

**В. А. КАМАЕВ**, д-р техн. наук, проф. ВолгДТУ, Волгоград, Россия;  
**С. В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;  
**Р. И. МАНЕВА**, студент НТУ «ХПИ»

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ**

В статье рассмотрена задача прогнозирования потребления электроэнергии на основе теории мягких вычислений с использованием нечетких продукционных систем. Данный подход позволяет объединять численную информацию, представленную в форме обучающих данных с лингвистической информацией, имеющей вид базы правил. Получены результаты применения разработанной системы нечеткого вывода Сугено и Мамдани в среде MATLAB.

У статті розглянута задача прогнозування споживання електроенергії на основі теорії м'яких обчислень з використання нечітких продукційних систем. Даний підхід дозволяє об'єднувати чисельну інформацію, подану у формі навчальних даних з лінгвістичною інформацією, що має вид бази правил. Одержані результати застосування розробленої системи нечіткого висновку Сугено та Мамдані в середовищі MATLAB.

In paper was considered the problem of forecasting electricity consumption based on the theory of soft computing with the use of fuzzy systems. This approach allows to combine the numerical information presented in the form of training data with linguistic information, which is kind of base rules. The obtained the results of applying the developed system of fuzzy conclusion Suheno and Mamdani in the environment MATLAB.

**Введение.** Электроэнергия является наиболее значимым продуктом для экономики и составляет весомую долю в расходах практически всех ее отраслей. Переход к оптовому рынку электроэнергии вызывает проблемы, связанные с точностью прогнозирования потребления электроэнергии, ужесточив требования по скорости сборки и надежности прогнозов. Актуальность прогнозирования потребления электроэнергии в разрезах времени несомненна, поскольку обоснованные прогнозы являются основой перспективного планирования и управления в отрасли. Точное прогнозирование данных величин позволяет оптимизировать распределение нагрузки между электростанциями, способствует осуществлению экономически целесообразных операций по покупке или продаже электроэнергии. Актуальность исследований в этой области проявляется также в применении полученных результатов для оперативного и тактического управления [1].

**Постановка задачи.** Задачей исследования является создание математического обеспечения для прогнозирования потребления электроэнергии и его использование в среде MATLAB

Для решения поставленной задачи может быть использована база нечетких правил, которая строится на основе численных данных ретроспективного периода. Это позволит объединить численную информацию в форме обу-

чающих данных с лингвистической информацией, имеющей вид базы правил. Такие результаты объединения могут быть использованы для формирования прогноза потребления электроэнергии.

**Описание объекта исследования.** В качестве объекта исследования рассматривается предприятие Харьковоблэнерго. Успешная деятельность предприятия обеспечивается многими составляющими, в числе которых можно назвать анализ аспектов функционирования с выявлением и устранением недостатков, создание системы повышения качества конечных результатов деятельности, внедрение информационных технологий и многое другое. Для дальнейших исследований требуется получение качественного описания системы, которое может быть использовано для разработки ее математической модели.

Функционирование Харьковоблэнерго можно представить моделью, использующей в качестве выбранных входных параметров, следующие данные: цена электроэнергии 1-го класса напряжения; цена электроэнергии 2-го класса напряжения; год; время года (месяц); ВВП (валовый внутренний продукт), средняя температура окружающей среды; количество рабочих дней.

Объем потребления электроэнергии будем считать выходным параметром.

Структура модели оценки потребления электроэнергии с выбранными параметрами изображена на рис. 1.

**Выбор метода прогнозирования потребления электроэнергии.** Механизм нечеткой логики по сравнению с другими искусственными интеллектуальными системами имеет ряд преимуществ. Во-первых, при одних и тех же объемах входной и выходной информации, блок принятия решений становится компактнее и проще для восприятия пользователем. Во-вторых, решение сложных и громоздких задач имеет гибкую стратегию адаптивной "настройки" с ограничением требуемой точности расчетов и становится проще. Эти преимущества позволяют сделать выбор подхода для решения задачи прогнозирования в пользу использования аппарата нечеткой логики [3].



Рис. 1 – Структура модели оценки объемов потребления электроэнергии

Задача исследования в данной работе заключается в формировании таких нечетких правил, чтобы сконструированный на их основе программный модуль управления определял корректные результаты прогнозирования, имеющие наименьшую погрешность относительно исходных статистических данных. Для этого используются алгоритмы нечеткого вывода Мамдани и Сугено [4]. Алгоритм Мамдани позволяет избежать чрезмерно большого объема вычислений. Этот алгоритм в настоящее время получил наибольшее практическое применение в задачах нечеткого моделирования. Алгоритм Сугено аналогичен алгоритму Мамдани за исключением выводов правил, которые задаются не нечеткими терминами, а линейной функцией от входов. Правила в базе знаний Сугено являются своего рода переключателями с одного линейного закона "входы – выход" на другой, тоже линейный [5,6].

