

4. Меетлер Толедо. Интернет-ресурс. Режим доступа <https://www.mt.com/ru/ru/home/> 10.05.2022 г.

5. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электро-снабжения общего назначения. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. 31 с.

УДК 629.064.5

*д.т.н., доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»*

*ФГБОУ ВО «АнГТУ», e-mail: nir@angtu.ru*

*Бадеников Артем Викторович,*

*к.т.н., доцент, ректор ФГБОУ ВО «АнГТУ», e-mail: info@angtu.ru*

## УРАВНЕНИЕ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОМПАНИИ

*Balchugov A.V., Badenikov A.V.*

## REGRESSION EQUATION FOR THE ENERGY CONSUMPTION OF AN INDUSTRIAL COMPANY

**Аннотация.** Получено уравнение регрессии для годовых затрат электроэнергии в крупной промышленной компании. Произведен выбор трех определяющих факторов: годовое производство нефтепродуктов и нефтехимии, списочная численность персонала, годовые затраты теплоэнергии. Показано, что с увеличением значений годового производства продукции и списочной численности персонала затраты электроэнергии на предприятии возрастают. Использование теплоэнергии в компании, с одной стороны, приводит к снижению потребления электроэнергии за счет взаимозаменяемости видов энергии, а с другой стороны, обслуживание теплоэнергетического оборудования требует дополнительных затрат электроэнергии. Коэффициенты в уравнении регрессии определены табличным методом (методом Фишера). Уравнение регрессии, связывающее затраты электроэнергии в компании с определяющими факторами, позволит выполнить анализ и прогноз годового расхода электроэнергии в компании в будущем.

**Ключевые слова:** энергопотребление, годовой расход электроэнергии, уравнение регрессии, система линейных уравнений, метод Фишера, расход топливно-энергетических ресурсов, энергосберегающие технологии.

**Abstract.** A regression equation for annual electricity costs in a large industrial company is obtained. The choice of three determining factors was made: annual production of oil products and petrochemicals, headcount, annual costs of heat energy. It is shown that with an increase in the values of annual production and headcount, the cost of electricity at the enterprise increases. The use of thermal energy in the company, on the one hand, leads to a reduction in electricity consumption due to the interchangeability of types of energy, and on the other hand, the maintenance of thermal power equipment requires additional electricity costs. The coefficients in the regression equation are determined by the tabular method (Fischer's method). The regression equation, which links the company's electricity costs with the determining factors, will make it possible to analyze and forecast the company's annual electricity consumption in the future.

**Keywords:** energy consumption, annual electricity consumption, regression equation, system of linear equations, Fisher's method, consumption of fuel and energy resources, energy-saving technologies.

Важным показателем работы промышленной компании являются годовые затраты электроэнергии [1–5]. Этот показатель определяет себестоимость продукции и ее конкурентоспособность на рынке [6–9]. Определим основные факторы, от которых зависят годовые затраты электроэнергии ( $A$ , млн. кВт·ч) в

крупной нефтяной компании [10]. Во-первых, это годовое производство нефтепродуктов и нефтехимии ( $P$ , млн. т.). Во-вторых, списочная численность персонала ( $N$ , тыс. чел.). Очевидно, что с увеличением значений этих двух факторов затраты электроэнергии на предприятии возрастают. В-третьих, затраты теплоэнергии на нефтехимию и газо-

переработку ( $Q$ , Гкал). Использование теплоэнергии в компании, с одной стороны, приводит к снижению потребления электроэнергии за счет взаимозаменяемости видов энергии, а с другой стороны, обслуживание теплоэнергетического оборудования требует дополнительных затрат электроэнергии [11–14]. Актуальным является получение уравнения регрессии, связывающего затраты электроэнергии в компании с определяющими факторами, что позволит выполнять анализ и прогноз годового расхода электроэнергии в компании в будущем.

