

Прогнозирование помесечных затрат на электроэнергию

Актуальность данных: сентябрь 2022

1 Введение

1.1 Условные обозначения

Все величины без апострофа (например, « $E_{(m)}$ ») относятся к фактическим значениям. Величины с апострофом (например, « $E'_{(m)}$ ») являются предсказаниями / прогнозируемыми значениями.

Нижний индекс « (m) », где m равно от 1 до 12, обозначает номер прогнозируемого месяца. Знак минус « $(-m)$ » указывает на прошлогоднее значение рассматриваемого месяца.

1.2 Входные данные

Поступающие данные делятся на две категории:

- внутренние: фактическое значения потребленной электроэнергии, плановое и фактическое значения выпущенной продукции;
- внешние (энергосбытовая компания): стоимость электроэнергии (тариф).

1.3 Процесс прогнозирования затрат

Процесс прогнозирования затрат состоит из следующих этапов:

- предсказание помесечного потребления электроэнергии $E'_{(m)}$, кВт·ч;
- прогнозирование помесечной стоимости электроэнергии $T'_{(m)}$, руб./кВт·ч;
- расчет помесечных затрат на электроэнергию $C'_{(m)}$, руб., путем перемножения найденных величин:

$$C'_{(m)} = E'_{(m)} \cdot T'_{(m)}. \quad (1)$$

Расчет прогнозируемых затрат на электроэнергию производится в начале каждого месяца, после чего данные передаются в финансовый отдел.

2 Текущая методология UL

2.1 Предсказание потребления электроэнергии

Для каждого прогнозируемого месяца при помощи функции «*TREND*» в программе «*Excel*» рассчитываются значения расхода электроэнергии по каждому участку (фабрика, компрессорный цех и т.д.) в зависимости от плана производства и далее эти предсказания суммируются для нахождения общего месячного потребления.

$$E'_{(m)} = E'_{\text{фбр.}(m)} + E'_{\text{КЦ}(m)} + E'_{\text{ВО}(m)} + E'_{\text{скл.}(m)} + E'_{\text{прч.}(m)} + E'_{\text{стл.}(m)}, \quad (2)$$

где $E'_{\dots(m)}$ – предсказанное значение расхода электроэнергии по каждому участку, кВт·ч.

Для предсказания используются исторические месячные данные о потреблении и выпуске готовой продукции за предыдущий год и новые поступающие данные за текущий год (см. рисунок 1).

Период	Янв '21	Фев '21	Март '21	...	Дек '21	Янв '22	Фев '22	Март '22	...	Дек '22
Выпуск ГП	факт	факт	факт	...	факт	план	план	план	...	план
Фабрика	факт	факт	факт	...	факт	прогноз	прогноз	прогноз	...	прогноз
КЦ	факт	факт	факт	...	факт	прогноз	прогноз	прогноз	...	прогноз
...
Столовая	факт	факт	факт	...	факт	прогноз	прогноз	прогноз	...	прогноз
Всего	факт	факт	факт	...	факт	прогноз	прогноз	прогноз	...	прогноз

Период	Янв '21	Фев '21	Март '21	...	Дек '21	Янв '22	Фев '22	Март '22	...	Дек '22
Выпуск ГП	факт	факт	факт	...	факт	факт	план	план	...	план
Фабрика	факт	факт	факт	...	факт	факт	прогноз	прогноз	...	прогноз
КЦ	факт	факт	факт	...	факт	факт	прогноз	прогноз	...	прогноз
...
Столовая	факт	факт	факт	...	факт	факт	прогноз	прогноз	...	прогноз
Всего	факт	факт	факт	...	факт	факт	прогноз	прогноз	...	прогноз

Период	Янв '21	Фев '21	Март '21	...	Дек '21	Янв '22	Фев '22	Март '22	...	Дек '22
Выпуск ГП	факт	факт	факт	...	факт	факт	факт	план	...	план
Фабрика	факт	факт	факт	...	факт	факт	факт	прогноз	...	прогноз
КЦ	факт	факт	факт	...	факт	факт	факт	прогноз	...	прогноз
...
Столовая	факт	факт	факт	...	факт	факт	факт	прогноз	...	прогноз
Всего	факт	факт	факт	...	факт	факт	факт	прогноз	...	прогноз