**Алгоритм обучения нечеткой базы правил.** Задача обучения нечеткой базы правил для нечеткого продукционного вывода сводится к задаче математического программирования. По содержанию она является задачей минимизации погрешности и имеет следующий вид:

$$L(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^m (\varphi(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}) - Y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

где  $L(\mathbf{z})$  – критерий решения задачи;

$\mathbf{z}$  – вектор параметров оптимизации;

$m$  – количество наборов данных, на которых происходит обучение;

$f_i(\mathbf{z})$  – значение невязки прогнозного значения системы при заданных параметрах  $\mathbf{z}$ ;

$\mathbf{x}_i$  – входные данные  $i$ -го набора;

$\varphi(\mathbf{x}_i, \mathbf{z})$  – функция системы прогнозирования, определяющая искомые значения выходного параметра на основе  $i$ -го набора данных  $\mathbf{x}_i$  и параметров  $\mathbf{z}$ ;

$Y_i$  – действительное значение прогнозируемой величины.

Приведенная задача относится к задачам метода наименьших квадратов, которую можно решать стандартными методами математического программирования, например, с помощью метода Левенберга-Марквардта [7], учитывая особенный вид градиента целевой функции  $\nabla L(\mathbf{z})$  и матрицы Гессе  $H(\mathbf{z})$ :

$$\nabla L(\mathbf{z}) = 2J^T(\mathbf{z})\mathbf{f}(\mathbf{z}), \quad (2)$$

$$H(\mathbf{z}) = J^T(\mathbf{z})J(\mathbf{z}) + Q(\mathbf{z}), \quad (3)$$

$$Q(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{z})H_i(\mathbf{z}), \quad (4)$$

где  $\nabla L(\mathbf{z})$  – градиент целевой функции;

$J^T(\mathbf{z})$  – транспонированная матрица Якоби вектор-функции  $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ ;

$\mathbf{f}(\mathbf{z})$  – вектор-функция, компонентами которой являются значения  $f_i(\mathbf{z})$ ;

$H_i(\mathbf{z})$  – матрица Гессе для компоненты  $f_i(\mathbf{z})$ .

Направление поиска Левенберга-Марквардта  $\mathbf{p}^{(k)}$  определяется из системы уравнений:

$$[J^T(\mathbf{z}^{(k)})J(\mathbf{z}^{(k)}) + \lambda_k I]\mathbf{p}^{(k)} = -J^T(\mathbf{z}^{(k)})f(\mathbf{z}^{(k)}), \quad (5)$$

Тогда следующее значение  $\mathbf{z}^{(k+1)}$  можно определить таким образом:

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \mathbf{z}^{(k)} + \mathbf{p}^{(k)}. \quad (6)$$

Константа  $\lambda_k$  должна быть достаточной для монотонного спуска по функции невязки  $L(\mathbf{z})$ , т.е. нужно увеличивать данный параметр до тех пор, пока не будет достигнуто условие  $L(\mathbf{z}^{(k+1)}) < L(\mathbf{z}^{(k)})$ . Параметр  $\lambda_k$  можно устанавливать, исходя из отношения между фактическими изменениями функции  $\mathbf{f}(\mathbf{z})$  в результате пробных шагов, и ожидаемыми величинами этих изменений при интерполяции. Тогда направление поиска Левенберга-Марквардта  $\mathbf{p}^{(k)}$  определяется как

$$\mathbf{p}^{(k)} = \arg \min_{\|\mathbf{p}\| \leq \Delta} \|J(\mathbf{z}^{(k)})\mathbf{p} + \vec{f}(\mathbf{z}^{(k)})\|, \quad (7)$$

где  $\Delta$  – параметр, связанный с  $\lambda_k$ .

В данной работе применяется алгоритм Левенберга-Марквардта, который является распространенным алгоритмом оптимизации и превышает по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов в различных задачах [7].

**Численные расчеты.** Для определения прогнозных значений потребления электроэнергии за период с ноября 2010 по май 2011 использовались следующие данные, табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчетов

Год	Месяц	ВВП	Цена 1-го класса напряжения	Цена 2-го класса напряжения	Средняя температура воздуха	Количество рабочих дней	Уровень потребления, МВт год.
2010	11	98429	55,27	68,6	5,9	22	325,435
2010	12	114531	55,27	68,6	-1,6	23	323,457
2011	01	79947	57,47	72,03	-7	19	328,207
2011	02	82842	60,34	75,63	-8,9	20	396,225
2011	03	100612	61,76	77,44	-0,5	22	319,674
2011	04	105693	62,26	79,27	8,5	20	444,542
2011	05	102830	62,71	82,37	17,9	19	469,583

В результате серии расчетов по прогнозированию потребления электроэнергии были построены графики реальных и прогнозных значений для семи месяцев тестовой выборки, представленные на рис. 2.

