

УДК 330.4

И. В. Ясеновская

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск,
e-mail: yiv@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

Ключевые слова: электроэнергетика, прогноз электропотребления, временной ряд, методы сезонной декомпозиции и авторегрессионного анализа, Хабаровский край.

Цель исследования заключается в оценке функциональных зависимостей в структуре электропотребления Хабаровского края и построении прогноза электропотребления по оцененным моделям. Теоретическая часть статьи основана на описательном обзоре математического аппарата, использованного автором при разработке методов моделирования электропотребления на территории края. Для подготовки практической части статьи использовалась статистическая информация об объемах электропотребления на территории Хабаровского края, представленная в открытых источниках. В ходе исследования были построены ряд моделей, описывающих тенденции электропотребления на территории края и произведено их сравнение. Выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на электропотребление, а также ряд экономических показателей, влиянием которых при моделировании электропотребления можно пренебречь. С использованием оцененных показателей развития Хабаровского края построен прогноз электропотребления по различным моделям.

I. V. Yasenovskaya

Pacific National University, Khabarovsk, e-mail yiv@mail.ru

MODELING ELECTRICITY CONSUMPTION IN THE TERRITORY OF KHABAROVSK KRAI

Keywords: electric power industry, electricity consumption forecast, time series, seasonal decomposition and autoregressive analysis methods, Khabarovsk Krai.

The purpose of the study is to assess the functional dependencies in the structure of electricity consumption in Khabarovsk Krai and to build a forecast of electricity consumption based on the assessed models. The theoretical part of the article is based on a descriptive review of the mathematical apparatus used by the author in developing methods for modeling electricity consumption in the territory of the region. To prepare the practical part of the article, statistical information on the volume of electricity consumption in Khabarovsk Krai presented in open sources was used. In the course of the study, a number of models were built that describe the trends in electricity consumption in the territory of the region and compared them. The factors that have the greatest impact on electricity consumption, as well as a number of economic indicators, the influence of which can be neglected when modeling electricity consumption, were identified. Using the assessed indicators of the development of Khabarovsk Krai, a forecast of electricity consumption was built using various models.

Введение

В современных условиях одним из важных направлений экономического анализа развития территорий является анализ и прогнозирование потребления электроэнергии, что позволит более эффективно и рационально распоряжаться энергетическими, финансовыми и людскими ресурсами, оптимально располагать во времени и пространстве строительство новых электрогенерирующих сооружений. Электроэнергетика – одна из важнейших отраслей экономики страны, ведь от того, насколько развит ТЭК, и в частности его электроэнергетическая составляющая, зависит, как будет функционировать экономическая

система в целом. Производство электроэнергии всецело зависит от ее электропотребления, поэтому точный и достоверный прогноз даст необходимую информацию об объеме и структуре потребления электроэнергии, что позволит генерирующим компаниям [1]:

- создать оптимальный график генерации электроэнергии в пространстве и времени;
- своевременно и наиболее эффективно обеспечивать собственную потребность в ресурсах;
- с наименьшими издержками проводить плановые ремонты и модернизацию оборудования;

- разработать стратегию развития отрасли на ближайшую и среднесрочную перспективу;

- повысить эффективность сотрудничества между различными генерирующими компаниями.

В долгосрочной перспективе достоверные прогнозы географической структуры спроса на электроэнергию позволят наиболее рационально вести строительство капитальных электроэнергетических объектов. Это все приведет к снижению издержек на производство электроэнергии, позволит более эффективно, рационально и с большей степенью надежности снабжать другие отрасли экономики электроэнергией, что в свою очередь будет способствовать развитию экономики отдельного региона.

Цель исследования заключается в оценке функциональных зависимостей в структуре электропотребления Хабаровского края и построении прогноза электропотребления по оцененным моделям.

Материал и методы исследования

Методические подходы, использованные автором при разработке методов анализа и моделирования, оценивания и прогнозирования спроса на электроэнергию основан из работах О. Деминой [2], А. Макарова [3], а также А. Новака [5].

Социально-экономическая информация и нормативные документы, необходимые для применения инструментов прогнозирования, а также для спецификации модели функциональной зависимости потребления электроэнергии от различных факторов, была взята из следующих официальных статистических источников и положений [7-10].

Результаты исследования и их обсуждение

Основываясь на теоретической функции электропотребления, структуре и тенденции потребления электроэнергии Хабаровского края и исследований прошлых лет можно выделить основные гипотезы факторной зависимости электропотребления и составить следующие математические модели для их описания.