Рисунок 1 – Иллюстрация текущего алгоритма предсказания общего потребления электроэнергии (**зеленая заливка** – фактические значения, используемые для предсказания при помощи функции «TREND», **желтая заливка** – предсказания)

2.2 Прогнозирование стоимости электроэнергии

Прогнозирование стоимости электроэнергии осуществляется путем увеличения на (4...6)% прошлогоднего фактического тарифа рассматриваемого месяца:

$$T'_{(m)} = (1,04...1,06) \cdot T_{(-m)}. \quad (3)$$

2.3 Результаты

Накопительная ошибка относительно фактического значения за 2022 год (с января по сентябрь) по текущей методологии UL составляет:

- потребление электроэнергии: минус 5,14%;
- стоимость электроэнергии: минус 5,67%;
- затраты на электроэнергию: минус 10,48%.

Видно, что для всех величин расхождение с фактическим значением идет в меньшую сторону (недозакладывание). Полные результаты расчетов по текущей методологии представлены в Приложении А (таблица А.1).

2.4 Проблематика

Текущая методология прогнозирования затрат на электроэнергию имеет следующие ограничения:

- использование данных только за прошлый год не позволяет учесть влияние временного тренда;
- во время прогнозирования и предсказания не учитывается влияние сезонности;
- стоимость электроэнергии устанавливается городской энергосбытовой компанией и никак не зависит от внутренних процессов компании;
- значение тарифа на электроэнергию предоставляется с задержкой в 2-3 недели.

3 Методология ML-1

3.1 Подготовка данных

Для учета сезонности во время предсказания потребления электроэнергии создадим категориальный признак месяца при помощи техники «*One-Hot Encoding*». Пример финальной таблицы представлен на рисунке 2.

period	total	pv_fact	pv_plan	month_1	month_2	month_3	month_4	month_5	month_6	month_7	month_8	month_9	month_10	month_11	month_12
2019-01	592 370	903	981	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019-02	938 369	2 262	2 416	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019-03	1 156 752	2 661	2 750	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019-04	1 280 647	3 351	3 429	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2019-05	1 283 420	3 058	3 116	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2019-06	1 253 019	2 829	2 906	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Рисунок 2 – Пример таблицы данных для предсказания потребления электроэнергии («*period*» - период в формате «*год-месяц*»; «*total*» - фактическое потребление, кВт·ч; «*pv_fact*» - фактический выпуск ГП, тонны; «*pv_plan*» - плановый выпуск ГП, тонны; «*month_1*»...«*month_12*» - признак месяца)

Пример таблицы для прогнозирования стоимости электроэнергии представлен на рисунке 3.

period	tariff
2013-01	1,97
2013-02	2,00
2013-03	2,05
2013-04	2,07
2013-05	2,07
2013-06	1,99

Рисунок 3 – Пример таблицы данных для прогнозирования стоимости электроэнергии («*period*» - период в формате «*год-месяц*»; «*tariff*» - фактическая стоимость, руб./кВт·ч)

3.2 Предсказание потребления электроэнергии

Предсказание потребления электроэнергии относится к задаче регрессии. В качестве модели используется линейная регрессия «*LinearRegression*» из библиотеки «*scikit-learn*».

Чтобы учесть влияние временного тренда, в качестве обучающей выборки принят интервал в 2 года (24 месяца). Обучение производится на фактических значениях выпущенной продукции, предсказание на плановых. По мере поступления актуальных данных обучающая выборка смещается вправо на один месяц, а крайнее значение слева отбрасывается (см. рисунок 4).

