

## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ ПРОГНОЗНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Тимчук С. А.<sup>1</sup>, Катюха И. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко,

<sup>2</sup>Таврический государственный агротехнологический университет

*Предложен подход к определению кусочно-непрерывной нечеткой прогнозной модели электропотребления, сочетающий как формальные, так и неформальные процедуры, максимально полно учитывающий особенности долгосрочных и краткосрочных производственных циклов. Предложен механизм адаптации долгосрочных прогнозных моделей к краткосрочному прогнозированию, позволяющий повысить информативность последних с сохранением точности прогноза.*

**Постановка проблемы.** Для планирования оптимального использования электроэнергии необходим долгосрочный и краткосрочный прогноз электропотребления на предприятии. Формальный подход к решению данной задачи не всегда дает положительный результат поскольку вид прогнозной зависимости определяется особенностями различных производственных циклов. Неформальный подход порождает проблему обоснования прогноза.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Основным инструментом при построении прогнозных моделей является регрессионный анализ. Для случая прогнозирования электропотребления рационально использование данного аппарата в нечеткой форме поскольку исходные данные в данном случае содержат неопределенность. Нечеткий регрессионный анализ для прогнозных задач в основном используется для построения линейных полиномиальных моделей [1,2] с нечеткими коэффициентами регрессии. Также применяется сочетание нечеткого регрессионного анализа с интервальным анализом [3]. В целом авторы стремятся получить одну зависимость для описания суточного, недельного или годового цикла электропотребления. Разработка вида регрессионных зависимостей, отличных от полиномиальных, как правило, не рассматривается. Модели четко делятся по назначению на краткосрочные и долгосрочные. Причем долгосрочные модели, описывая длительный цикл производства, содержат дополнительную информацию, связанную с изменением внешних условий производства, чего нет в краткосрочных моделях.

**Цель статьи** – разработка подхода к построению прогнозных моделей, использующего достоинства долгосрочных прогнозных моделей для кратко и среднесрочных прогнозов и сочетающего формальные и неформальные методы.

**Основные материалы исследования.** Электропотребление предприятий представляет собой циклический процесс. Характеристики каждого цикла зависят от внешних и внутренних факторов. К внутренним факторам относятся такие, как количество смен, наличие перерывов, график выходных и т.п. К внешним – ритмичность заказов, сезонность, климатические особенности и т.п. Есть еще ряд факторов, связанных с аварийными ситуациями, которые как правило выносятся за рамки прогнозной задачи.

Циклы можно разделить по их протяженности на

суточный, недельный, месячный, годовой. Степень учета внешних и внутренних факторов зависит от прогнозного цикла, на который разрабатывается модель. Чем длиннее цикл, тем больше факторов необходимо учитывать.

Достоинством долгосрочной модели является максимальный учет всех влияющих на электропотребление факторов. Но количественно данный прогноз может быть неудовлетворительным. Если долгосрочную прогнозную модель скорректировать с учетом оперативной информации, то, сохраняя качественное описание процесса, она приобретет и необходимую точность для краткосрочного прогноза. В этом заключается основная идея настоящего исследования.

Вид суточной прогнозной зависимости определяется на основе анализа исходных данных. Процесс определения оптимального вида функции регрессии не формализован, а традиционно применяемый полиномиальный подход, оправданный в задачах интерполяции, часто бесполезен для задач прогноза.

Анализируя графики электропотребления предприятий (рис. 1) можно отметить, что суточный цикл можно разделить на периоды работы технологического оборудования, периоды фоновое электропотребления и переходные периоды. Данные графики дают информацию также и о недельном цикле электропотребления. Есть предприятия с прерывистым производством, когда технологическое оборудование не работает на полную мощность часть суток и в выходные и праздничные дни. Есть предприятия с непрерывным производством, в которых недельный цикл слабо выражен.

Поскольку в графиках электропотребления наблюдаются четко выраженные периоды в течение суток, то рационально прогнозную функцию строить не в виде непрерывной функции для всего суточного цикла, а в виде кусочно-непрерывной функции. При этом рационально выделить участки фоновое электропотребления, участки электропотребления при работающем оборудовании и переходные участки.