В годовых отчетах крупной нефтяной компании [10] приведены сведения за 2005–2020 гг. о годовых затратах электроэнергии, а также о значениях указанных факторов: годового производства нефтепродуктов и неф-

техимии, годовых затрат теплоэнергии на нефтехимию и газопереработку и списочной численности персонала. Сведения из отчетов приведены в табл. 1.

Получим уравнение регрессии для затрат электроэнергии в компании методом Фишера [15, 16] по данным табл. 1 в виде:

$$A = a + b_1P + b_2N + b_3Q, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  – коэффициенты регрессии;  $A$  – годовые затраты электроэнергии в компании, млн. кВт·ч;  $P$  – годовое производство нефтепродуктов и нефтехимии, млн. т.;  $N$  – списочная численность персонала компании, тыс. чел.;  $Q$  – годовые затраты теплоэнергии на нефтехимию и газопереработку, Гкал.

**Таблица 1.** Данные о ресурсных затратах нефтяной компании в 2005–2020 гг.

№	$P$ , млн. т.	$N$ , тыс. чел.	$Q$ , Гкал	$A$ , млн. кВт·ч
1 (2015 г)	95,4	262,12	2689	296,123
2 (2014 г)	97,1	248,90	2995	310,901
3 (2016 г)	98,2	274,54	5783	1744,184
4 (2017 г)	109,1	290,04	6062	1787,791
5 (2020 г)	101,4	342,70	6799	2308,307
6 (2018 г)	111,7	304,18	7662	2528,491
7 (2019 г)	107,5	318,00	7483	2569,257
<i>средн.</i>	$P_{cp}=102,9$	$N_{cp}=291,50$	$Q_{cp}=5639$	$A_{cp}=1649,29$

Запишем уравнение регрессии (1) в виде:

$$A = A_{cp} + b_1(P - P_{cp}) + b_2(N - N_{cp}) + b_3(Q - Q_{cp})$$

(2)

Входящие в уравнение (2) коэффициенты регрессии  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  определяются с помощью системы уравнений:

$$\begin{aligned} b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1x_2 + b_3 \sum x_1x_3 &= \sum x_1y, \\ b_1 \sum x_1x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2x_3 &= \sum x_2y, \\ b_1 \sum x_1x_3 + b_2 \sum x_2x_3 + b_3 \sum x_3^2 &= \sum x_3y, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \sum x_1^2 &= \sum (P - P_{cp})^2 = 25117; \\ \sum x_1y &= \sum (P - P_{cp}) \cdot (A - A_{cp}) = 2930535; \\ \sum x_1x_2 &= \sum (P - P_{cp}) \cdot (N - N_{cp}) = 694,60; \\ \sum x_2^2 &= \sum (N - N_{cp})^2 = 645219; \\ \sum x_2y &= \sum (N - N_{cp}) \cdot (A - A_{cp}) = 16422887; \\ \sum x_1x_3 &= \sum (P - P_{cp}) \cdot (Q - Q_{cp}) = 6395224; \\ \sum x_2x_3 &= \sum (N - N_{cp}) \cdot (Q - Q_{cp}) = 33015522; \end{aligned}$$

$$\sum x_3^2 = \sum (Q - Q_{cp})^2 = 247313600;$$

$$\sum x_3y = \sum (Q - Q_{cp}) \cdot (A - A_{cp}) = 1184229632.$$

После подстановки система уравнений (3) примет вид:

$$25117 \cdot b_1 + 694,60 \cdot b_2 + 6395224 \cdot b_3 = 2930535.$$

$$694,60 \cdot b_1 + 645219 \cdot b_2 + 33015522 \cdot b_3 = 16422887.$$

$$6395224 \cdot b_1 + 33015522 \cdot b_2 + 247313600 \cdot b_3 = 1184229632.$$

Для решения системы уравнений (3) воспользуемся табличным методом Фишера [15, 16]. Составим три системы уравнений:

$$c_{11} \sum x_1^2 + c_{12} \sum x_1x_2 + c_{13} \sum x_1x_3 = 1.$$

$$c_{11} \sum x_1x_2 + c_{12} \sum x_2^2 + c_{13} \sum x_2x_3 = 0. \quad (4)$$

$$c_{11} \sum x_1x_3 + c_{12} \sum x_2x_3 + c_{13} \sum x_3^2 = 0.$$

$$c_{21} \sum x_1^2 + c_{22} \sum x_1x_2 + c_{23} \sum x_1x_3 = 0.$$

$$c_{21} \sum x_1x_2 + c_{22} \sum x_2^2 + c_{23} \sum x_2x_3 = 1. \quad (5)$$

$$c_{21} \sum x_1x_3 + c_{22} \sum x_2x_3 + c_{23} \sum x_3^2 = 0$$

$$\begin{aligned} c_{31} \sum x_1^2 + c_{32} \sum x_1 x_2 + c_{33} \sum x_1 x_3 &= 0. \\ c_{31} \sum x_1 x_2 + c_{32} \sum x_2^2 + c_{33} \sum x_2 x_3 &= 0. \quad (6) \\ c_{31} \sum x_1 x_3 + c_{32} \sum x_2 x_3 + c_{33} \sum x_3^2 &= 1. \end{aligned}$$

Сначала определим числа  $c_{ij}$ , а затем получим  $b_1, b_2, b_3$ , удовлетворяющие системе (3), из следующих формул:

$$\begin{aligned} b_1 &= c_{11} \sum x_1 y + c_{12} \sum x_2 y + c_{13} \sum x_3 y. \\ b_2 &= c_{21} \sum x_1 y + c_{22} \sum x_2 y + c_{23} \sum x_3 y. \quad (7) \\ b_3 &= c_{31} \sum x_1 y + c_{32} \sum x_2 y + c_{33} \sum x_3 y. \end{aligned}$$

В соответствии с методом Фишера для решения систем уравнений (4-6) составляются вспомогательные таблицы. Сведем полученные решения в табл. 2.

Таблица 2. Решения систем уравнений (4-6)

№	1	2	3
1	0,013621818	0,001060179	$-4,93774 \cdot 10^{-5}$
2	0,001060179	0,000571575	$-1,03718 \cdot 10^{-5}$
3	$-4,93774 \cdot 10^{-5}$	$-1,03718 \cdot 10^{-5}$	$3,06578 \cdot 10^{-7}$

Табл. 2 симметрична относительно главной диагонали, как и исходные уравнения (3):

$$\begin{aligned} c_{12} &= c_{21}; \\ c_{31} &= c_{13}; \\ c_{32} &= c_{23}. \end{aligned}$$

Выполним проверку правильности решения. Для этого подставим в первое уравнение системы (4)  $c_{11}, c_{12}, c_{13}$ , получим значение 0. Таким образом, результат равен ожидаемому решению.

Вычисляем коэффициенты регрессии по (7):

$$\begin{aligned} b_1 &= -1,43706824 \\ b_2 &= 2,111862316 \\ b_3 &= 0,48021933. \end{aligned}$$

Для проверки последних расчетов подставим полученные величины в первое уравнение из системы (3). Получим:

$$293053 = 293053.$$

Таким образом, проверка показала, что вычисления выполнены правильно.

Уравнение регрессии (2) примет вид:

$$\begin{aligned} A &= 1649,293 - 11,43706824(P - 102,9) + \\ &+ 2,111862316(N - 291,50) + \quad (8) \\ &+ 0,48021933(Q - 5639) \end{aligned}$$

или

$$A = -497,397 - 11,437 \cdot P + 2,112 \cdot N + 0,480 \cdot Q \quad (9)$$

Для проверки адекватности уравнения регрессии (9) найдем расчетные значения функции отклика (табл. 3).