1. Многофакторная модель учета агрегированного выпуска промышленности в сопоставимых ценах.

$$E = \alpha + \beta_1 \text{IndProd} + \beta_2 \text{Agr} + \beta_3 \text{Com} + \beta_4 \text{Trans} + \gamma_1 \text{RDD} + \gamma_2 \text{LvSq} + \gamma_3 \text{Pop} + v \text{Price} + \varphi \text{Temp} + \varepsilon, \quad (1)$$

В данной модели электропотребление на территории Хабаровского края определяется уровнем и динамикой следующих факторов:

E (Electricity consumption) – валовое потребление электроэнергии, млн. кВт·ч;

IndProd (Industrial Production) – агрегированный объем выпуска промышленной продукции, млн. рублей;

Agr (Agricultural Production) – агрегированный объем выпуска сельскохозяйственной продукции, млн. рублей;

Com (Commercial) – объем платных услуг населению в т.ч.: бытовые, пассажирский транспорт, связь, жилищно-коммунальные, услуги предприятий культуры и здравоохранения, туризм, физкультура, спорт и др., млн. рублей;

Trans (Goods Transportation) – железнодорожные грузоперевозки, млн. т. км.;

RDD – реальные денежные доходы населения, рублей;

LvSq (Living Square) – площадь жилого фонда, тыс. кв. м;

Pop (Population) – численность населения, тыс. человек;

Price – средний тариф на электроэнергию, рублей;

Temp (Temperature) – среднемесячная температура, градусы цельсия.

Получается модель функциональной зависимости электропотребления от основных показателей экономической активности и уровня жизни населения с поправкой на природно-климатические условия. В данной спецификации переменные экономической активности используются в сопоставимых ценах.

2. Многофакторная модель с учетом декомпозиции промышленного производства.

Основной задачей модели является выявить эмпирическим путем, какие отрасли промышленности оказывают наибольшее влияние на потребление электроэнергии в крае и оценить электроемкость продукции данных отраслей, при учете других социально-экономических факторов. Поэтому помимо включения факторов из предыдущей модели, общий объем выпуска промышленной продукции был разбит на составляющие, а именно:

$$E = \alpha + \beta_1 \text{Steel} + \beta_2 \text{Engin} + \beta_3 \text{Coal} + \beta_4 \text{Oil_Ref} + \beta_5 \text{Agr} + \beta_6 \text{Com} + \beta_7 \text{Trans} + \gamma_1 \text{RDD} + \gamma_2 \text{LvSq} + \gamma_3 \text{Pop} + \nu \text{Price} + \varphi \text{Temp} + \varepsilon, \quad (2)$$

Steel – физический объем выплавки стали, тыс. т;

Engin (Engineering Industry) – объем выпуска машиностроительной отрасли, млн. рублей;

Coal – физический объем добычи угля, тыс. т;

Oil_Ref (Oil Refinery) – физический объем первичной переработки нефти, тыс. т.

При построении модели были выбраны именно эти отрасли производства, так как качественный анализ структуры экономики и электропотребления Хабаровского края, а также мнение экспертов [2-5] свидетельствуют, что именно эти отрасли являются основными объектами спроса на электроэнергию. Выпуск машиностроения дает около 40% общего выпуска промышленности, металлургия признается наиболее электроемкой отраслью, электроемкость и объем выпуска добывающей и нефтеперерабатывающей промышленности так же достаточно высоки на территории края. В качестве характеристики добывающей промышленности была взята добыча угля, так как именно угледобывающая промышленность является основным потребителем электроэнергии. Добыча других полезных показателей не является электроемкой и происходит на отдаленных участках от ЛЭП с использованием автономных источников питания.

3. Моделирование электропотребления на основе учета временного тренда и сезонных колебаний.

Данные модели являются улучшенной версией общей модели экстраполяции тренда, которые за счет более сложного механизма формирования взаимосвязей позволяют учесть колебания темпов прироста уровней ряда и дать достаточно точный прогноз на основании предыдущих наблюдений. Отличительной особенностью таких моделей является отсутствие необходимости в поиске сопутствующей информации для осуществления прогноза, которая в свою очередь обычно является оцененной с той или иной степенью точности, что подрывает достоверность прогноза по регрессионным моделям.

