

УДК 519.25, 330.4

DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-4-71-82

EDN: UPCIWQ

Научная статья

Построение трендовой составляющей аддитивной математической модели объема планового производства электрической энергии для повышения энергоэффективности

Т. С. Демьяненко, Л. М. Семенов

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
454080, Россия, г. Челябинск, пр-т им. В. И. Ленина, 76

Аннотация. Декларированная на национальном уровне «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» предполагает комплексную структурную трансформацию энергетического сектора и его переход на качественно новый уровень, обеспечивающий потребности экономического развития страны. Повышение уровня энергетической эффективности – одно из приоритетных направлений политики, обозначенных в энергетической стратегии России на указанный период. В настоящее время предпринимаются шаги по стимулированию потребителей к участию в повышении энергоэффективности и выравниванию графиков нагрузки. Во главу угла вновь становится необходимость высокоточных прогнозов как потребления, так и производства электроэнергии, причем все большее количество предприятий становятся заинтересованными в повышении собственной энергоэффективности и снижении затрат на потребление электроэнергии, а следовательно, в увеличении прибыли. Данное исследование направлено на разработку высокоточной математической модели прогнозирования объема производства электроэнергии. Точность модели повышается за счет введения в модель только доминантных факторов с предварительным определением вида их функциональной зависимости с исследуемым параметром, а также сдвига этих факторов на несколько периодов назад, чтобы использовать в модели уже достоверные значения всех факторов и не строить для них отдельные модели прогнозирования, тем самым не накладывая ошибку прогноза каждого фактора на общую ошибку модели. Величина сдвига обосновывается функцией автокорреляции.

Ключевые слова: повышение энергоэффективности, модель прогнозирования, многофакторная регрессия, определение функциональной связи, выявление доминантных факторов, управление спросом, электроэнергетика, объем планового производства, рынок на сутки вперед, минимальный индекс равновесной цены

Поступила 06.07.2024, одобрена после рецензирования 02.08.2024, принята к публикации 05.08.2024

Для цитирования. Демьяненко Т. С., Семенов Л. М. Построение трендовой составляющей аддитивной математической модели объема планового производства электрической энергии для повышения энергоэффективности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 4. С. 71–82. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-4-71-82

Building the trend component of an additive mathematical model of planned electricity production volume to improve energy efficiency

T.S. Demyanenko, L.M. Semenenko

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"South Ural State University (National Research University)"
454080, Russia, Chelyabinsk, V.I. Lenin prospekt, 76

Abstract. The nationally declared "Energy Strategy of Russia for the Period up to 2035" involves a comprehensive structural transformation of the energy sector and its transition to a qualitatively new level that meets the needs of the country's economic development. Improvement of energy efficiency is one of the priority directions of the policy outlined in Russian energy strategy for this period. Nowadays steps are being taken to encourage consumers to participate in increasing energy efficiency and leveling load schedules. The need for highly accurate forecasts of both energy consumption and production is becoming increasingly important. Moreover, a growing number of enterprises are becoming interested in improving their own energy efficiency and reducing electricity consumption costs, thereby increasing their profits. This research aims to develop a highly accurate mathematical model for forecasting electricity production volume. The accuracy of the model is enhanced by incorporating only dominant factors into the model, with a preliminary determination of the type of their functional dependence on the studied parameter. Additionally, these factors are shifted back by several periods to use reliable values of all factors in the model and avoid constructing separate forecasting models for them. This approach prevents the forecast error of each factor from compounding the overall model error. The magnitude of the shift is justified by the autocorrelation function.

Keywords: improvement of energy efficiency, forecasting model, multifactor regression, determination of functional relationship, identification of dominant factors, demand management, electric power industry, planned production volume, day-ahead market, minimum equilibrium price index

Submitted 06.07.2024,

approved after reviewing 02.08.2024,

accepted for publication 05.08.2024

For citation. Demyanenko T.S., Semenenko L.M. Building the trend component of an additive mathematical model of planned electricity production volume to improve energy efficiency. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 4. Pp. 71–82. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-4-71-82

ВВЕДЕНИЕ

Особенность электроэнергии как товара заключается в одновременности производства и потребления. Энергию невозможно накопить в необходимом количестве и сохранить в каких-либо емкостях, отсюда следует экономическая специфика: невозможно купить больший объем электроэнергии, пока низкая цена, и тем самым сэкономить.

Отсюда вытекают и особенности самого рынка электроэнергии и процессов его организации, такие как необходимость:

- механизмов регулирования спроса и предложения – для балансировки производства и потребления электроэнергии в реальном времени используются такие рыночные механизмы, как биржевые торги мощностью и энергией, сделки по балансировке, свободные торги на рынке балансировки;
- механизмов регулирования и контроля – для обеспечения стабильности энергосистемы и предотвращения непредвиденных сбоев используются такие механизмы регулирования

и контроля, как системы прогнозирования спроса и предложения, регулирование напряжения и частоты, управление нагрузками [1].