Таблица 3. Проверка адекватности уравнения регрессии

№	Годовые затраты электроэнергии, $A$ , млн. кВт·ч	Расчетные годовые затраты электроэнергии по уравнению (9), $A_p$ , млн. кВт·ч	Ошибка, $\Delta$ , %
1 (2015 г)	296,123	355,963	14,49
2 (2014 г)	310,901	256,378	13,42
3 (2016 г)	1744,184	1736,267	0,45
4 (2017 г)	1787,791	1778,433	0,52
5 (2020 г)	2308,307	2546,909	0,73
6 (2018 г)	2528,491	2538,171	1,21
7 (2019 г)	2569,257	2331,630	1,01

Как видно из табл. 3, уравнение регрессии (9) адекватно описывает данные годовых отчетов компании. Уравнение (9) можно использовать для прогноза расхода электроэнергии в компании [10].

По данным годовых отчетов в промышленной компании широко внедряются энергосберегающие технологии [10]. Эффек-

тивность внедряемых технологий можно оценить по годовому удельному расходу топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [17–19] (ТЭР измеряется в тоннах условного топлива на 1 т продукции,  $T$ , т.у.т./т.пр.). По сведениям, приведенным в отчетах [10], построен график для годового удельного расхода ТЭР (см. рис. 1).

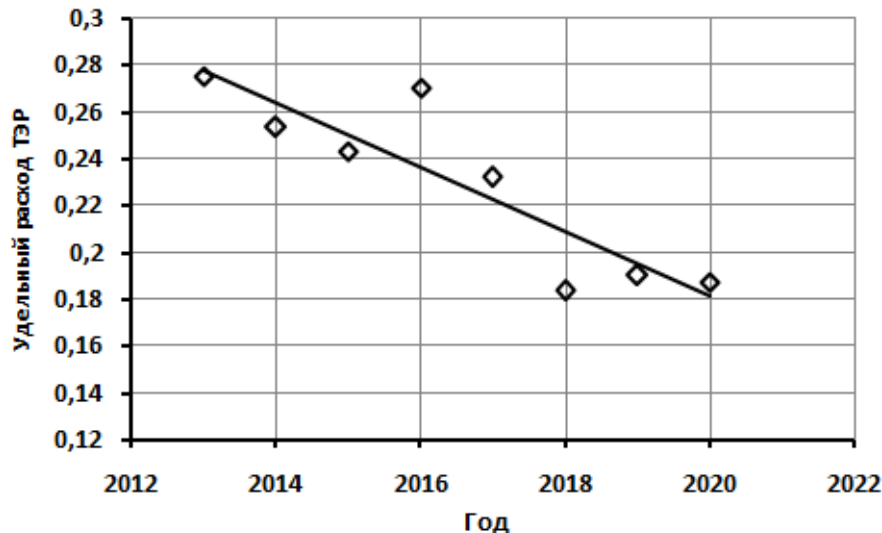


Рис. 1. Удельный годовой расход топливно-энергетических ресурсов

График на рис. 1 свидетельствует о высокой эффективности применяемых в компании энергосберегающих технологий. Видно, что с 2013 по 2020 гг. годовой удельный расход ТЭР снизился на 36 %.

Методом средних [15] получена эмпирическая формула, соответствующая графику на рис. 1:

$$T = -0,013 \cdot n + 27,80 \quad (10)$$

где  $T$  – годовой удельный расход топливно-энергетических ресурсов, т.у.т./т.пр.;  $n$  – год.

Коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sqrt{\sum (T_{\phi} - T_{cp})^2}}{\sqrt{\sum (T - T_{p,cp})^2}} = 0,789, \quad (11)$$