Итерация	Янв '20	Фев '20	...	Нояб '21	Дек '21	Янв '22	Фев '22	...	Нояб '22	Дек '22
1				
2				
...
11				
12				

Рисунок 4 – Иллюстрация алгоритма смещения обучающей выборки для предсказания потребления электроэнергии (зеленая заливка – обучающая выборка; желтая заливка – предсказания; серая заливка – месяца, исключенные из обучающей выборки после смещения)

3.3 Прогнозирование стоимости электроэнергии

Прогнозирование стоимости электроэнергии относится к задаче временных рядов. Для её решения используется библиотека «*Prophet*», которая внутри себя автоматически учитывает влияние тренда и сезонности.

Размер обучающей выборки составляет 5 лет (60 месяцев). Смещение выборки осуществляется аналогично, как описано для предсказания потребления электроэнергии. Отличие заключается только в том, что из-за задержки предоставления фактического значения тарифа, обучающая выборка сдвинута на один месяц назад от прогнозируемого месяца (см. рисунок 5).

Итерация	Дек '16	Янв '17	...	Нояб '21	Дек '21	Янв '22	Фев '22	...	Нояб '22	Дек '22
1				
2				
...
11				
12				

Рисунок 5 – Иллюстрация алгоритма смещения обучающей выборки для прогнозирования стоимости электроэнергии (**зеленая заливка** – обучающая выборка, **желтая заливка** – прогноз, **серая заливка** – месяцы, исключенные из обучающей выборки после смещения, **синяя заливка** – месяц, для которого еще неизвестно фактическое значение тарифа)

3.4 Результаты

Накопительная ошибка относительно фактического значения за 2022 год (с января по сентябрь) по методологии ML-1 составляет:

- потребление электроэнергии: 4,30%;
- стоимость электроэнергии: минус 0,78%;
- затраты на электроэнергию: 3,47%.

Полные результаты расчетов по методологии ML-1 представлены в Приложении А (таблица А.2).

4 Методология ML-2

4.1 Отличия

Отличие методологии ML-2 от ML-1 заключается в том, что во время предсказания потребления электроэнергии для обучения модели линейной регрессии используются не фактические, а плановые значения выпуска готовой продукции.

Этот переход обусловлен тем, что согласно статистики фактический выпуск готовой продукции всегда меньше, чем плановый. Поэтому более высокие плановые значения, подставленные в модель, обученную на фактических значениях, заведомо дают завышенные значения потребления.

4.2 Результаты

Накопительная ошибка относительно фактического значения за 2022 год (с января по сентябрь) по методологии ML-2 составляет:

- потребление электроэнергии: 2,43%;
- стоимость электроэнергии: минус 0,78%;
- затраты на электроэнергию: 1,61%.

Полные результаты расчетов по методологии ML-1 представлены в Приложении А (таблица А.3).

5 Сравнение

Результаты расчетов по трем методологиям сведены в таблице 1. Сравнительные графики представлены в Приложении Б.

Таблица 1 – Накопительная ошибка относительно фактического значения за 2022 год (с января по сентябрь), рассчитанная с применением разных методологий

Методология	Потребление, кВт·ч	Стоимость, руб./кВт·ч	Затраты, руб.
UL (текущая)	-5,14%	-5,67%	-10,48%
ML-1	4,30%	-0,78%	3,47%
ML-2	2,43%	-0,78%	1,61%

Из таблицы видно, что накопительная ошибка прогнозирования затрат на электроэнергию, рассчитанная по методологии ML-1, меньше текущей ошибки на 7,01% в абсолютном значении. Улучшение достигнуто, в первую очередь, за счет увеличения точности прогнозирования стоимости электроэнергии, а также и точности потребления.

Доработанная методология ML-2 показывает дополнительное снижение ошибки прогнозирования затрат за счет лучшей точности предсказания общего потребления электроэнергии. Абсолютная разница относительно текущей ошибки составляет 8,87%.

Знак минус перед числом указывает на то, что расхождение с фактическим значением идет в меньшую сторону (недозакладывание).