Эффективная организация рынка электроэнергии позволяет обеспечить стабильность и надежность энергосистемы, снизить затраты на производство и потребление [2].

Отличительной особенностью конкурентного рынка является возможность потребителя принимать участие в ценообразовании, в противном случае эффективность функционирования данного рынка остается под вопросом. Достаточно длительное время на российском рынке электроэнергетики у потребителя не было возможности оказывать практическое влияние на баланс спроса и предложения и как следствие на стоимость электроэнергии, то есть полностью цену на электроэнергию определяли только производители. Очевидная неэластичность спроса привела к необходимости создания дополнительного регулятора на рынке электроэнергии, в роли которого выступил Системный оператор единой энергетической системы.

Появление цифровых технологий, таких как «интеллектуальные сети», цифровые интервальные счетчики электроэнергии, высокоскоростная телекоммуникация, продолжило развитие рынка электроэнергии в направлении высокоэффективного конкурентного рынка. В конечном итоге появилась технология demand response (управление спросом) [3].

Управление спросом подразумевает снижение энергопотребления конечным потребителем при определенных экономических сигналах рынка электроэнергии с получением выгоды за осуществление такого снижения потребления.

Участие потребителей в технологиях управления спросом позволяет получить индивидуальный экономический эффект (получение платы за оказание услуг) не только им самим, но и всем участникам рынка за счет снижения выработки дорогостоящей электроэнергии низкоэффективными генерирующими мощностями [4].

Помимо всего вышесказанного, энергоэффективность для промышленного предприятия представляет собой отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам на электропотребление. Таким образом, в ряду резервов повышения уровня энергетической эффективности отечественного рынка электроэнергетики особое место принадлежит развитию математического аппарата экономических исследований энергорынка, методов его применения и встраивания в инструментальные средства для повышения обоснованности управленческих решений субъектов электроэнергетики при планировании и прогнозировании их операционной деятельности [1].

Целью исследования является разработка трендовой составляющей аддитивной модели для прогнозирования динамик повышения или снижения спроса на электрическую энергию.

Задачи исследования, которые позволили добиться поставленной цели:

- определение наличия тренда относительно времени;
- определение доминантных факторов, оказывающих наибольшее влияние на объем планового производства электрической энергии;
- определение вида функциональной связи объема планового производства и каждого доминантного фактора;
- построение многофакторной модели трендовой составляющей на основе найденных функциональных связей планового производства электрической энергии и доминантных факторов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные для анализа находятся в открытом доступе и взяты с официального сайта Системного оператора:

- объем планового производства (МВт.ч) – критический объем производства;

- индекс равновесных цен на продажу электроэнергии (руб./МВт.ч) – средневзвешенный индекс равновесных цен за период с начала года по отношению к аналогичному периоду прошлого года;
- объем продажи по регулируемым договорам (МВт.ч) – объемы электроэнергии, не покрываемые регулируемыми договорами, реализуются по нерегулируемым ценам в рамках свободных договоров, рынка на сутки вперед (РСВ) и балансирующего рынка (БР);
- объем продажи на РСВ (МВт.ч) – представляет собой конкурентный отбор ценовых и ценопринимающих заявок поставщиков и покупателей за сутки до реальной поставки электроэнергии с определением цен и объемов поставки на каждый час суток;
- объем покупки в обеспечении регулируемых договоров (РД) (МВт.ч) – объем поставки электроэнергии и мощности по РД для каждого поставщика электроэнергии может составлять не более 35 % от планового объема в балансе производства и поставки электроэнергии и мощности, формируемого федеральным органом исполнительной власти в области государственного регулирования тарифов на текущий период регулирования (календарный год) [4];
- максимальный индекс равновесной цены (руб./МВт.ч) – максимальная цена, при которой нет избытка или дефицита на конкретный товар, то есть величина спроса равна предложению;
- минимальный индекс равновесной цены (руб./МВт.ч) – минимальная цена, при которой нет избытка или дефицита на конкретный товар, то есть величина спроса равна предложению.

Для построения математической модели необходимо формализовать обозначения исходных статистических данных. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Формализованные обозначения исходных данных для построения математической модели трендовой составляющей

Table 1. Formalized designations of initial data for constructing the mathematical model of the trend component

Фактор	Обозначение в модели
Объем планового производства	Y
Индекс равновесных цен на продажу электроэнергии	X_1
Объем продажи по регулируемым договорам	X_2
Объем продажи на РСВ	X_3
Объем покупки в обеспечении РД	X_4
Максимальный индекс равновесной цены	X_5
Минимальный индекс равновесной цены	X_6

Исходные данные представлены в виде набора ежечасной статистики, то есть являются временными рядами. Построение математической модели подобного рода исходных данных, как правило, заключается в моделировании трех аддитивных компонент: тренд, сезонность и случайная компонента. В настоящем исследовании рассматривается построение трендовой составляющей, которая может стать определяющей при дальнейшем моделировании.