Для каждого из данных участков фоновое электропотребления и электропотребления при работающем оборудовании можно выбрать индивидуальный вид прогнозной функции. Определение коэффициентов регрессии в данном случае можно осуществлять по участкам отдельно, что существенно сокращает размерность регрессионной задачи.

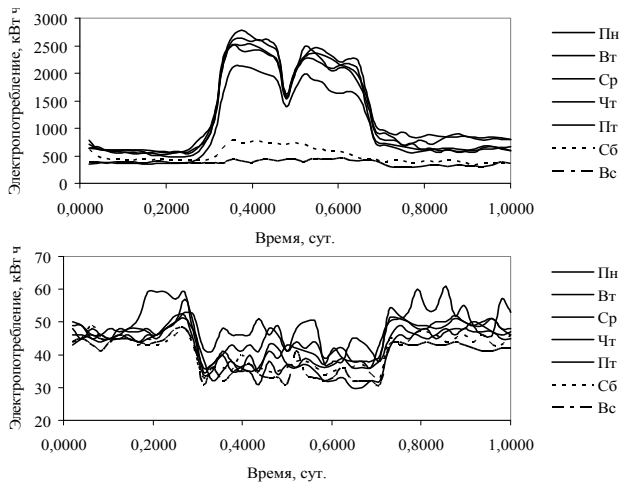


Рисунок 1 – Примеры суточных графиков электропотребления предприятий.

Для переходных периодов электропотребления регрессионный анализ осуществлять нерационально. Достаточно решить задачу построения функции по двум точкам для устранения разрывов в общей прогнозной зависимости.

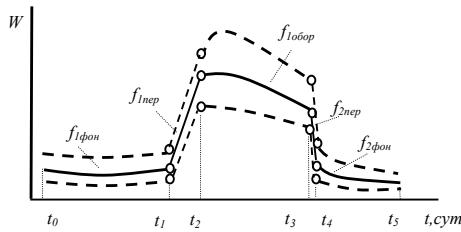


Рисунок 2 – Иллюстрация к построению кусочно-непрерывной прогнозной функции на сутки

На рис. 2 сплошной линией показаны функции, описывающие модальные значения нечетких оценок, а пунктиром – границы нечеткости описаний. То есть

$$f_{1,2 \text{ фон}}(t) = \langle f_{1,2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t), f_{1,2 \text{ фон}}^-(t), f_{1,2 \text{ фон}}^+(t) \rangle,$$

$$f_{1 \text{ обор}}(t) = \langle f_{1 \text{ обор}}^{\text{mod}}(t), f_{1 \text{ обор}}^-(t), f_{1 \text{ обор}}^+(t) \rangle, \quad (1)$$

$$f_{1,2 \text{ пер}}(t) = \langle f_{1,2 \text{ пер}}^{\text{mod}}(t), f_{1,2 \text{ пер}}^-(t), f_{1,2 \text{ пер}}^+(t) \rangle,$$

где

$$f_{1 \text{ пер}}^{\text{mod}}(t) = \frac{f_{1 \text{ обор}}^{\text{mod}}(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t + f_{1 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_1) - \frac{f_{1 \text{ обор}}^{\text{mod}}(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1,$$

$$f_{1 \text{ пер}}^-(t) = \frac{f_{1 \text{ обор}}^-(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^-(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t + f_{1 \text{ фон}}^-(t_1) - \frac{f_{1 \text{ обор}}^-(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^-(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1,$$

$$f_{1 \text{ пер}}^+(t) = \frac{f_{1 \text{ обор}}^+(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^+(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t + f_{1 \text{ фон}}^+(t_1) - \frac{f_{1 \text{ обор}}^+(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^+(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1,$$

$$\frac{f_{1 \text{ обор}}^+(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^+(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1,$$

