



УДК 658.26:621.31.031-047.72

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ НЕРИТМИЧНО РАБОТАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ



POWER FORECASTING FOR AN OCCASIONALLY OPERATING COMPANY

Шутов Евгений Алексеевич

кандидат технических наук,
доцент отделения Электроэнергетики
и электротехники инженерной школы энергетики,
Томского политехнического университета
shutov@tpu.ru

Капустина Елена Дмитриевна

магистрант отделения Электроэнергетики
и электротехники инженерной школы энергетики,
Томского политехнического университета
Edk4@tpu.ru

Аннотация.

Предмет. В настоящее время для крупных потребителей большое значение уделяется построению качественного прогноза, так как планирование позволяет сократить издержки на покупку электроэнергии.

Цели. Исследование эффективности способов прогнозирования электроэнергии. Внедрение системы прогнозирования на предприятие с неритмичным режимом работы для повышения экономической эффективности.

Методология. В ходе исследования были использован экспериментальный метод для построения прогноза при помощи компьютерной модели.

Результаты. Исследование показало, что для построения краткосрочного прогноза наиболее экономически-эффективным способом является метод однофакторного одиночного прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей, а для среднесрочного – метод деревьев классификации и регрессии.

Выводы. В ходе исследования был сделан вывод о важности снижения ошибки прогнозирования, так как ее уменьшение на 1 % позволяет предприятию экономить примерно 1 млн руб. в год. Основная особенность предприятия – неритмичность работы. Данную специфику наиболее точно отображают искусственные нейронные сети, которые показали самую низкую относительную ошибку прогноза на сутки вперед. Для более длительного прогноза наиболее подходящим является метод деревьев регрессии и классификации, учитывающий также портфель заказов.

Ключевые слова: потребление электроэнергии, прогнозирование электропотребления, искусственные нейронные сети, скользящее среднее, линейная регрессия.

Shutov Evgeny Alekseevich

Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor
in the electric power department
and electrical engineers
of the Power Engineering School,
Tomsk polytechnic university
shutov@tpu.ru

Kapustina Elena Dmitrievna

Graduate student of power engineering
and electrical engineers
at the Power Engineering School,
Tomsk polytechnic university
Edk4@tpu.ru

Annotation.

Subject. At present, for large consumers, great importance is attached to the construction of high-quality prognosis, as planning allows reducing the cost of buying electricity.

Objectives. Research of efficiency of methods of forecasting of electric power. Introduction of a forecasting system for an enterprise with an unusual mode of operation to improve economic efficiency.

Methodology. In the course of the research, an experimental method was used to make a forecast using a computer model.

Results. The study showed that the most cost-effective way to build short-term forecasts is to use one-factor single forecast using artificial neural networks, and in the medium term - the method of classification and regression trees.

Conclusions. The study concluded that it is important to reduce the forecast error, as its reduction by 1% allows the company to save about 1 million rubles per year. The main peculiarity of the enterprise is rhythmicity of the raboot. This specificity is most accurately reflected by artificial neural networks which showed the lowest relative error of forecast for the day ahead. For a longer forecast, the regression and classification tree method, which also takes into account the order portfolio, is the most suitable.

Keywords: power consumption, electricity consumption forecasting, artificial neural networks, moving average, linear regression.

После возникновения оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) для крупных потребителей появилась необходимость в создании системы прогнозирования максимальных почасовых объемов электроэнергии (э/э), а также [1, 2, 3]. Стоимость э/э складывается из стоимости потребленного объема и оплаты за отклонение от прогноза (переход предприятия на балансирующий рынок) [4]. Поэтому для потребителя важно снижать ошибку прогноза, тем самым уменьшать издержки производства.

Для исследования были использованы работы [5, 6, 7, 8], в которых сравниваются различные методы прогнозирования. В данной статье были изучены методы: авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС), искусственных нейронных сетей (ИНС), деревьев классификации и регрессии.