Кроме того, использование моделирования на основе временных рядов обусловлено

наличием сезонных колебаний в электропотреблении региона, так как именно модели временных рядов наилучшим образом объясняют механизм их формирования. Данные типы моделей предусматривают разложение ряда с помощью аддитивного или мультипликативного методов сезонной декомпозиции, а также использование авторегрессионных моделей с учетом сезонности.

Исходя из предложенных трех подходов к анализу зависимости электропотребления от основных социально-экономических показателей развития региона, а также природно-климатических условий, с учетом принятых обозначений специфицируем общие эконометрические функции для территории Хабаровского края.

1. Многофакторная модель учета агрегированного выпуска промышленной продукции в сопоставимых ценах:

$$E = 0.0227\text{Rdd} + 0.0268\text{Rdd}(-1) - 0.0251\text{Rdd}(-2) + 0.0127\text{IndProd} + 0.0518\text{Trans} - 10.44\text{Temp} + 0.292\text{Pop} - 171.43\text{Price} + \varepsilon.$$

Анализ полученной модели позволяет сделать выводы о:

- значимом влиянии на электропотребление выпуска промышленности и объема грузоперевозок;
- не значимом влиянии на электропотребление сельскохозяйственной отрасли и сферы услуг, это обуславливается тем, что показатели, характеризующие развитие этих отраслей, были исключены из модели при проверке на значимость;
- сильном влиянии природно-климатических условий на электропотребление;
- присутствии сезонной составляющей, не связанной с температурным режимом.

Кроме того, подтверждена гипотеза о сдерживающем влиянии реального тарифа на электроэнергию на ее потребление. Правда значимость данного показателя варьируется при использовании различных спецификаций модели. Наиболее значимым тариф на электроэнергию является при совместном его использовании с показателями реальных денежных доходов населения и его численности, что говорит о большем влиянии тарифа на потребление электроэнергии населением, нежели предприятиями [6]. Это вполне резонно, так как предприятия в любом случае закладывают тариф на электроэнергию в цену своей продукции,

тем более обоснованным это предположение является на фоне опережающего роста тарифов для населения.

2. Многофакторная модель с учетом декомпозиции промышленного производства:

$$E = 464,6 + 0,426Steel + 0,007Engin + \\ + 0,038Trans - 10,77Temp - 65,36feb + \varepsilon_t.$$

В данной модели факторы отвечающие за потребление электроэнергии населением ушли в константу так как с течением времени, в помесечном периоде, показатели численности населения и площади жилого фонда практически не изменяются, и, следовательно, учитывая низкую вероятность того, что дополнительный рубль дохода домохозяйства будут тратить на увеличение своего электропотребления, потребление населения в краткосрочном периоде есть величина постоянная. Основной упор объяснения изменений электропотребления ложится на две отрасли промышленности (металлургию и машиностроение), грузооборот железнодорожного транспорта и изменения температурного режима. Такие отрасли промышленности как нефтепереработка и добывающая промышленность не оказывают значимого влияния на потребление электроэнергии на территории Хабаровского края.

При более детальном анализе остатков, в частности при анализе графика распределения остатков эконометрической функции выявлено, что всплески отмечаются в феврале каждого года, что подтверждает гипотезу о наличии сезонных колебаний в модели, не зависящих от температурного режима. Поэтому для учета сезонной составляющей в модель была введена логическая переменная feb (February), которая построена путем проставления единиц в наблюдениях, датированных февралем и заполнения остальных наблюдений нулями.

Появление в модели сезонной переменной feb, не смотря на учет температур, обусловлено тем, что февраль на несколько дней короче остальных месяцев, а также в феврале значительно увеличивается продолжительность светового дня относительно января и декабря. Соответственно потребление в феврале, при примерно одинаковых средних температурах, будет ниже, чем в январе и декабре. Константа свидетельствует о том, что ежемесячно теряется 464,6 млн. кВт·ч, в сетях, и тратится на производство

общественных благ, услуг, в сельском и коммунальном хозяйстве и других неучтенных отраслях. Оправдываются выдвинутые предположения о том, что основными потребителями электроэнергии в Хабаровском крае являются промышленность и железнодорожный транспорт.

3. Для моделирования электропотребления на основе учета временного тренда методами сезонной декомпозиции и авторегрессионного анализа была использована модель с аддитивным и мультипликативным компонентом. Путем выделения из фактических значений электропотребления сезонной составляющей был получен ряд, исправленный на сезонность. Тенденции показали, что с октября по ноябрь электропотребление в крае выше линии тренда, а с апреля по сентябрь ниже. Причем наибольшее превышение над уровнем тренда происходит в декабре на 37,9% по мультипликативной модели, что соответствует 235,2 млн. кВт·ч, по аддитивной модели.

