

Модель прогноза месячных расходов электроэнергии тяговой подстанции на основе гармонического анализа

В.Г. Кузнецов¹

Резюме

В данной статье предложена модель прогноза месячных расходов электроэнергии для тяговых подстанций на основе гармонического анализа. Выбрана рациональная база прогноза, определена средняя ошибка.

Ключевые слова: прогноз, тяговая подстанция, расход электроэнергии

1. Введение

Одной из первоочередных задач железнодорожного транспорта Украины является переход к реализации энергооптимальных технологий осуществления процессов перевозок. Сложность создания энергооптимальной технологии перевозок связана с её комплексным характером, охватывающим вопросы разработки рациональных графиков движения, проблемы учёта и прогнозирования электропотребления электрифицированных линий, управления электропотреблением поездов, требованиями перехода от диспетчерского к автоматизированному регулированию электропотребления, совершенствованием информационно-технических средств и методов управления. Базой автоматизированного регулирования электропотребления является знание фактического потребления электроэнергии потребителями железнодорожного транспорта. Для принятия решений по регулированию систем тягового электроснабжения необходимо располагать оперативными прогнозами потребления электроэнергии. Данная задача является особенно актуальной в связи с закупкой электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии.

2. Постановка проблемы

Прогнозирование потребления электроэнергии есть оперативное предсказание расхода электроэнергии отдельно взятым потребителем, группой

¹ Кафедра Электроснабжения железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, e-mail: vkuz@i.ua

потребителей и т.д. Различают краткосрочные и долгосрочные прогнозы расходов электроэнергии.

3. Цель работы

Создать модель прогноза расходов электроэнергии на основе гармонического анализа.

4. Обзор литературных источников

Методическая основа составления прогнозов расходов электроэнергии была заложена в работах [1, 2, 3]. В [4, 5, 6] приводятся подходы по составлению краткосрочных прогнозов электроэнергии и прогнозов цены на электроэнергию. Работы [7, 8] посвящены основам прогнозирования расходов электроэнергии на тягу поездов для задач управления режимами систем тягового электроснабжения.

5. Изложение основного материала

Для создания методики прогнозирования месячных расходов электроэнергии электрифицированных участков применим теорию анализа временных рядов. Будем рассматривать временной ряд фактических расходов электроэнергии в виде следующей аддитивной модели:

$$X_t = \omega_t + V_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где ω_t , V_t , ε_t – составляющие этого ряда, соответственно: тенденция, кратковременные колебания (сезонные волны), случайные колебания. Тенденция отражает общие изменения ряда за длительный промежуток времени: постоянный подъем или постоянное снижение. Тенденция представляется как плавное, непрерывное движение, скрадывающие скачкообразные изменения в месяцах, кварталах или годах. Сезонные волны – это более или менее регулярные изменения временного ряда, возникающие при наступлении конкретного времени года и повторяющиеся с небольшими отклонениями из года в год. К таким колебаниям относятся также изменения, не связанные с временами года, но регулярно повторяющиеся через определенные промежутки времени. Сезонные колебания обычно имеют постоянный период. Случайные колебания вызываются случайными внешними причинами, влияния которых сказывается на уровнях ряда, искажая тенденцию, а также сезонные и циклические колебания.

Построим модель сезонной волны месячных расходов электроэнергии электрифицированных участков, используя гармонический анализ. Рассмотрим X_1, X_2, \dots, X_p – временной ряд, описывающий изменения месячных расходов электроэнергии X_t ($t=1, p$) тяговой подстанции. Обозначим через $X(t)$ предполагаемую теоретическую зависимость, соответствующую экспериментальной. Функцию $X(t)$ в исследуемом интервале времени можно при выполнении некоторых условий представить рядом синусоидальных и косинусоидальных функций (рядом Фурье), например, если функция кусочно-монотонная и ограничена (условия Дирихле). Вообще, если есть p наблюдений, то число гармоник не будет превышать $\frac{p}{2}$. Запишем $X(t)$ в виде суммы $\frac{p}{2}$ гармоник:

$$X(t) = A^{(0)} + \sum_{i=1}^{p/2} \left[A^{(i)} \sin\left(\frac{2\pi}{p} it\right) + B^{(i)} \cos\left(\frac{2\pi}{p} it\right) \right]. \tag{2}$$

Коэффициенты $A^{(i)}$ и $B^{(i)}$, $A^{(0)}$ оцениваются по методу наименьших квадратов. Если подставить их в (2), то получим выражение для прогноза. Например, прогноз на момент $t = p+1$ равен:

$$X(p+1) = A^{(0)} + \sum_{i=1}^{p/2} \left[A^{(i)} \sin\left(\frac{2\pi}{p} i(p+1)\right) + B^{(i)} \cos\left(\frac{2\pi}{p} i(p+1)\right) \right]. \tag{3}$$

Алгоритм метода прост в вычислительном отношении: по заданному временному ряду следует лишь рассчитать оценки параметров $A^{(0)}$, $A^{(i)}$, $B^{(i)}$, модели сезонной волны (3). Произведём выбор рациональной длины базы прогноза и рационального количества членов в (3). В таблице 1 приведены фактические месячные расходы активной электроэнергии одной из подстанций постоянного тока Приднепровской ж.д.