Метод АРПСС наиболее применим для циклических исходных данных, поэтому необходимо отбирать наиболее похожие временные интервалы [9]. Метод ИНС позволяет работать со стохастическими данными, так как сети можно обучать [10]. Деревья классификации и регрессии позволяют строить прогнозы на основе нескольких категорий данных, что позволяет строить наиболее точные модели [11].

На рисунке 1 представлены данные почасового потребления за сутки, на рисунке 2 – данные месячного потребления, на которых отчетлива прослеживается цикличность.

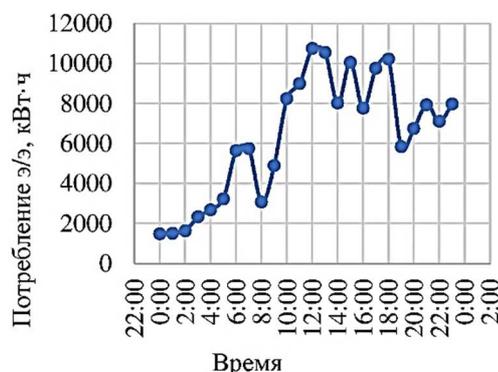


Рисунок 1

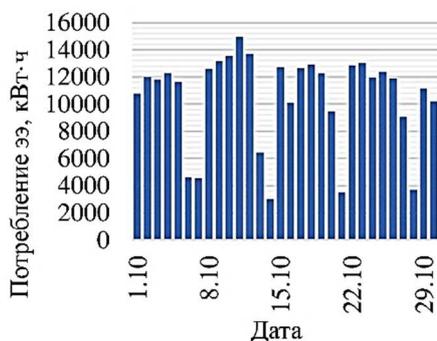


Рисунок 2

Метод АРПСС

Исходные данные являются стохастическими, поэтому выполнен анализ исходных данных (автокорреляционная (АКФ) и частная автокорреляционная (ЧАКФ) функции), выбор прогнозных моделей, добавлена сезонная составляющая. С учетом данных преобразований построен прогноз на сутки вперед, а также проведена проверка гипотезы о нормальности распределения прогнозных данных, ряда остатков, а также вычислена относительная ошибка прогноза [9] (MAPE) (1):

$$MAPE = \frac{100}{L} \sum_{t=1}^L \left| \frac{X_t - \hat{X}_t}{X_t} \right|, \tag{1}$$

где X_t – фактическое значение, \hat{X}_t – значение прогноза, L – количество шагов.

Для данного прогноза относительная ошибка составила 13,66 %.

Если $0 \% \leq MAPE \leq 10 \%$ – высокая точность прогноза, $10 \% < MAPE \leq 20 \%$ – хорошая, $20 \% < MAPE \leq 50 \%$ – удовлетворительная.

Метод ИНС

Анализ проводился с помощью регрессионного анализа временных рядов. После завершения процедуры обучения многослойного перцептрона (МСП) выбрана лучшая сеть по производительности. Для оценки качества прогноза проанализированы нормальный вероятностный график остатков, гистограмма распределения остатков, а также нормальный вероятностный график. Производительность модели составила 99,41 %.

Два метода прогноза были сравнены по относительной ошибке, а также визуально (рис. 3). Метод – ИНС имеет меньшую погрешность, равную 1,88 %, следовательно, является наиболее экономически выгодным.