В силу того, что исходные статистические данные представлены в виде временных рядов, первоначально необходимо проверить наличие тенденции относительно времени, для чего воспользуемся критерием Фостера – Стюарта, основанным на проверке гипотезы о случайности уровней ряда.

Статистики критерия:

$$S = \sum_{\tau=2}^n S_i; \quad d = \sum_{\tau=2}^n d_i,$$

где $d_i = u_i - l_i$; $S_i = u_i + l_i$; если $x_i > x_{i-1}, \dots, x_1$, то $u_i = 1$, иначе $u_i = 0$; если $x_i < x_{i-1}, \dots, x_1$, то $l_i = 1$, иначе $l_i = 0$

Статистика S используется для проверки наличия тренда в дисперсиях, статистика d – для обнаружения тренда в средних, найденные статистики имеют распределение Стьюдента [5].

Для проверки корреляционных связей воспользуемся коэффициентами корреляции Пирсона и Спирмена. Коэффициент корреляции Пирсона представляет собой статистику, которая измеряет величину линейной связи (корреляцию) между двумя переменными. Для случайных величин X и Y формула вычисления:

$$X, Y = \text{cov}(X, Y) / \sqrt{SX_2SY_2}.$$

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена измеряет степень монотонной связи между двумя переменными. Он основан на рангах значений переменных, а не на самих значениях, что делает его устойчивым к выбросам и асимметриям в данных. Формула вычисления:

$$X, Y = \text{cov}(X, Y) / \sqrt{SX_2SY_2}.$$

Оба коэффициента принимают значения от -1 до 1 . Значение 1 означает идеальную положительную монотонную связь, тогда как значение -1 означает идеальную отрицательную монотонную связь. Значение 0 указывает на отсутствие монотонной связи между переменными.

Проверка на мультиколлинеарность факторов, вводимых в модель, является обязательным шагом при математическом моделировании, целесообразно также воспользоваться двумя коэффициентами Пирсона и Спирмена [6].

Для определения вида функциональной связи между исследуемым параметром и доминантными факторами воспользуемся построением парной регрессии и оценками качества найденного уравнения

1. Точность уравнения оценим с помощью средней абсолютной ошибки в процентах (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y(i) - \hat{y}(i)|}{y(i)} \cdot 100 \%,$$

где $y(i)$ – фактическое значение, $\hat{y}(i)$ – прогнозное значение.

2. Коэффициент детерминации – отношение объясненной части $D(\hat{y})$ дисперсии резуль- тативного признака y ко всей дисперсии $D(y)$. Принимает значения в интервале от 0 до 1 . Чем ближе значение коэффициента к 1 , тем лучше построенная модель описывает исходные данные. Рассчитывается по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}.$$

3. F-критерий Фишера основывается на выдвижении гипотезы H_0 о статистической незначимости уравнения регрессии. Данная гипотеза отвергается и принимается гипотеза H_1 о статистической значимости, если выполняется условие $F_p > F_k$, где F_k – критическое значение F-критерия Фишера для данного объема наблюдений, при числе

степеней свободы $k_1 = k$, где k – число независимых переменных в уравнении регрессии, $k_2 = n - k - 1$ и заданному уровню значимости α . F_p рассчитывается по формуле

$$F_p = (n - 2) \cdot \frac{R^2}{1 - R^2}.$$

4. Значимость коэффициентов уравнения парной регрессии оценивается с помощью t -статистики на основе стандартных ошибок коэффициентов регрессии (S_a, S_b), которые определяются по формулам

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}{(n-2) \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{(n-2) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}};$$

если ошибки ε_i имеют нормальное распределение, то отношения $t_a = \frac{a}{S_a}$ и $t_b = \frac{b}{S_b}$ являются t -статистиками с числом степеней свободы $n - 2$. Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии аналогична оценке статистической значимости всего уравнения [1].

Основной проблемой при построении многофакторных моделей является то, что при построении прогнозного значения исследуемого параметра на несколько периодов вперед значения внешних факторов должны вводиться в модель также на несколько периодов вперед. То есть для прогнозирования необходимо знать будущие значения всех факторов. Рассматриваемые нами внешние факторы модели не являются показателями времени или бинарными, поэтому каждый внешний фактор должен быть отдельно спрогнозирован. Получается, что ошибка прогноза каждого фактора приведет к увеличению ошибки прогноза всей модели. В качестве решения данной проблемы предлагается использовать уже известные значения внешних факторов прошлых периодов.