По данным, исправленным на сезонность была подобрана «лучшая» модель тренда, ею оказалась модель ARIMA(2,1,1) с константой при аддитивных сезонных составляющих. Причем стоит заметить, что в случае использования аддитивной модели наблюдается небольшой рост тренда электропотребления.

Построим прогноз электропотребления с помощью авторегрессионной модели с учетом сезонности для сравнения с методом сезонной декомпозиции. Учитывая тот факт, что периодограмма значений электропотребления определяет период сезонности равным 12 при прогнозировании электропотребления на территории края можно использовать сезонную ARIMA (SARIMA) модель с периодом 12 месяцев. Учитывая основные характеристики модели, а так же соответствие автокорреляции ее остатков процессу белого шума для построения прогноза была выбрана модель SARIMA(0,0,1)×(1,1,4).

Сравним качественные показатели построенных моделей в таблице 1. Все они имеют достаточно хорошие характеристики, а также соответствующие тесты свидетельствуют об отсутствии автокорреляции остатков и гетероскедастичности.

В таблице 2 представлен прогноз электропотребления на базе построенных моделей по оцененным показателям развития региона на период до декабря 2026 года.

Таблица 1

Сравнительные характеристики моделей

Модель	R ²	RMSE	MAPE	Автокорреляция	Гетероскедастичность
1	98,50%	19,15	2,49%	отсутствует	отсутствует
2	98,90%	17,008	2,3%	отсутствует	отсутствует
3	ARIMA(2,1,1)	---	15,9	1,98%	отсутствует
	SARIMA(0,0,1)×(1,1,4)	---	12,54	1,61%	отсутствует

Источник: составлено автором.

Таблица 2

Прогноз электропотребления Хабаровского края на 2026 год

Месяц	Модель 1	Модель 2	Модель 3	
			ARIMA(2,1,1)	SARIMA(0,0,1)×(1,1,4)
январь	1628,3	1635,6	1693,5	1699,4
февраль	1586,3	1548,9	1590,0	1580,3
март	1468,7	1469,9	1579,3	1576,2
апрель	1354,4	1362,0	1456,4	1458,3
май	1318,8	1321,4	1352,0	1349,7
июнь	1180,8	1182,2	1172,6	1179,6
июль	1036,5	1047,4	1083,2	1092,9
август	1253,0	1263,4	1291,5	1202,8
сентябрь	1313,0	1317,0	1417,3	1427,3
октябрь	1458,2	1447,4	1470,3	1481,9
ноябрь	1561,8	1558,6	1572,3	1597,6
декабрь	1667,0	1611,3	1606,1	1622,8
За год:	16826,8	1675,1	17284,5	17268,8
Темп прироста:	0,999	1,004	1,019	1,030

Источник: составлено автором.

С учетом темпов роста электропотребления за последние годы, наиболее вероятными прогнозами можно считать прогнозы по моделям 2 и 3. При сравнении этих моделей следует помнить, что модель 2 опирается на социально-экономические показатели прогнозного периода, а они добыты оценочным путем с определенной долей вероятности, что сказывается на точности прогноза. Поэтому, в том случае, когда известны достаточно точные социально-экономические показатели развития региона или необходимо предсказать электропотребление для решения задач связанных с выходом на заданные показатели более целесообразно использовать модель 1.

Прогнозирование электропотребления при помощи временных рядов показало, что несмотря на более предпочтительные характеристики модели SARIMA, а именно RMSE и MAPE (табл. 1), прогноз по данной

модели немного превосходит тенденции роста электропотребления последних лет, возможно, это связано с достаточно сильным учетом предыдущих значений уровней ряда, когда потребление росло более высокими темпами. В связи с этим большее доверие вызывает прогноз, построенный с помощью сезонной декомпозиции с аддитивным механизмом построения. Однако следует принимать во внимание, что моделирование временных рядов не учитывает влияния на электропотребление социально-экономических показателей, и поэтому при значительных изменениях в структуре производства или бытовой сфере прогнозы, построенные с использованием моделей временных рядов, могут иметь малую верификацию.

Заключение

При исследовании потребления электроэнергии на территории Хабаровского

края было выявлено, что наибольшее влияние на электропотребление оказывают такие отрасли промышленности, как металлургия и машиностроение, а также железнодорожные грузоперевозки. Причем если машиностроение оказывает большее влияние за счет масштаба производства, то металлургия и грузоперевозки за счет электроемкости.