Приложение А

(справочное)

Результаты прогнозирования потребления, стоимости и затрат на электроэнергию с применением разных методологий

Таблица А.1 – Результаты прогнозирования затрат на электроэнергию по текущей методологии (с января по сентябрь 2022 года)

Период	Выпуск ГП, т			Потребление, кВт·ч			Стоимость, руб./кВт·ч			Затраты, руб.		
	факт	план	ошибка	факт	прогноз	ошибка	факт	прогноз	ошибка	факт	прогноз	ошибка
2022-01	1 799	1 882	4,61%	835 615	960 018	14,89%	3,47	3,38	-2,59%	2 899 584	3 244 861	11,91%
2022-02	2 242	2 367	5,58%	941 295	1 048 793	11,42%	3,46	3,2	-7,51%	3 256 881	3 356 138	3,05%
2022-03	2 425	2 565	5,77%	1 161 409	1 011 249	-12,93%	3,31	3,12	-5,74%	3 844 264	3 155 097	-17,93%
2022-04	2 180	2 259	3,62%	1 077 182	917 979	-14,78%	3,34	3,05	-8,68%	3 597 788	2 799 836	-22,18%
2022-05	2 704	2 803	3,66%	1 285 028	1 257 671	-2,13%	3,47	3,1	-10,66%	4 459 047	3 898 780	-12,56%
2022-06	2 668	2 816	5,55%	1 322 546	1 267 476	-4,16%	3,3	3,25	-1,52%	4 364 402	4 119 297	-5,62%
2022-07	1 929	2 010	4,20%	1 153 159	986 475	-14,45%	3,42	3,25	-4,97%	3 943 804	3 206 044	-18,71%
2022-08	1 413	1 500	6,16%	959 387	805 276	-16,06%	3,45	3,24	-6,09%	3 309 885	2 609 094	-21,17%
2022-09	1 546	1 603	3,69%	878 763	865 625	-1,50%	3,46	3,35	-3,18%	3 040 520	2 899 844	-4,63%
2022	18 906	19 805	4,76%	9 614 384	9 120 562	-5,14%	3,41	3,22	-5,67%	32 716 174	29 288 990	-10,48%

Таблица А.2 – Результаты прогнозирования затрат на электроэнергию по методологии ML-1 (с января по сентябрь 2022 года)

Период	Выпуск ГП, т			Потребление, кВт·ч			Стоимость, руб./кВт·ч			Затраты, руб.		
	факт	план	ошибка	факт	прогноз	ошибка	факт	прогноз	ошибка	факт	прогноз	ошибка
2022-01	1 799	1 882	4,61%	835 615	838 039	0,29%	3,47	3,44	-0,86%	2 899 584	2 882 854	-0,58%
2022-02	2 242	2 367	5,58%	941 295	1 016 821	8,02%	3,46	3,39	-2,02%	3 256 881	3 447 023	5,84%
2022-03	2 425	2 565	5,77%	1 161 409	1 127 782	-2,90%	3,31	3,29	-0,60%	3 844 264	3 710 403	-3,48%
2022-04	2 180	2 259	3,62%	1 077 182	1 085 516	0,77%	3,34	3,36	0,60%	3 597 788	3 647 334	1,38%
2022-05	2 704	2 803	3,66%	1 285 028	1 338 319	4,15%	3,47	3,31	-4,61%	4 459 047	4 429 836	-0,66%
2022-06	2 668	2 816	5,55%	1 322 546	1 354 314	2,40%	3,3	3,37	2,12%	4 364 402	4 564 038	4,57%
2022-07	1 929	2 010	4,20%	1 153 159	1 259 837	9,25%	3,42	3,37	-1,46%	3 943 804	4 245 651	7,65%
2022-08	1 413	1 500	6,16%	959 387	1 064 163	10,92%	3,45	3,36	-2,61%	3 309 885	3 575 588	8,03%
2022-09	1 546	1 603	3,69%	878 763	943 272	7,34%	3,46	3,55	2,60%	3 040 520	3 348 616	10,13%
2022	18 906	19 805	4,76%	9 614 384	10 028 063	4,30%	3,41	3,38	-0,78%	32 716 174	33 851 342	3,47%