Таблица 1

Месячные расходы активной электроэнергии исследуемой подстанции, тыс. кВт·ч

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2010	12,23	10,95	11,58	9,11	8,05	7,53	7,87	8,9	8,84	11,14	13,24	12,91
2011	12	10,42	10,19	7,8	7,92	6,9	7,37	7,21	7,45	9,49	11,77	13,43
2012	13,89	12,22	12,38	9,24	8,12	7,1	8,31	8,56	9,54	11,25	12,13	13,49

Для того, чтобы оценить точность прогноза, составленного на основе гармонического анализа, для построения модели используем первые 24 значения (2010–2011 г.), а на все месяцы 2012 г. составим прогноз и сравним с реальными данными. Построим модель сезонной волны с 12-ю гармониками.

В таблице 2 приведены полученные значения коэффициентов модели, оцененные по методу наименьших квадратов.

Таблица 2

Значения коэффициентов модели (3), полученные по методу наименьших квадратов

 $A^{(0)}=9,76$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$A^{(i)}$	0,611	0,566	0,356	-0,11	0,086	0,461	0,059	0,11	0,098	0,343	0,10	$\frac{2,5 \times}{\times 10^6}$
$B^{(i)}$	-0,16	2,667	0,025	0,451	0,053	0,243	0,166	0,09	0,127	0,066	0,05	-0,11

Определим какая часть общей дисперсии X учитывается 12-ю гармониками. Дисперсия, учитываемая одной гармоникой, определяется по формуле

$$\sigma^{(i)} = \frac{c^{(i)^2}}{2},$$

$$\text{где } c^{(i)} = \sqrt{A^{(i)^2} + B^{(i)^2}}.$$

$$\text{Для последней гармоники } \sigma_p^2 = \frac{C_p^2}{2}.$$

Часть дисперсии, учитываемая определенной гармоникой, представляется в виде отношения величины σ_i^2 к общей дисперсии σ_x^2 .

$$\sigma_x^2 \text{ для нашего ряда равно } \sigma_x^2 = \left[\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} X_t^2 - \left(\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} X_t \right)^2 \right] \frac{24}{23} = 4,54.$$

Значения σ_i^2 равны: $\sigma_1^2=0,199$; $\sigma_2^2=3,72$; $\sigma_3^2=0,064$; $\sigma_4^2=0,233$; $\sigma_5^2=0,0051$; $\sigma_6^2=0,136$; $\sigma_7^2=0,0154$; $\sigma_8^2=0,0095$; $\sigma_9^2=0,0128$; $\sigma_{10}^2=0,061$; $\sigma_{11}^2=0,0074$; $\sigma_{12}^2=0,0129$. Доля общей дисперсии, учитываемая гармониками, приведена в таблице 3.

Таблица 3

Доля общей дисперсии, учитываемая гармониками

№ гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Доля в %	4,38	81,94	1,41	5,13	0,11	3	3,39	0,21	0,28	1,34	0,16	0,2

Общая доля, учитываемая всеми гармониками, составляет 99,92%. Таким образом, периодическая функция, состоящая из двенадцати гармоник, практически точно улавливает колебания временного ряда. Наибольшая часть «колебленности» учитывается второй гармоникой, период которой совпадает с половиной длины нашего временного ряда, состоящего из 24 точек, т.е.

период второй гармоники равен 12 (длине года в месяцах). Отсюда следует, что без ущерба для точности можно было брать намного меньше гармоник, например – 6.

В таблице 4 приводятся прогнозируемые месячные расходы электроэнергии на 2012 год и отклонение от фактических данных:

Таблица 4

Результаты прогноза месячных расходов электроэнергии исследуемой тяговой подстанции на 2012 г. по информации за 2010 и 2011 г.г.

Месяцы 2012 г.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фактическое значение	13,89	12,22	12,38	9,24	8,12	7,1	8,31	8,56	9,54	11,25	12,13	13,49
Прогноз	12,23	10,95	11,58	9,11	8,04	7,52	7,87	8,9	8,84	11,14	13,24	12,9
Отклонение в %	11,9	10,4	6,4	1,4	0,9	5,4	5,2	3,8	7,3	0,9	8,3	4,3

Средняя ошибка составляет 4,6%. Теперь решим эту же задачу, используя информацию только за 2011 год (информацию 2010 года отбросим). Тогда длина временного ряда будет равна 12. Оценки коэффициентов $A^{(0)}$, $A^{(i)}$, $B^{(i)}$ этом случае приведены в таблице 5.