Для определения, какой глубины исторические значения каждого фактора необходимо использовать, построим функции автокорреляции каждого фактора (коррелограммы), по которым определим сезонность исторических повторений.

Коэффициенты автокорреляции отражают степень тесноты связи между уровнями исходного временного ряда и уровнями ряда, сдвинутыми на один или несколько временных промежутков назад:

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=\tau+1}^n (y_t - \bar{y}_{1\tau}) \cdot (y_{t-\tau} - \bar{y}_{2\tau})}{\sqrt{\sum_{t=\tau+1}^n (y_t - \bar{y}_{1\tau})^2 \cdot \sum_{t=\tau+1}^n (y_{t-\tau} - \bar{y}_{2\tau})^2}},$$

где τ – порядок коэффициента корреляции или лаг (величина сдвига уровней ряда во времени), $\bar{y}_{1\tau} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^n y_t}{n-\tau}$, $\bar{y}_{2\tau} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^n y_{t-\tau}}{n-\tau}$.

С помощью графической интерпретации автокорреляционной функции (коррелограммы) можно определить наличие отдельных компонент функции, описывающей временной ряд.

В качестве математической модели трендовой составляющей аддитивной модели предлагается использовать многофакторную регрессию, учитывающую функциональную связь каждого доминантного фактора с объемом планового производства электроэнергии и сдвиг доминантных факторов на сутки назад.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе данных анализа критерия Фостера – Стюарта существует общая тенденция изменений значений Y со временем, но направление этой тенденции (возрастание или убывание) статистически не подтверждается. Это может означать, что данные демонстрируют

колебания, но без четко выраженной последовательной тенденции в одном направлении. Значения статистик: $s = 13564, d = 13544, t_s = 9,071, t_d = 1,785$ при критическом значении 1,96. Так как наличие тенденции относительно времени статистически не подтверждается, целесообразно в качестве трендовой составляющей построить многофакторную регрессионную модель.

Результаты корреляционного анализа удобнее представлять в виде тепловой карты корреляционной матрицы отдельно для критерия Пирсона (рис. 1) и критерия Спирмена (рис. 2).