$$f_{2 \text{ пер}}^{\text{mod}}(t) = \frac{f_{2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_4) - f_{1 \text{ обор}}^{\text{mod}}(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t + f_{2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_4) - \frac{f_{2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_4) - f_{1 \text{ обор}}^{\text{mod}}(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t_4,$$

$$f_{2 \text{ пер}}^-(t) = \frac{f_{2 \text{ фон}}^-(t_4) - f_{1 \text{ обор}}^-(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t + f_{2 \text{ фон}}^-(t_4) - \frac{f_{2 \text{ фон}}^-(t_4) - f_{1 \text{ обор}}^-(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t_4,$$

$$f_{2 \text{ пер}}^+(t) = \frac{f_{2 \text{ фон}}^+(t_4) - f_{1 \text{ обор}}^+(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t + f_{2 \text{ фон}}^+(t_4) - \frac{f_{2 \text{ фон}}^+(t_4) - f_{1 \text{ обор}}^+(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t_4.$$

В данном случае представлены зависимости для случая линейных нечетких оценок переходных участков. Несложно получить подобные выражения и для других видов зависимостей.

Поскольку технологическое оборудование, как правило, не работает в «рваном» режиме, то для описания электропотребления на выделенных участках можно применять достаточно простые зависимости, например, полиномы не выше второй степени.

Отдельно следует сказать о выборе точек разрыва (на рис. 2 это  $t_1 - t_4$ ). Чаще всего точки разрыва определяются технологическим циклом предприятия: начало смены, выход оборудования на режим, выпуск продукции, перерыв на обед, выпуск продукции, выведение оборудования в фоновый режим, конец смены. Но если предприятие работает в непрерывном режиме, то точки разрыва могут определяться внешними факторами, такими как длительность светового дня, температура наружного воздуха и т.п. Поэтому для определения данных точек трудно предложить общий формальный подход. Следует, по-видимому, сочетать формальные и неформальные методы при анализе графиков электропотребления электротехнического оборудования предприятий.

Имея в качестве исходных данных результаты замеров электропотребления в течении года, в результате применения описанного подхода для каждого дня года с помощью нечеткого регрессионного анализа [4] получим зависимости для каждого выделенного участка в виде

$$W_{ij}(t) = \langle W_{ij}^{\text{mod}}(t), W_{ij}^-(t), W_{ij}^+(t) \rangle,$$

$$W_{ij}^{\text{mod}}(t) = a_{1ij}^{\text{mod}} t + a_{2ij}^{\text{mod}}, \quad (3)$$

$$W_{ij}^-(t) = a_{1ij}^- t + a_{2ij}^-,$$

$$W_{ij}^+(t) = a_{1ij}^+ t + a_{2ij}^+,$$

где  $i$  – номер дня в году,  $j$  – номер участка на графике электропотребления,  $t$  – время суток.

Информация о недельных и годовых циклах в интегральном виде содержится в полученных коэффи-

циентах  $a_{1ij}$ ,  $a_{2ij}$ . Для определения этих зависимостей необходимо повторить процедуру нечеткого регрессионного анализа для указанных коэффициентов. Аргументами при этом будут номер дня недели и номер недели в году.

Недельные и особенно годовые циклы в большей степени связаны с сезонными внешними колебаниями, которые носят нелинейный характер. На основе предварительного анализа определено, что оптимальными в данном случае являются полиномиальные модели второй степени вида:

$$\begin{aligned} a_{1j}^z &= a_{11j}^z d_n^2 + a_{12j}^z d_n + a_{13j}^z, \\ a_{2j}^z &= a_{21j}^z d_n^2 + a_{22j}^z d_n + a_{23j}^z, \\ z &= \{mod, -, +\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $d_n$  – номер дня недели.

В свою очередь полученные в (4) коэффициенты зависят от номера недели в году в следующем виде

$$\begin{aligned} a_{1kj}^z &= a_{1k1j}^z n^2 + a_{1k2j}^z n + a_{1k3j}^z, \\ a_{2kj}^z &= a_{2k1j}^z n^2 + a_{2k2j}^z n + a_{2k3j}^z, \\ z &= \{mod, -, +\}, \quad k = \{1, 2, 3\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $n$  – номер недели.