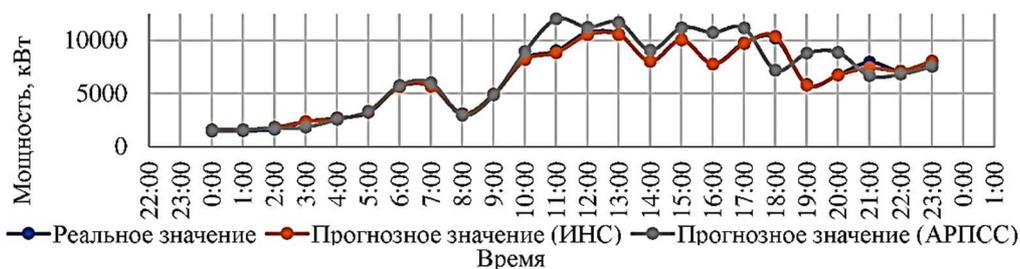


Рисунок 3 – Сравнение фактических и предсказанных объемов потребления э/э

Одномерные модели не учитывают множество факторов, влияющих на потребление электроэнергии, именно поэтому в данной работе исследовано и многофакторное прогнозирование (в данной работе дерево регрессии и классификации) [13]. С помощью программы Statistica были определены наиболее значительные факторы («Литье СЧ-15», «Чушковый чугун», «Жидкое литье», «Количество



плавков») и построено дерево классификации и регрессии (рис. 4), для которого оценивалось качество прогноза по гистограмме распределения остатков, нормальному вероятностному графику, а также сравнивалось с фактическим значением (рис. 5). Средняя относительная ошибка в месяц составила 1,49 %.