где  $T_{\phi}$  – фактический годовой расход топливно-энергетических ресурсов, т.у.т./т.пр., а  $T$  – расход, вычисленный по эмпирической формуле (10); нижний индекс « $cp$ » – означает среднее арифметическое значение. Коэффициент корреляции составил 0,789. Уравнение (10) позволит выполнять прогноз удельного расхода ТЭР в компании.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайман М.Я.** и др. Некоторые вопросы упрощения математического описания автономной электроэнергетической системы // Изв. ВУЗов СССР. Сер. Энергетика. 1974. №11. С. 8–15.
2. **Демирчян К.С., Бутырин П.А.** Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М. : Высш. шк., 1988. 335 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / под общ. ред. С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. М. : Изд-во МЭИ, 2010. 745 с.
4. Электротехнический справочник. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. М. : Изд-во МЭИ, 2004. 964 с.
5. **Файбисович В.А.** Определение параметров электрических систем: новые методы экспериментального определения. М. : Энергоиздат, 1982. 120 с.
6. Fault location system on double circuit twoterminal transmission lines based on ANNs / I. Zamera, J. Gracia, K. Sagastabeitia, P. Eguia, F. Jurado, et. al. // Proceeding of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto. 2001. Vol. 3. P. 5.
7. **Duggan Eammon, Morisson Robert.** New technique is developed to determine harmonic impedance // Transmiss and Distrieb. Int., 1992. № 2. P. 32–34
8. **Buchholz В.М., Styczynski Z.** Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.
9. **Финоченко Т.Э.** Исследование режимов работы и качества электроэнергии в линиях ДПР // Вестник РГУПС. 2002, № 3. С. 60–62.
10. Годовые отчеты ПАО «НК «Роснефть» за 2005-2020 гг. // АО «Роснефть».

URL: – [https://aoanhk.rosneft.ru/Investors/state\\_ments\\_and\\_presentations/annual\\_reports/](https://aoanhk.rosneft.ru/Investors/state_ments_and_presentations/annual_reports/)

11. **Осин И.Л., Шакарян Ю.Г.** Электрические машины. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.

12. **Rusanov V.A., Antonova L.V., Daneev A.V.** Inverse problem of nonlinear systems analysis: a behavioral approach // *Advances in Differential Equations and Control Processes*. 2012. Vol. 10. No 2. P. 69–88.

13. **Kircher R., Klühspies J., Palka R.** et al. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems // *Transportation Systems and Technology*. 2018. No. 4(2). Pp. 152–166.

14. Примеры анализа и расчетов режимов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / Н.Д. Анисимова, В.А. Веников, В.В. Ежков [и др.]. М.: Высшая школа, 1967. 297 с.

15. **Батунер Л.М., Позин М.Е.** Математические методы в химической технике. Л.: Химия. 1968. 823 с.

16. **Бальчугов А.В., Бадеников А.В.** Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента. Учебное пособие с грифом УМО, Ангарск. АНГТУ. 2021. 179 с.

17. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.

18. **Тран Динь Лонг.** Справочник по качеству электрической энергии. Ханой: Изд-во Ханойского Политехника, 2013.

19. Гидротранспортные топливно-энергетические комплексы / В.И. Мурко, А.К. Джундубаев, М.П. Баранова и др. Красноярск: СФУ, 2015. 250 с.

УДК 621.311

*Засухина Ольга Александровна,*

*доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: olga\_a\_z@mail.ru*

**Ершов Егор Витальевич,**

*обучающийся группы ЭЭ-20-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: egormp3@mail.ru*

**Головатюков Леонид Константинович,**

*обучающийся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: leonid.golovatiukov@mail.ru*

**Шитенков Григорий Александрович,**

*обучающийся группы ЭЭ-22-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: gregoryshitenkov@yandex.ruru*

## БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ (BIG DATA) В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Zasukhina O.A., Ershov E.V., Golovatiukov L.K., Shitenkov G.A.*

### BIG DATA IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY SECTION

**Аннотация.** Рассмотрены перспективы использования технологии больших данных (big data) в области электроэнергетики в России и какие барьеры необходимо преодолеть, чтобы успешно их использовать.

**Ключевые слова:** большие данные, качество электроэнергии, общеэкономический эффект, технологический прорыв, дата-центры.

**Abstract.** The prospects of using big data technology in the field of electric power industry in Russia and what barriers need to be overcome in order to successfully use them are considered.

**Keywords:** big data, electricity quality, general economic effect, technological breakthrough, data centers.

В 2006 году математик Клайв Хамби высказал, пожалуй, один из ключевых тезисов

XXI века: «Данные — это новая нефть. Как и нефть, они ценны, но не сами по себе,