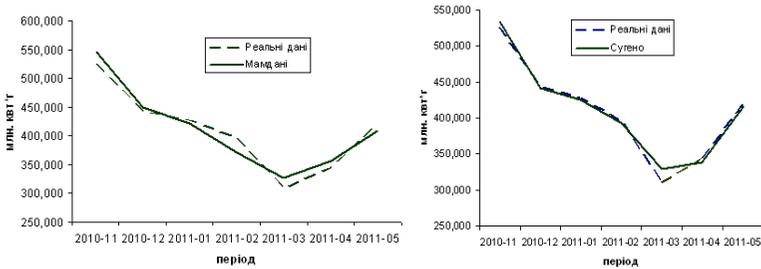


Рис. 2 – График прогнозных и реальных значений за период ноябрь 2010-май 2011

Здесь по оси абсцисс размещены периоды времени, а по оси ординат – объемы потребления электроэнергии. В таблице 2 приведены абсолютные и относительные отклонения прогнозных и реальных значений. На основании данных этой таблицы можно видеть, что наименьшее отклонение наблюдается в результатах, полученных по алгоритму Сугено. В этом смысле – это лучший алгоритм решения рассматриваемой задачи при прочих равных условиях.

Таблица 2 – Отклонения прогнозных и реальных значений (по модулю)

Период	Метод Мамдани		Метод Сугено	
	Абсолютные	Относительные	Абсолютные	Относительные
2010–11	21,46375	3,93	7,830753	1,47
2010–12	6,74923	1,50	2,55377	0,58
2011–01	5,396325	1,28	2,161325	0,51
2011–02	24,64726	6,63	3,58126	0,91
2011–03	17,67774	5,40	19,78074	6,00
2011–04	12,38915	3,47	5,758848	1,70
2011–05	10,86192	2,66	3,412924	0,82
Среднее	14,19448	3,55	6,939019	1,71

Применение разработанной системы прогнозирования позволяет получить визуальные зависимости выходного параметра – прогнозируемого объема потребления электроэнергии – от выбранных входных параметров, рис.3.

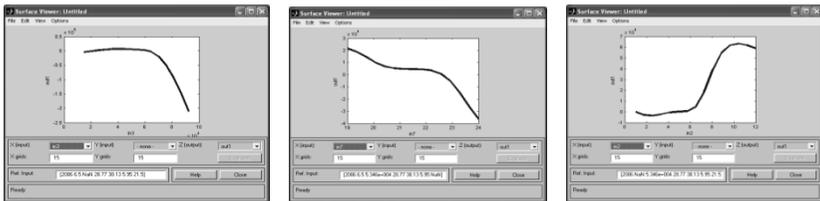


Рис. 3 –Зависимости объемов потребления электроэнергии от значений параметров «Цена 1-го класса напряжения», «Цена 2-го класса напряжения» и «ВВП»

Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде MATLAB был использован пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox. Обучение проводилось в редакторе ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). Это основная процедура настройки систем нечеткого логического вывода типа Сугено и Мамдани, с помощью которой для минимизации расхождения между результатами и экспериментальными данными итерационно определяются параметры системы, в частности параметры функций принадлежности термов из баз знаний,. Кроме того, в нечеткой базе знаний Сугено настраиваются и коэффициенты в заключениях правил.

Модель процесса функционирования Харьковоблэнерго построена на основе данных из Internet-ресурсов, поэтому возможны расхождения результатов нечеткого вывода и существующих данных.

Как показали результаты расчетов, наиболее влиятельными параметрами являются «Цена 1-го класса напряжения», «Цена 2-го класса напряжения» и «ВВП».

Из графиков видно, что параметры «Цена 1-го класса напряжения» и «Цена 2-го класса напряжения» обратно пропорционально влияют на значение выходного параметра. Чем меньше значение этих параметров, тем больше значение выходного параметра – "потребление электроэнергии".

Параметр "ВВП" прямо пропорционально влияет на значение выходного параметра. Чем больше значение этого параметра, тем больше значение выходного параметра.

**Выводы.** На основе предложенного подхода и моделирования в среде MATLAB был проведен анализ модели процесса функционирования Харьковоблэнерго и прогнозирование потребления электроэнергии с использованием алгоритмов нечеткого вывода Мамдани и Сугено. Анализ полученных результатов позволяет определить влияние значений входных параметров модели на объем потребления электроэнергии, что может быть использовано для построения эффективных стратегий управления производством и потреблением электроэнергии в регионе.

**Список литературы:** 1. Малахов В. А. Подходы к прогнозированию спроса на электроэнергию в России / В. А. Малахов // Проблемы прогнозирования. – 2009. – № 2. – С. 57–62. 2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с. 3. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком. – 2007. – 288 с. 4. Самарский А. А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с. 5. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Моррей, М. Райт; перевод с англ. В.Ю. Лебедева – М. : Мир, 1985. – 509 с.

*Надійшла до редколегії 08.11.2011*