

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-5.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/101TVN517.pdf>

Статья опубликована 02.11.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шаюхов Т.Т. Математическое моделирование влияния внешних факторов на параметры электропотребления // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/101TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.311.1

Шаюхов Тимур Талгатович¹

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Россия, Екатеринбург
Аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта»
E-mail: shayuhov@mail.ru

Математическое моделирование влияния внешних факторов на параметры электропотребления

Аннотация. Применение многофакторных математических моделей при установлении энергопотребления позволяет обеспечить получение точных и обоснованных результатов контроля эффективности использования энергии технологическими объектами.

Однако, построение достаточно сложных регрессионных моделей, включающих большое количество независимых переменных, требует наличия значительных объемов статистических данных, сбор которых является достаточно трудоемким и требует существенных затрат времени.

Статья посвящена вопросам аналитического моделирования процессов влияния различных факторов на потребление электрической энергии (ЭЭ) предприятием. Объектом исследования являются параметры электропотребления цеха производственного предприятия. Предметом исследования выступает система математических соотношений в комплексе с автоматизированными программными продуктами.

В качестве математической модели определения влияния различных факторов на электропотребление автором предлагается представить сложную систему производственного потребления электроэнергии в виде уравнения множественной линейной регрессии, которое должно учитывать взаимосвязь между факторами и дать возможность выделить влияние того или иного фактора на выходную величину.

По результатам исследования, автор приходит к выводу, что представленная модель электропотребления является достаточно универсальной, поскольку ее применение позволяет, располагая данными о факторах, воздействующих на потребление электрической энергии, оценивать степень их влияния при помощи рассмотренных инструментов, строить зависимости и прогнозировать потребление ЭЭ.

Ключевые слова: электропотребление; математическая модель; факторы; электрическая энергия; программные комплексы; аналитическое исследование

¹ 623701, Свердловская обл., г. Березовский, ул. Гагарина 18, кв. 29

Актуальность работы заключается в том, что математическая модель реальной системы электропотребления является формально описанным объектом, исследование которого возможно математическими методами. В такой модели можно выделить наиболее значимые закономерности изучаемого процесса, протекающего в реальной системе.

Математическое моделирование предполагает использование системы совокупности математических соотношений (формул, уравнений, логических условий, неравенств, операторов и т. д.), которые определяют структуру рассматриваемой системы и описывают ее поведение.

Насколько успешно будут решаться задачи анализа систем, напрямую зависит от того, насколько полно дано аналитическое описание поведения системы в целом.

Для электротехнических систем имеют место следующие способы использования математических моделей:

- аналитическое исследование;
- исследование с помощью численных методов;
- моделирование на вычислительных машинах.

Для исследования процессов в действующих системах электроснабжения и электротехнических комплексах наиболее широко применяются численные методы. Особенно активно эти методы стали использоваться с развитием и внедрением информационных технологий и вычислительной техники.

Прежде чем анализировать производственные характеристики объекта, необходимо установить критерии оценки его показателей. Одним из наиболее важных является удельный расход электрической энергии. Он влияет на результаты производственного процесса: себестоимость продукции, конкурентоспособность, энергосбережение и пр.

На удельный расход электроэнергии оказывают влияние как внешние, так и внутренние факторы [1].

Внутренние факторы разделяют на две группы:

- факторы, которые зависят от работы производственного персонала;
- факторы, не зависящие от работы производственного персонала.

К независящим, можно отнести следующие факторы: длительность процесса нагрева алюминия до заданной температуры, производительность оборудования, участвующего в технологическом процессе и пр.

К зависящим факторам следует отнести: эффективность загрузки технологического оборудования (степень и длительность загрузки), длительность горячих и холодных простоев оборудования, продолжительность межоперационных холостых ходов электротехнических и технологических агрегатов.

Кроме вышеперечисленных факторов на электропотребление существенное влияние оказывают: техническое состояние потребителей электроэнергии, режимы их работы, соблюдение режима технологического процесса.