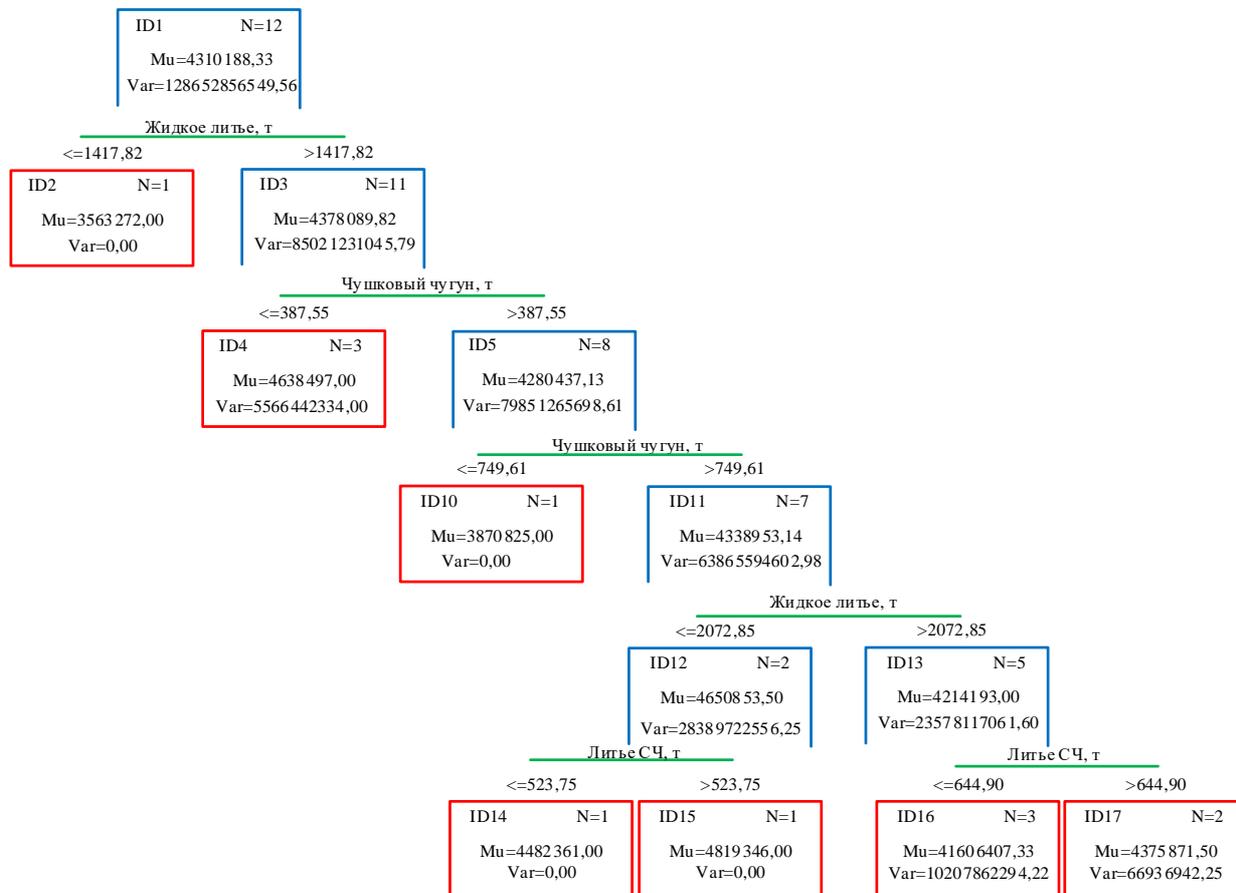


Рисунок 4 – Дерево классификации № 6



Рисунок 5 – Фактические и предсказанные объемы потребления (многофакторный прогноз)

Проведено сравнение экономической эффективности однофакторных прогнозов (табл. 1) [12]. Расчет выполнен по формуле (2) [13]:

$$Z_{э/э} = \sum_{t=1}^{24} W_t \cdot C_t + \sum_{t=1}^{24} W_t \cdot C_{проч} + \sum_{t=1}^{24} W_t^{+(-)} \cdot C_{исбыт}^{+(-)} + \sum_{t=1}^{24} W_t^{+(-)} \cdot C_t^{+(-)} + \frac{P_{ПМ} \cdot C_{ПМ}}{30} + \frac{P_m \cdot C_m}{30}, \quad (2)$$

где W_t – э/э, потребленная предприятием, кВт·ч; C_t – стоимость э/э, руб/кВт·ч; $P_{ПМ}$ – мощность, оплачиваемая на ОРЭМ, кВт; $C_{ПМ}$ – ставка за мощность, приобретаемая на ОРЭМ в месяц, руб/кВт; P_m – мощность за услуги передачи э/э, кВт; C_m – ставка сетевую мощность в месяц, руб/кВт; $C_{проч}$ – плата за иные услуги при передаче э/э, руб/кВт·ч; $W_t^{+(-)}$ – величина отклонения в положительную (отрицательную) сторону фактического от прогнозируемого объема потребления э/э, кВт·ч; $C_{исбыт}^{+(-)}$ – сбытовая надбавка для отклонения прогнозного значения от фактического, руб/кВтч; $C_t^{+(-)}$ – цена на электрическую энергию на ОРЭМ для случаев отклонения прогнозного значения от фактического, руб/кВт·ч.



Таблица 1 – Результаты произведенных расчетов

Алгоритм построения прогноза	Однофакторный одиночный	
	АРСС	ИНС
Относительная погрешность, %	13,66	1,88
Итоговая сумма, руб.	128058150,38	117455981,15