Подставив (5) в (4) и далее в (3), получим суточные прогнозные зависимости для любого дня в году, учитывающие как суточный, так и недельный и годовой циклы электропотребления (6).

$$\begin{aligned} W_j(t) &= \langle W_j^{mod}(t), W_j^-(t), W_j^+(t) \rangle, \\ W_j^z(t) &= [ (a_{111j}^z n^2 + a_{112j}^z n + a_{113j}^z) d_n^2 + \\ &+ (a_{121j}^z n^2 + a_{122j}^z n + a_{123j}^z) d_n + \\ &+ (a_{131j}^z n^2 + a_{132j}^z n + a_{133j}^z) ] t + \\ &+ (a_{211j}^z n^2 + a_{212j}^z n + a_{213j}^z) d_n^2 + \\ &+ (a_{221j}^z n^2 + a_{222j}^z n + a_{223j}^z) d_n + \\ &+ (a_{231j}^z n^2 + a_{232j}^z n + a_{233j}^z) ] \\ z &= \{mod, -, +\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Зависимости (6) предлагается использовать для краткосрочного прогноза на неделю или на несколько суток вперед. Для этого необходимо по результатам измерений электропотребления на предыдущей неделе скорректировать постоянные члены в выражениях (5). Эта процедура снизит погрешность общих зависимостей (6), сохранив информативность долгосрочных прогнозных зависимостей для прогноза недельного и суточного циклов электропотребления.

**Выводы.** Предлагаемый подход при определении кусочно-непрерывной нечеткой прогнозной модели электропотребления, сочетающий как формальные, так и неформальные процедуры, позволяет достаточно просто их разработать. Данный подход максималь-

но полно учитывает особенности долгосрочных и краткосрочных производственных циклов. Адаптация долгосрочных прогнозных моделей к краткосрочному прогнозированию позволяет повысить информативность последних с сохранением точности прогноза.

#### Список использованных источников

1. Chang Yun-Hsi O. Fuzzy regression methods - a comparative assessment / Yun-Hsi O. Chang, Bilal M. Ayyub // Fuzzy Sets and Systems. - V. 119 (2). - 2001. - P. 187-203.
2. Таранцев А. А. Принципы построения регрессионных моделей при исходных данных с нечетким описанием / А. А. Таранцев // Автоматика и телемеханика. - №11. - 1997. – С. 215-220.
3. Манусов В. З. Анализ и прогнозирование электропотребления в энергосистемах при интервальном характере исходных данных / В. З. Манусов, А. В. Могиленко, В. П. Костромин // Проблемы энергетики. Баку. - №1. - 2003. – С. 33–39.
4. Тимчук С. О. Використання нечіткого регресійного аналізу для прогнозування електроспоживання на підприємстві / В. В. Овчаров, І. А. Катюха, С. О. Тимчук // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 13. – Т. 2. – С. 29 – 36.

#### Анотація

#### МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ НЕЧІТКОЇ ПРОГНОЗНОЇ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Тимчук С. О., Катюха І. А.

Запропоновано підхід до визначення кусочно-безперервної нечіткої прогнозувальної моделі електроспоживання, що поєднує як формальні, так і неформальні процедури, максимально повно враховує особливості довгострокових і короткострокових виробничих циклів. Запропоновано механізм адаптації довгострокових прогнозних моделей до короткострокового прогнозування, що дозволяє підвищити інформативність останніх із збереженням точності прогнозу.

#### Abstract

#### METHOD OF FORMING FUZZY REGRESSION MODEL PREDICTED POWER CONSUMPTION

S. Tymchuk, I. Katyukha

An approach to the definition of a piecewise continuous fuzzy predictive model of electricity, which combines both formal and informal procedures that fully takes into account the characteristics of long-term and short-term business cycles. A mechanism of adaptation of the long-term predictive models to short-term forecasting, which allows to increase the information content of the past while maintaining the accuracy of the forecast.