5).

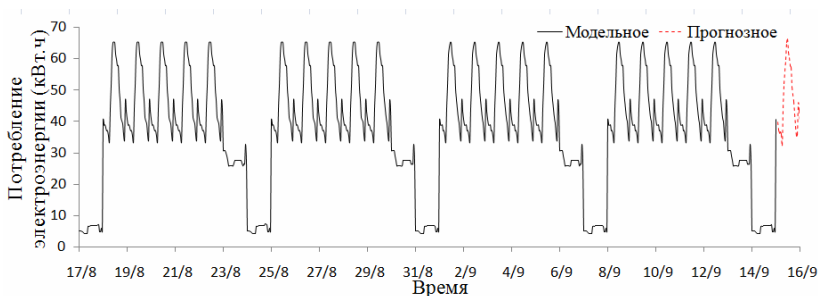


Рис. 7. Модельное потребление электроэнергии в корпуса «В» ВолгГТУ с 17.8.2011 г. по 14.9.2011 г.

В статье стратегия покупки электроэнергии формируется на основе прогнозируемых данных о потреблении и производстве электроэнергии с учетом многотарифного плана электроэнергии. График тарифного плана электроэнергии города Волгограда по трем зонам суток показывается на рис. 8.

На рис. 9. изображена поверхность коэффициентов эффективности (ось Z) в зависимости от числа установленных солнечных панелей (ось X) и максимальной емкости АКБ (ось Y). На поверхности определена точка, характеризующая оптимальную конфигурацию системы: количество солнечных панелей – 110, максимальная емкость АКБ – 458 А.ч, номинальное напряжение АКБ – 24 В.

График производства электроэнергии, вырабатываемой солнечными панелями в оптимальной конфигурации, представлен на рис. 10.

В данной статье использован генетический алгоритм для выбора оптимальной стратегии покупки электроэнергии возобновляемой энергетической системы корпуса «В» ВолгГТУ. В результате функционирования алгоритма оптимальная стратегия покупки электроэнергии в точке максимального коэффициента эффективности представлена на рис. 11.

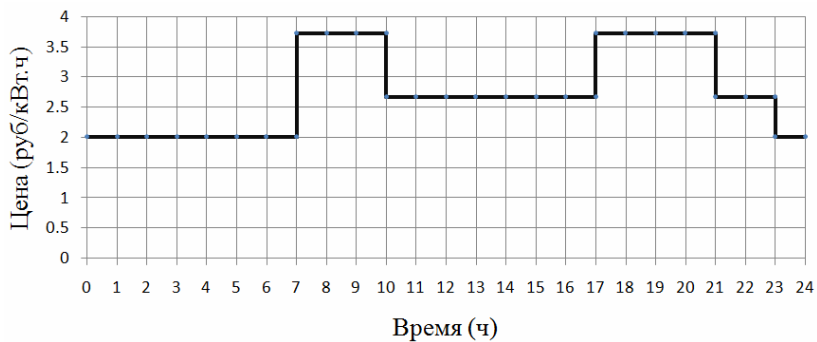


Рис. 8. Тарифный план электроэнергии по трем зонам суток

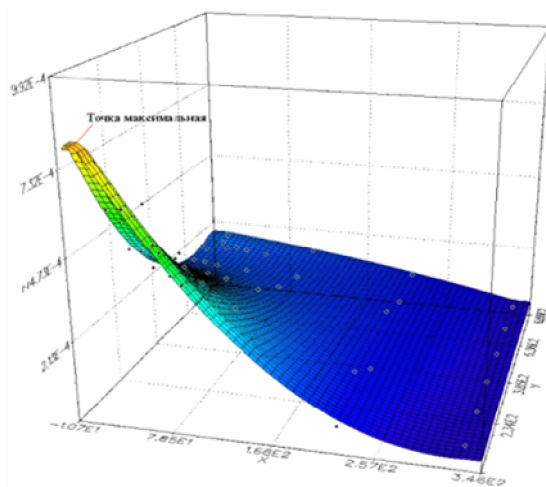


Рис. 9. Поверхность коэффициентов эффективности с разными конфигурациями системы

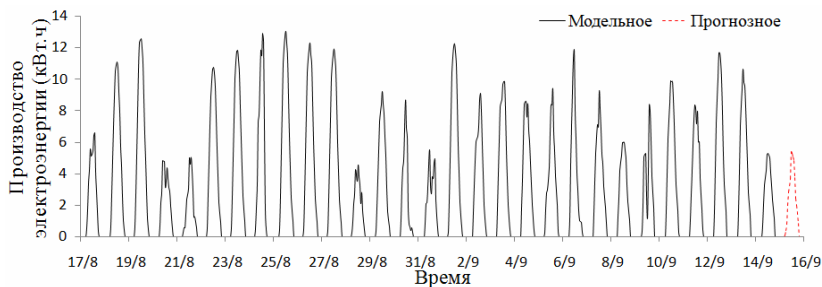


Рис. 10. Производство электроэнергии корпуса «В» ВолгГТУ с 17.8.2011 г. по 14.9.2011 г.