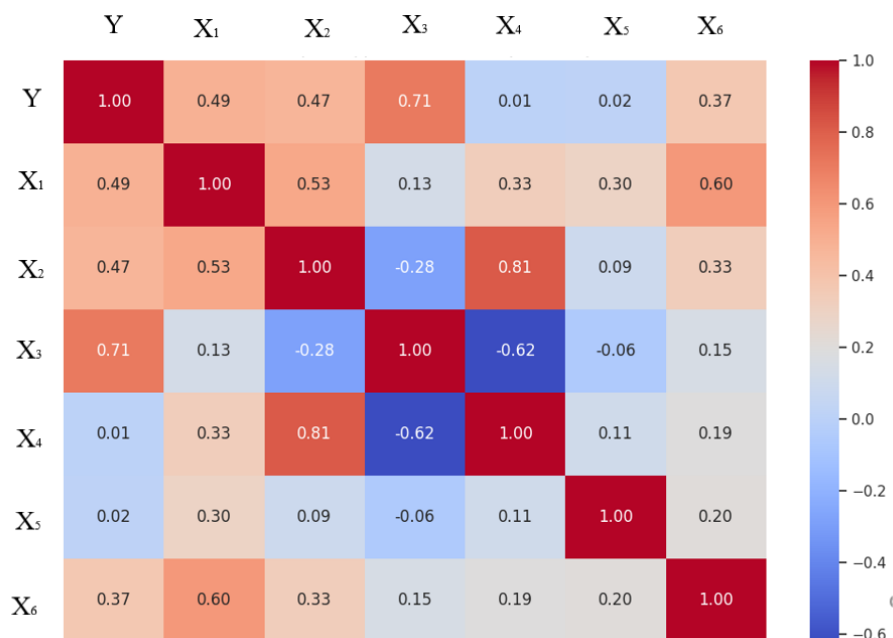


Рис. 1. Тепловая карта корреляционной матрицы критерия Пирсона

Fig. 1. Heatmap of Pearson correlation matrix

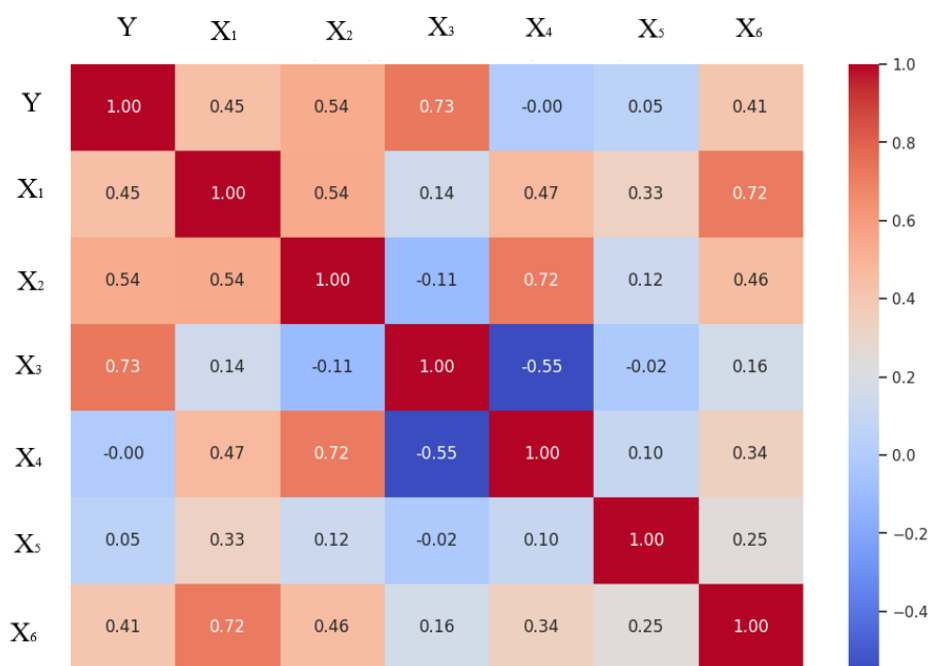


Рис. 2. Тепловая карта корреляционной матрицы критерия Спирмена

Fig. 2. Heatmap of Spearman correlation matrix

Согласно обоим корреляционным коэффициентам, связь между объемом планового производства (Y) и объемом покупки в обеспечении регулируемых договоров (X_4), а также между объемом планового производства (Y) и максимальным индексом равновесной цены (X_5) близка к нулю, следовательно, данные факторы не являются доминантными и будут исключены при построении многофакторной модели. Более высокие значения коэффициентов корреляции Спирмена можно интерпретировать как большую вероятность наличия нелинейной функциональной зависимости.

Согласно таблице Чеддока, корреляционная связь считается сильной при значении коэффициента более $|0,7|$. Можно говорить о сильной нелинейной корреляционной зависимости между индексом равновесных цен на продажу электроэнергии (X_1) и минимальным индексом равновесной цены (X_6), но линейная зависимость между этими факторами находится в допустимой норме, поэтому целесообразно построение многофакторной модели, учитывающей все доминантные факторы (X_1, X_2, X_3, X_6).

Для точного определения вида функциональной связи проведем дополнительное исследование, а именно: построим уравнения парной регрессии объема производства с каждым доминантным фактором разного вида функциональной связи. Результаты представлены в таблице 2. Введенные обозначения: ЛР – линейная регрессия; ГР – гиперболическая регрессия; ЭР – экспоненциальная регрессия; ЛогР – логарифмическая регрессия; КК – коэффициент корреляции Пирсона; КД – коэффициент детерминации; MAPE – ошибка аппроксимации; F – критерий Фишера; t_a – t -статистика Стьюдента для Y -пересечения; t_b – t -статистика Стьюдента для коэффициента при факторе.

Таблица 2. Оценки уравнений парной регрессии четырех функциональных видов для доминантных факторов

Table 2. Estimates of pairwise regression equations for four functional types of dominant factors

Фактор	Модель	Уравнение	КК	КД	MAPE, %	F	t_a	t_b
X1	ЛР	$Y = 68701,92 + 18,93x$	0,490	0,240	9,6	8302,0	239,0	91,1
	ГР	$Y = 104589,53 - \frac{13114318,33}{x}$		0,123	9,7	3674,2	571,6	-60,6
	ЭР	$Y = 70732,20e^{0,0002x}$		0,252	9,5	8829,6	3663,1	94,0
	ЛогР	$Y = -77293,54 + 23892,79 \ln x$		0,251	9,4	8817,3	-42,3	93,9
X2	ЛР	$Y = 83283,37 + 18,93x$	0,471	0,221	9,1	7475,9	587,0	86,5
	ГР	$Y = 106326,38 - \frac{160332138,06}{x}$		0,330	8,4	12958	878,6	-113
	ЭР	$Y = 83144,98e^{0,0001x}$		0,224	9,1	7565,9	7482,3	87,0
	ЛогР	$Y = -20109,51 + 11870,28 \ln x$		0,288	8,7	10614	-18,1	103,0
X3	ЛР	$Y = 33741,36 + 0,86x$	0,714	0,510	7,0	27302	91,3	165,2
	ГР	$Y = 148033,58 - \frac{3723083003,12}{x}$		0,449	7,7	21406	398,7	-146,3
	ЭР	$Y = 49174,13e^{0,0001x}$		0,504	6,8	26688	2718,8	163,4
	ЛогР	$Y = -547644,06 + 57542,58 \ln x$		0,483	7,3	24583	-133,8	156,8
X6	ЛР	$Y = 82949,68 + 13,85x$	0,369	0,136	9,8	4152,6	441,6	64,4
	ГР	$Y = 94699,24 - \frac{453,69}{x}$		0,000	10,1	0,048	1295,0	0,2
	ЭР	$Y = 82732,06e^{0,0002x}$		0,141	9,7	4310,5	5656,6	65,7
	ЛогР	$Y = 61417,46 + 4965,02 \ln x$		0,051	9,9	1311,3	66,6	36,2