Стоимость электроэнергии оказывает влияние на электропотребление только в случае координации этого показателя с показателями уровня жизни населения. Что говорит о том, что тарифы на электроэнергию влияют только на потребление населения, но не на промышленность. Это обусловлено тем, что промышленность в любом случае закладывает стоимость электроэнергии в произведенные товары и не сильно ощущает наложенного бремени в виде тарифов на электроэнергию. К тому же в настоящее время рост тарифов для населения происходит опережающими темпами. Но, в силу, достаточной стабильности в социальной сфере, а именно незначительности роста площади жилищного фонда и снижения численности населения (темпы их прироста можно принять за 1), влияние бытовой сферы, а вместе с ней и тарифов на электроэнергию, можно принять за постоянную величину. К тому же увеличение денежных доходов населения не приводит к существенным изменениям в электропотреблении, так как достигнута точка насыщения, и население не стремится тратить большую часть своих доходов на электроэнергию с их увеличением.

Сильное влияние на электропотребление оказывают природно-климатические факторы, представленные в исследовании

со среднемесячной температурой. В целом температурный режим влияет на электроемкость производств и бытовых нужд, но так как нет возможности подсчитать электроемкость в различные месяцы, то необходимо включить температурный фактор отдельно. Однако включение в модель температурного режима не избавляет их полностью от влияния сезонности, вызванной латентными факторами, такими как количество дней в месяце и длина светового дня. Это делает целесообразным использования моделей временных рядов для объяснения сезонных колебаний в электропотреблении.

Было выявлено, что несогласованность темпов роста ВРП и темпов роста потребления электроэнергии на территории Хабаровского края вызвана особенностями структуры ВРП края. Рост краевого ВРП происходит за счет роста неэлектроемких отраслей, таких как сфера услуг, торговля, лесная промышленность, в то время как отрасли, оказывающие наибольшее влияние на электропотребление (металлургия и машиностроение), теряют свои позиции в структуре ВРП. Свои позиции в структуре ВРП теряет и в целом промышленное производство, уступая их производству услуг.

Таким образом, были рассмотрены несколько моделей, описывающих тенденции электропотребления на территории Хабаровского края и произведено их сравнение. С использованием оцененных показателей развития Хабаровского края построен прогноз электропотребления по различным моделям. Выделены две наиболее оптимальные модели прогнозирования энергопотребления в регионе и описаны варианты наиболее целесообразного их использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-02-2025-1538 от 27.02.2025 на реализацию программ развития региональных научно-образовательных математических центров).

Библиографический список

1. Баланс энергоресурсов Российской Федерации / ФСГС. 2023. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 15.05.2025).
2. Дёмина О.В. Энергетический комплекс: тенденции и вызовы // Социально-экономическая динамика на Дальнем Востоке России: устойчивые тренды и новые вызовы / отв. ред. П.А. Минакир. Хабаровск: ИЭИ ДВО РАН, 2022. С. 72–101. EDN: TUTHQY.
3. Макаров А.А. Полвека системных исследований развития энергетики СССР и России // Теплоэнергетика. 2020. № 12. С. 5–14. DOI: 10.1134/S0040363620120036.

4. Модельно-информационный комплекс SCANNER. М.: Институт энергетических исследований РАН, 2011. 72 с. URL: http://www.eriras.ru/files/skaner_light.pdf (дата обращения: 15.05.2025).
5. Новак А. ТЭК России сегодня и завтра: итоги и задачи // Энергетическая политика. 2024. 25 января. URL: <https://energypolicy.ru/tek-rossii-segodnya-i-zavtra-itogi-i-zadachi/business/2024/12/25/> (дата обращения: 17.05.2025).
6. Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2021–2027 годы: приказ Минэнерго России от 26 февраля 2021 г. № 88. URL: <https://docs.cntd.ru/document/603666040> (дата обращения: 17.05.2025).
7. Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. URL: <https://base.garant.ru/196681/> (дата обращения: 15.05.2025).
8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023 / ФСГС. 2023. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 18.05.2025).
9. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2022–2028 годы: утверждены приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 28 февраля 2022 г. № 146 «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2022–2028 годы». URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 28.05.2025).
10. Энергетика Дальнего Востока / ПАО «РусГидро». 2024. URL: <https://rushydro.ru/activity/energetika-dalnego-vostoka/?ysclid=lyqt9cddz1315142711> (дата обращения: 12.05.2025).