Таблица А.3 – Результаты прогнозирования затрат на электроэнергию по методологии ML-2 (с января по сентябрь 2022 года)

Период	Выпуск ГП, т			Потребление, кВт·ч			Стоимость, руб./кВт·ч			Затраты, руб.		
	факт	план	ошибка	факт	прогноз	ошибка	факт	прогноз	ошибка	факт	прогноз	ошибка
2022-01	1 799	1 882	4,61%	835 615	818 327	-2,07%	3,47	3,44	-0,86%	2 899 584	2 815 045	-2,92%
2022-02	2 242	2 367	5,58%	941 295	999 382	6,17%	3,46	3,39	-2,02%	3 256 881	3 387 905	4,02%
2022-03	2 425	2 565	5,77%	1 161 409	1 121 361	-3,45%	3,31	3,29	-0,60%	3 844 264	3 689 278	-4,03%
2022-04	2 180	2 259	3,62%	1 077 182	1 066 594	-0,98%	3,34	3,36	0,60%	3 597 788	3 583 756	-0,39%
2022-05	2 704	2 803	3,66%	1 285 028	1 323 554	3,00%	3,47	3,31	-4,61%	4 459 047	4 380 964	-1,75%
2022-06	2 668	2 816	5,55%	1 322 546	1 332 125	0,72%	3,3	3,37	2,12%	4 364 402	4 489 261	2,86%
2022-07	1 929	2 010	4,20%	1 153 159	1 224 899	6,22%	3,42	3,37	-1,46%	3 943 804	4 127 910	4,67%
2022-08	1 413	1 500	6,16%	959 387	1 036 430	8,03%	3,45	3,36	-2,61%	3 309 885	3 482 405	5,21%
2022-09	1 546	1 603	3,69%	878 763	925 651	5,34%	3,46	3,55	2,60%	3 040 520	3 286 061	8,08%
2022	18 906	19 805	4,76%	9 614 384	9 848 323	2,43%	3,41	3,38	-0,78%	32 716 174	33 242 584	1,61%

Приложение Б

(справочное)

Сравнение ошибок прогнозирования потребления, стоимости и затрат на электроэнергию с применением разных методологий

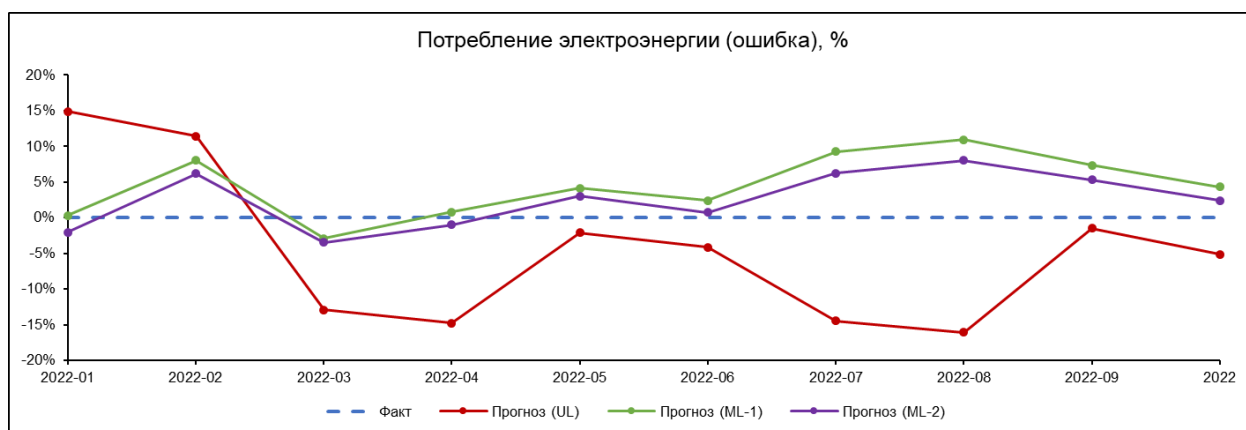


Рисунок Б.1 – Графики ошибок прогнозирования потребления электроэнергии (с января по сентябрь 2022 года)