Таким образом, между объемом планового производства и индексом равновесных цен на продажу электроэнергии более выражена экспоненциальная функциональная связь, с объемом продажи по регулируемым договорам – гиперболическая связь, с объемом продажи на РСВ и минимальным индексом равновесной цены – экспоненциальная связь. Коррелограммы доминантных факторов представлены на рисунке 3.

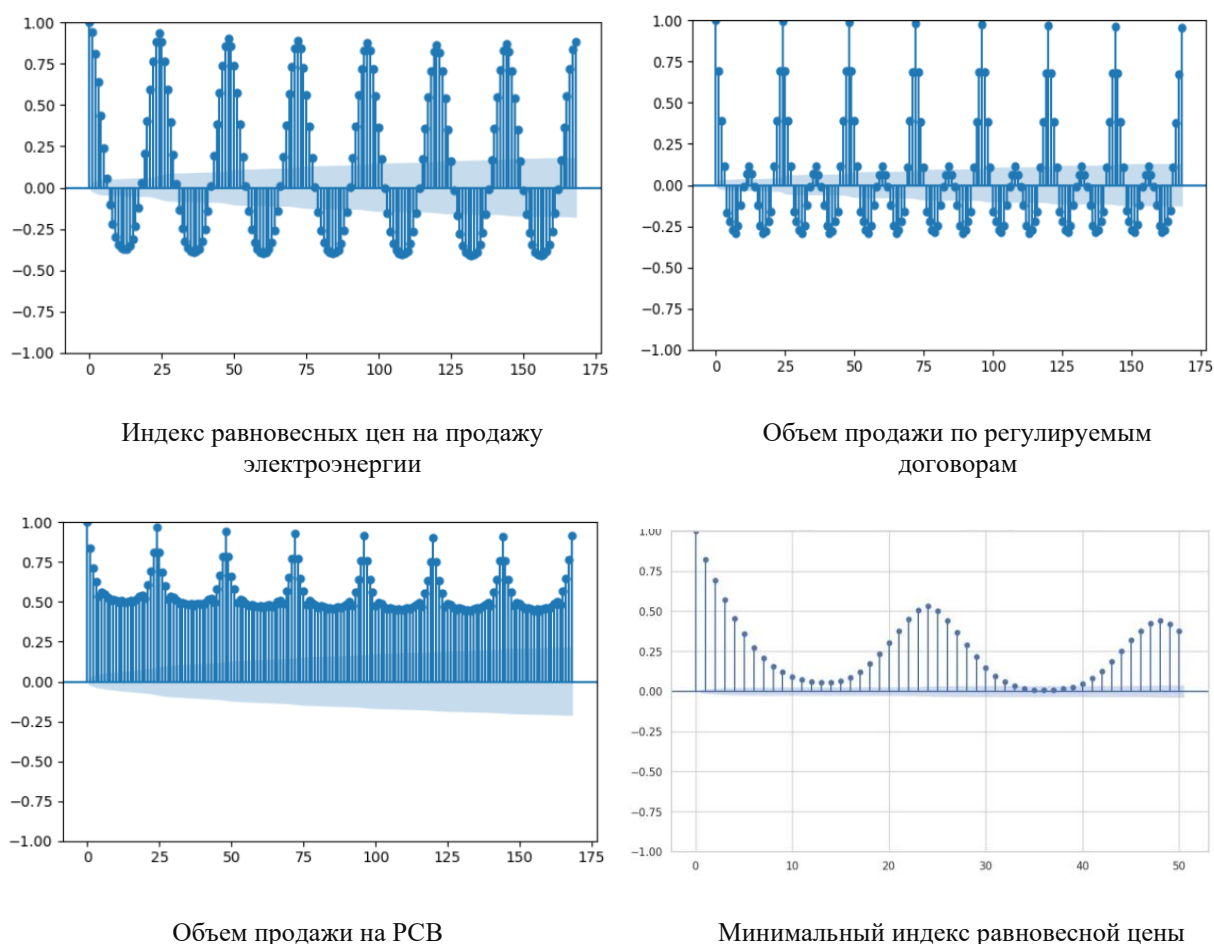


Рис. 3. Графики автокорреляционной функции доминантных факторов

Fig. 3. Graphs of the autocorrelation function of dominant factors

Для всех рассматриваемых доминантных факторов период повторений динамики составляет 24 часа, т.е. сутки. Поэтому для построения модели целесообразно для всех факторов использовать уже известные значения на сутки назад.