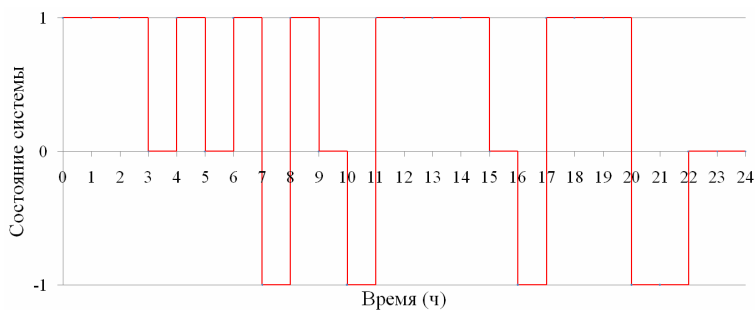


Рис. 11. Диаграмма переключения между источниками энергии 14.9.2011 г.

Качество управления системой оценивается через процент сокращения затрат на электроэнергию до и после применения метода формирования стратегии покупки электроэнергии. Таблица 1 содержит информацию о гибридной энергетической системе.

Таблица 1. Параметры построенной гибридной энергетической системы

Название	Описание
Прогнозируемые затраты (руб.) (14.9.2011 г.)*	822
Реальные затраты (руб.) (14.9.2011 г.)*	830

Название	Описание
Затраты без применения гибридной энергетической системы (руб.) (14.9.2011 г.)**	2756
Время вычисления (сек.) (14.9.2011 г.)	165
Процент сокращения затрат (%)	70
Стоимость системы (млн. руб.)***	2,5

* расчет по формуле (3);

** расчет по формуле (2);

*** расчет по формуле (6).

5. Заключение

В статье рассмотрена модель гибридной энергосистемы с источниками возобновляемой энергии в корпусе «В» ВолГТУ. В результате моделирования гибридной энергосистемы выявлены оптимальная конфигурация гибридной энергосистемы и оптимальная стратегия покупки электроэнергии 14.9.2011 г. Преимущество применения подхода заключается в том, что он позволяет определить оптимальную стратегию переключения между внешней электросетью и источниками возобновляемой энергии в зависимости от текущего тарифного плана текущего состояния системы, прогнозируемого состояния. В результате этого могут быть сокращены затраты на электроэнергию.

Литература

1. КАМАЕВ В.А., ЩЕРБАКОВ М.В., ПАНЧЕНКО Д.П. *Применение коннективистских систем для прогнозирования потребления электроэнергии в торговых центрах // Управление большими системами. – 2010. – №31. – С. 92–109.*
2. МАЙ Н.Т. *Мультиагентный метод управления энергопотоками в гибридной энергосистеме с источниками возобновляемой энергии / Н. Т. Май, В. А. Камаев, М. В. Щербаков, Т. Х. Чинь // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – Т. 22, №2. – С. 30–41.*

3. ЩЕРБАКОВ М.В. *ICDMS – Программное обеспечение как сервис для решения задач идентификации на основе коннективистских систем* // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12, №7. – С. 88–91.
4. ЯНОВСКИЙ Т.А., ЩЕРБАКОВ М.В. *Методика предварительного анализа данных в автоматизированных системных прогнозирования потребления электроэнергии* // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2012. – №3. – С. 21–26.
5. CAISHENG W. *Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems*. – A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, 2006. – 402 p.
6. TRAN T.H.O., TRAN H.L., DONG S.T.C. *Parallel neural network application in forecasting power demand* // Development of science and technology magazine. – 2010. – Vol. 10, №11. – P. 57–73.
7. *PV*SOL® Expert Version 5.5 Design and Simulation of Photovoltaic Systems Manual*. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.valentin.de/sites/default/files/downloads/handbueche_r/en/manual-pvsol.pdf (дата обращения: 17.10.2013).
8. *The encyclopedia of alternative energy and sustainable living* [Электронный ресурс]. – URL: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_standard_test_conditions.html (дата обращения: 17.10.2013).

SIMULATION AND OPTIMAL CONTROL OF INTELLIGENT HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEM

Mai Ngoc Thang, Volgograd State Technical University,
Volgograd, graduate student (mnthang464@mail.ru).

Ha Van Muon, Volgograd State Technical University, Volgograd,
student (muon.ha@mail.ru).

Kamaev Valerii Anatolevich, Volgograd State Technical
University, Volgograd, CAD Dept. , professor
(kamaev@unix.cad.vstu.ru).

Shcherbakov Maxim Vladimirovich, Volgograd State Technical
University, Volgograd, Cand.Sc., CAD Dept., Senior lecturer
(vstu@gebeus.ru).

Thai Quang Vinh, Institute of Information Technology,
Hanoi, Vietnam (tqvinh@ioit.ac.vn).

Abstract: Nowadays energy management is an important subject for intelligent control. The problem is to find a real-time energy sources' switching strategy, which minimizes wastes and energy cost. We consider an intelligent hybrid energy system (HRES), which optimizes a number of criteria, such as efficiency and energy costs, by switching between energy sources in real-time based on energy consumption and production forecasts. The switching strategy is found with a genetic algorithm. Efficiency of the developed control system as compared to existing energy systems is verified with computer simulation.

Keywords: hybrid, smart grid, renewable energy source, neural network, forecast, optimization, HRES.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии М.В. Губко*

*Поступила в редакцию 19.06.2013.
Опубликована 30.11.2013.*