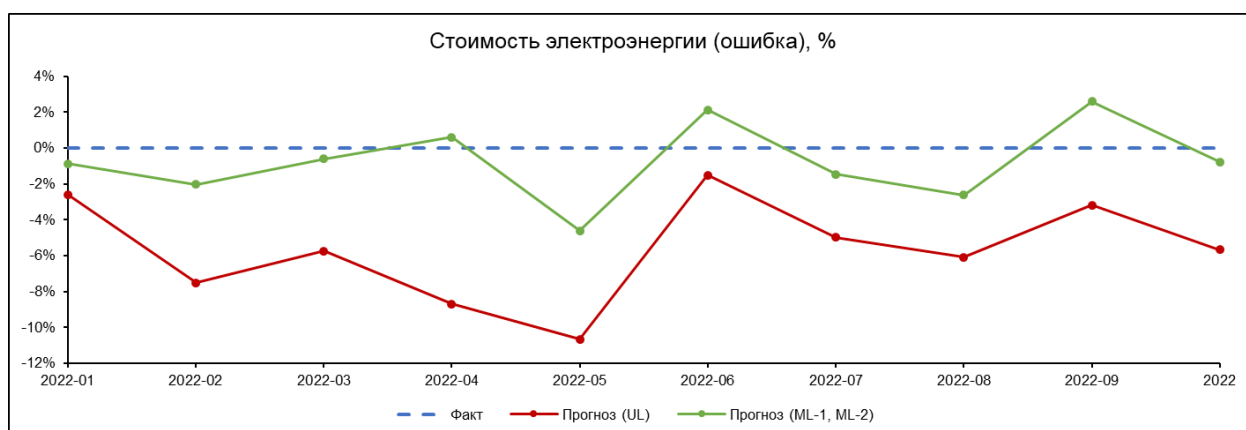


Рисунок Б.2 – Графики ошибок прогнозирования стоимости электроэнергии (с января по сентябрь 2022 года)

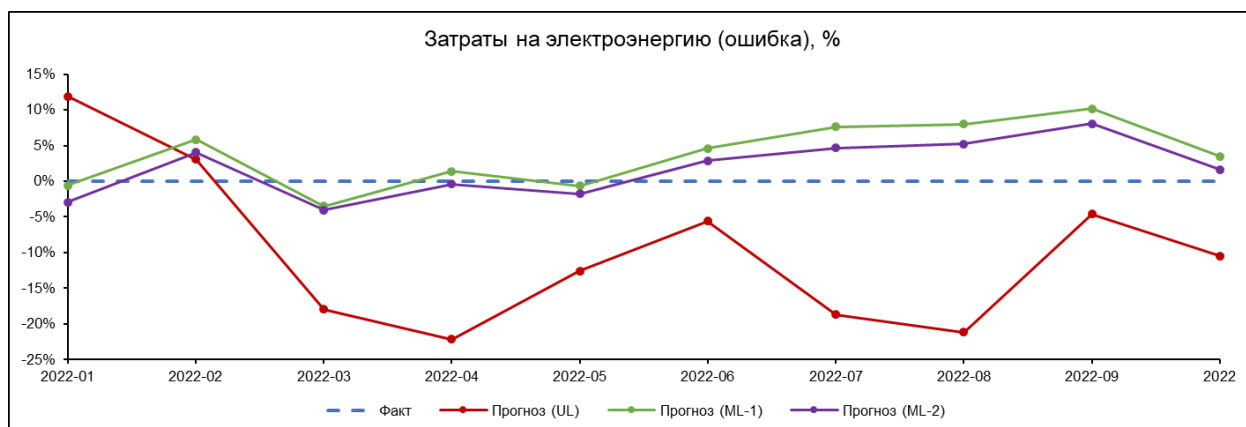


Рисунок Б.3 – Графики ошибок прогнозирования затрат на электроэнергию (с января по сентябрь 2022 года)