При непосредственном экспоненциальном преобразовании исходных данных для введения в модель тренда экспоненциальных функциональных зависимостей могут получиться бесконечно большие значения, поэтому целесообразно вначале применить логарифмическое преобразование ко всем данным, а затем использовать экспоненциальные и гиперболические функции на логарифмически преобразованных значениях.

Получили следующее уравнение трендовой составляющей:

$$Y = 193500 - 6,75e^{x_1} - \frac{1,547 \cdot 10^6}{x_2} + 0,988e^{x_3} + 1,349e^{x_6}.$$

Коэффициент детерминации полученной модели составляет 0,923, само уравнение и его коэффициенты являются статистически значимыми, ошибка аппроксимации составляет 2,59 %. График исходных данных и модельных представлен на рисунке 4.

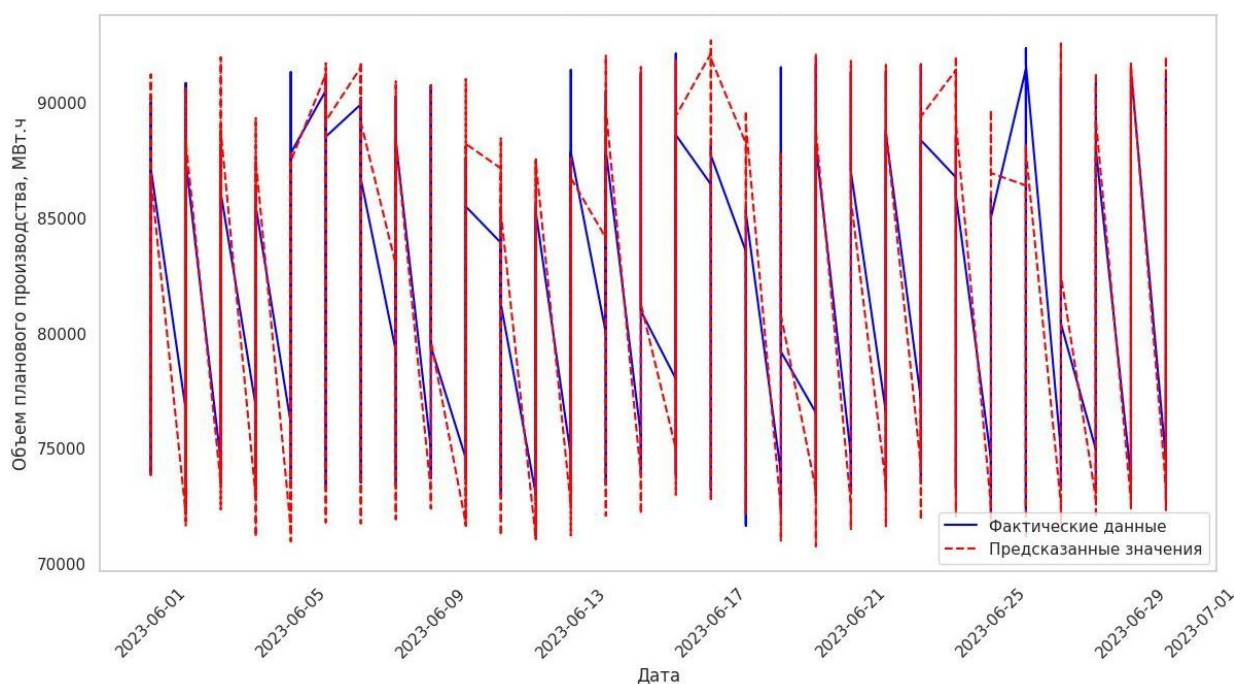


Рис. 4. Графики исходных данных объема планового производства и полученной трендовой составляющей

Fig. 4. Graphs of initial planned production volume data and the obtained trend component

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена следующая последовательность шагов для построения трендовой составляющей временного ряда в виде многофакторной регрессионной модели:

1. Определить наличие тенденции относительно времени с помощью метода Фостера – Стюарта.

2. С помощью коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена определить доминантные внешние факторы и исключить те, у которых наблюдается высокая линейная межфакторная корреляция.

3. С помощью построения парной регрессии разных функциональных видов определить вид преобразований для введения внешних факторов в многофакторную регрессию.