Литература

1. Современная модель рынка электроэнергии. – ООО «Межрегионсбыт». – URL : <http://www.mrsb.ru/modelrinka> (дата обращения: 21.09.2019).
2. Вывод предприятий на ОРЭМ. – Энергогруппа «АРСТЭМ». – URL : http://www.eg-arstem.ru/new/plants/take_out_orem/exitto_orem.htm (дата обращения: 22.09.2019).
3. Регламент допуска к торговой системе оптового рынка : Приложение № 1 к договору о присоединении к торговой системе оптового рынка (ред. от 21.12.2017). – Доступ из ассоциации «НП Совет рынка».
4. О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике (вместе с «Основами ценообразования в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике», «Правилами государственного регулирования (пересмотра, применения) цен (тарифов) в электроэнергетике») – VI. Ценообразование на розничном рынке : Постановление Правительства РФ от 29.12.2011 № 1178 (ред. от 29.06.2019). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Ghaderi S.F., Sohrabkhani S. Forecasting electrical consumption by integration of Neural Network, time series and ANOVA // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0096300306011106> (дата обращения: 20.10.2019).
6. Ghaderi S.F., Sohrabkhani S. A simulated-based neural network algorithm for forecasting electrical energy consumption in Iran // Energy Policy. – 2008. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421508000864> (дата обращения: 20.10.2019).
7. Saeedeh Sadegh S. Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2016. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516303702> (дата обращения: 21.10.2019).
8. Zhanga P., Wang H. Fuzzy Wavelet Neural Networks for City Electric Energy Consumption Forecasting. – Energy Procedia, 2012. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021200584X> (дата обращения: 21.10.2019).
9. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка : учеб. пособие. – Невинномысск, 2006. – 221 с.
10. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс / пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс» – 2006. – 2-е издание. – 1104 с.
11. Шитиков В.К., Мастицкий С.Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. – Электронная книга, 2017. – 351 с. – URL : <https://github.com/ranalytics/data-mining> (дата обращения: 20.01.2020).
12. Тарифы и цены. – АО «Томскэнергосбыт». – URL : <https://ensb.tomsk.ru/> (дата обращения: 03.11.2019).
13. Шутов Е.А., Бабинович Д.Е. Роль прогнозирования в энергоэффективности предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18789210> (дата обращения: 21.01.2020).

References

1. Modern model of the electricity market. – LLC «Mezhregionsbyt». – URL : <http://www.mrsb.ru/modelrinka> (circulation date : 21.09.2019).
2. Withdrawal of enterprises to the Wholesale Electricity Market. – Energogroup «ARSTEM». – URL : http://www.eg-arstem.ru/new/plants/take_out_orem/exitto_orem.htm (date of address : 22.09.2019).
3. Wholesale Market Trading System Admission Regulations : Appendix № 1 to the Agreement on joining the wholesale market trading system (edited from 21.12.2017). – Access from «NP Market Council» Association.
4. On pricing in the field of regulated prices (tariffs) in the electric power industry (together with the «Principles of pricing in the field of regulated prices (tariffs) in the electric power industry», «Rules of state regulation (review, application) of prices (tariffs) in the electric power industry») – VI. Pricing in the retail market : Decree of the Government of the Russian Federation dated 29.12.2011 № 1178 (ed. 29.06.2019). – Access from the reference legal system «ConsultantPlus».
5. Ghaderi S.F., Sohrabkhani S. Forecasting electrical consumption by integration of Neural Network, time series and ANOVA // Applied Mathematics and Computation. – 2007. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0096300306011106> (accessed on 20.10.2019).
6. Ghaderi S.F., Sohrabkhani S. A simulated based neural network algorithm for forecasting electrical energy consumption in Iran // Energy Policy. – 2008. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421508000864> (reference date : 20.10.2019).
7. Saeedeh Sadegh S. Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2016. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516303702> (reference date : 21.10.2019).
8. Zhanga P., Wang H. Fuzzy Wavelet Neural Networks for City Electric Energy Consumption Forecasting. – Energy Procedia, 2012. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021200584X> (contact date: 21.10.2019).



9. Tikhonov E.E. Forecasting methods in market conditions : a training manual. – Nevinnomyssk, 2006. – 221 p.
10. Khaikin S. Neural Networks : full course / per. engl. – M. : Williams Publishing House – 2006. – 2nd edition. – 1104 p.
11. Shitikov V.K., Mastitskiy S.E. Classification, regression and other algorithms of Data Mining with the use of R. – E-book, 2017. – 351 p. – URL : <https://github.com/ranalytics/data-mining> (address date : 20.01.2020).
12. Tariffs and prices. – JSC «Tomskenergosbyt». – URL : <https://ensb.tomsk.ru/> (circulation date : 03.11.2019).
13. Shutov E.A., Babinovich D.E. Forecasting role in the energy efficiency of enterprises // Energy-safety and energy saving. – 2012. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18789210> (date of address : 21.01.2020).