Таблица 5

Оценки коэффициентов $A^{(2)}$, $B^{(2)}$

$A^{(0)}=9,32$

i	1	2	3	4	5	6
$A^{(i)}$	0,74	0,0029	-0,32	-0,095	0,302	0,000008
$B^{(i)}$	2,72	0,79	0,27	0,163	0,27	-0,12

В таблице 6 приводятся прогнозируемые значения месячных расходов электроэнергии на 2012 год с использованием 6-ти гармоник:

Таблица 6

Результаты прогноза месячных расходов электроэнергии для исследуемой тяговой подстанции на 2012 г. по информации за 2011 г.

Месяцы 2012 г.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Фактическое значение	13,8	12,2	12,3	9,24	8,12	7,1	8,31	8,56	9,54	11,25	12,13	13,49
Прогноз	12	10,4	10,1	7,8	7,92	6,89	7,37	7,21	7,45	9,49	11,77	13,43
Отклонение в %	13,6	14,7	17,6	15,6	2,5	2,9	11,3	15,7	21,9	15,6	2,9	0,4

Рисунок 1 иллюстрирует результаты прогноза, приведенные в таблице 4 и таблице 6.



Рис. 1. Результаты прогноза месячных расходов электроэнергии для исследуемой тяговой подстанции по методу сезонной волны

Средняя ошибка составляет 11,22%, т.е. больше, чем при составлении прогноза с использованием информации за два года. Итак, получено, что рациональной базой прогноза можно считать 2 года, рациональное число гармоник в (3) может быть принято равным 6. Следует отметить, что и увеличение базы свыше 2 лет прогноза приводило к ухудшению качества прогнозирования.

6. Выводы

Предложенная в данной статье модель прогнозирования расходов электроэнергии на основе гармонического анализа временного ряда позволяет строить прогнозы со средней ошибкой около 11%. Выбрана величина рациональной базы прогноза для участка Приднепровской железной дороги.

Литература

1. Волобринский С.Д.: *Определение фактических удельных расходов электроэнергии и прогнозирование электропотребления при многономенклатурном производстве* [Текст] / С.Д. Волобринский, А.И. Гельфарб, А.К. Михайлов // Промышленная энергетика. 1970. №5. С.26.
2. Бэнн В.Д.: *Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки* [Текст] / В.Д. Бэнн, Е.Д. Фармер. М.: Энергоатомиздат, 1987. 196с.
3. Меламед А.М.: *Прогнозирование нагрузок электроэнергетических систем для задач оперативного управления* [Текст] / А.М. Меламед, О.А. Скрипко // Изд. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1989. №2. С.159-162.
4. Toyama H.: *Next-day electricity price forecasting on deregulated power market* [Текст] / H. Toyama, T. Senjyu, P. Areekul, S. Chakraborty, A. Yona, T. Funabashi // Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009.-26-10-2009.-С.1-4.
5. Huixin T.: *Day-ahead electricity price prediction based on multiple ELM* [Текст] / T. Huixin M. Bo, W. ShuZhou // Control and Decision Conference (CCDC), 2010 Chinese. 26-5-2010. С.241-244.
6. Huixin T.: *A new modeling method based on bagging ELM for day-ahead electricity price prediction* [Текст] / T. Huixin, M. Bo // Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), 2010 IEEE Fifth International Conference on. 23-9-2010. С. 1076-1079.
7. Митрофанов А.Н.: *Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов* [Текст] / А.Н. Митрофанов. Самара: СамГАПС, 2005.-168с.
8. Шапкин И.Н.: *Нормирование и прогнозирование на железных дорогах (методы, алгоритмы, технологии, расчеты)* [Текст] / И.Н. Шапкин, Р.А. Юсипов, Е.М. Кожанов. М.: Изд. МГУПС, 2006. 265с.

Model prognozowania miesięcznego zużycia energii elektrycznej dla podstacji trakcyjnej na podstawie analizy harmonicznej

Streszczenie

W niniejszym artykule zaprezentowano model prognozowania miesięcznego zużycia energii elektrycznej dla podstacji trakcyjnych na podstawie analizy harmonicznej. Wybrano racjonalne wielkości podstawowe, określono błąd średni.

Słowa kluczowe: prognoza, podstacja trakcyjna, zużycie energii elektrycznej

A Model for Monthly Traction Sub-Station Electric Energy Consumption Forecasting Using Harmonic Analysis

Summary

The paper presents a model for harmonic analysis-based forecasting of monthly electric energy consumption by traction sub-stations. Basic rational values were selected and standard error was defined.

Keywords: Forecast, Traction sub-station, Electric energy consumption