4. Для использования при моделировании уже известных значений внешних факторов, а не предсказанные каждого из них, определить с помощью функции автокорреляции для каждого фактора глубину использования исторических значений.

5. Построить многофакторную регрессию с учетом найденных функциональных связей и сдвига факторов в прошлое, при необходимости предварительно произвести логарифмическое преобразование исходных данных.

Описанная последовательность шагов является универсальной и может быть применена для моделирования временных рядов, имеющих положительные уровни. В качестве научной новизны стоит отметить обоснованную нелинейность многофакторной регрессии с одновременным использованием в качестве внешних факторов известных исторических значений, а не предсказанных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов В. Г., Демьяненко Т. С. Анализ регионального рынка электрической энергии России. Челябинск: ЮУрГУ. 2019. 183 с.
2. Пряхин А. В., Андросина И. С. Особенности оценки инвестиционной привлекательности акций генерирующих компаний // Интернаука. 2023. Т. 42-3(312). С. 11–14. EDN: ZRPNNZ
3. Гатиятуллина Д. А. Энергетический маркетинг как эффективный путь к энергосбережению: теоретические аспекты // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 4. С. 149–158. EDN: OQPVMВ
4. Глазов В. И. Управление спросом на электроэнергию как возможность дополнительного дохода и экономии затрат на электроэнергию для предприятий нефтегазового комплекса // Всероссийская научно-практическая конференция «Вопросы экономики и управления нефтегазовым комплексом». Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина. Москва, 2021. С. 49–50.
5. Клюев Р. В., Моргоева А. Д., Гаврина О. А. и др. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 392–402. EDN: FJGZTVD
6. Мохов В. Г., Демьяненко Т. С. Определение значимых факторов при прогнозировании объема потребления электроэнергии по объединенной энергосистеме Урала на основе регрессионного анализа // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. 2017. Т. 16. № 4. С. 642–662. DOI: 10.15826/vestnik.2017.16.4.031

REFERENCES

1. Mokhov V.G., Demyanenko T.S. *Analiz regionalnogo rynka elektricheskoy energii Rossii* [Analysis of the regional electrical energy market of Russia]. Chelyabinsk: SUSU. 2019. 183 p. (In Russian)
2. Pryahin A.V., Androshina I.S. Features of assessing the investment attractiveness of shares of generating companies. *Internauka* [Interscience]. 2023. Vol. 42-3 (312). Pp. 11–14. EDN: ZRPNNZ. (In Russian)
3. Gatiyatullina D.A. Energy marketing as an effective path to energy saving: theoretical aspects. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University]. 2012. Vol. 15. No. 43. Pp. 149–158. EDN: OQPVMВ. (In Russian)
4. Glazov V.I. Managing the demand for electricity as an opportunity for additional income and saving energy costs for oil and gas enterprises. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Voprosy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom"* [All-Russian Scientific and Practical Conference "Issues of Economics and Management of the Oil and Gas Complex"]. Rossiyskij gosudarstvennyj universitet nefiti i gaza (nacional'nyj issledovatel'skij universitet) imeni I.M. Gubkina. Moscow. 2021. Pp. 49–50. (In Russian)
5. Klyuev R.V., Morgoeva A.D., Gavrina O.A. et al. Forecasting planned electricity consumption for the interconnected power system using machine learning. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. 2023. Vol. 261. Pp. 392–402. EDN: FJGZTVD. (In Russian)
6. Mokhov V.G., Demyanenko T.S. Determination of significant factors when forecasting the volume of electricity consumption in the unified energy system of the Urals based on regression analysis. *Vestnik UrFU. Seriya: Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of UrFU. Series: Economics and management.]. 2017. Vol. 16. No 4. Pp. 642–662. DOI: 10.15826/vestnik.2017.16.4.031. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Демьяненко Татьяна Сергеевна, канд. эконом. наук, доцент кафедры математического и компьютерного моделирования – Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет);

454080, Россия, г. Челябинск, пр-т им. В. И. Ленина, 76;

demianenkots@susu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2420-5356>, SPIN-код: 7170-3021

Семененко Любовь Михайловна, студент группы ET-229, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет);

454080, Россия, г. Челябинск, пр-т им. В. И. Ленина, 76;

lubashtyka28@gmail.com

Information about the authors

Tatyana S. Demyanenko, Candidate of Economics Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling – South Ural State University (National Research University);

454080, Russia, Chelyabinsk, 76 V.I. Lenin prospekt;

demianenkots@susu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2420-5356>, SPIN-code: 7170-3021

Lyubov M. Semenenko, student of the ET-229 group, South Ural State University (National Research University);

454080, Russia, Chelyabinsk, 76 V.I. Lenin prospekt;

lubashtyka28@gmail.com