Внутри предприятия в каждом цехе могут иметь место свои условия, которые также влияют на удельные расходы электроэнергии.

Широкая номенклатура производимой продукции обуславливает различные условия производства, методы эксплуатации технологического и электротехнического оборудования,

установленные технологические схемы переработки сырья и материалов, технический уровень оснащения оборудованием и пр. Эти условия приводят к различным удельным расходам электроэнергии на производство внутри одного предприятия.

Многономенклатурные производства с изменяемым ассортиментом продукции, вносят дополнительные сложности при расчете удельных норм электропотребления. Удельный расход, отнесенный на единицу продукции, единицу выполненной работы в денежном или ином выражении, ежегодно будет изменяться. Однако следует выделить факторы, которые наиболее значимо влияют на изменение расхода электроэнергии.

Расход электрической энергии можно описать линейным уравнением [2]:

$$W = W_0 + \omega\Pi \quad (1)$$

где: W_0 – расход электроэнергии, не связанный с технологическим процессом, т. е. с производством товарной продукции;

ω – расход электроэнергии на единицу продукции;

Π – продукция.

Тогда удельное электропотребление можно представить уравнением:

$$\omega = \frac{W}{\Pi} - \frac{W_0}{\Pi} = \frac{W - W_0}{\Pi} \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно увидеть основные направления энергосбережения на предприятии: удельные затраты необходимо уменьшать за счет увеличения Π , т. е. увеличения выпуска товарной продукции и сокращения общих расходов электрической энергии.

Основная задача моделирования состоит в том, чтобы построить аналитическую модель системы в виде математической зависимости функции состояния (зависимая переменная) от параметров состояния (независимые переменные), т. е. получить уравнение состояния системы. Следует отметить, что решение этой задачи связано с определенными трудностями, так как между элементами системы имеется огромное количество связей. Учитывая вышесказанное, целесообразно искать формальное решение, которое будет удовлетворять требованиям логической и количественной обоснованности норм.

Для определения влияния различных факторов на электропотребление следует представить сложную систему производственного потребления электроэнергии в виде уравнения множественной линейной регрессии [3, 4], учитывающего взаимосвязь между факторами и позволяющего выделить влияние того или иного фактора на выходную величину. Чтобы получить множественную регрессионную модель требуется более тщательный отбор факторов.

Удельный расход электроэнергии можно представить уравнением:

$$\omega = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

где: ω – удельный расход ЭЭ;

x_1-x_n – независимые переменные величины (факторы, влияющие на потребление ЭЭ);

b_0-b_n – коэффициенты множественной линейной регрессии.

Факторы в представленной модели могут быть самыми разнообразными. Они определяются с помощью логического анализа, а проверяются формальными приемами статистики.

Перед построением уравнения вида $\omega = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n$ или $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n$, необходимо убедиться, что рассматриваемые факторы значимы, т. е. действительно существенно влияют на результативный показатель y . Для примера были взяты данные по электропотреблению цеха производства алюминиевых теплообменников одного из предприятий Уральского региона за 2014 год с января по декабрь – величина y (кВт*ч), а также динамика четырех факторов x , которые могут влиять на потребление электрической энергии в цехе:

- количество произведенной продукции (шт.) x_1 ;
- градусо-сутки (HDD15) x_2 . Градусо-сутки – показатель, равный произведению разности температуры внутреннего воздуха и средней температуры наружного воздуха за отопительный период на продолжительность отопительного периода;
- потери в цеховых сетях (кВт*ч) x_3 ;
- стоимость тонны алюминия по месяцам за 2014 год (\$) x_4 .

Необходимо оценить степень влияния каждого из факторов на результирующую величину y . Для этого следует рассчитать все возможные комбинации парных коэффициентов корреляции между y и факторами x .

Наиболее удобно выполнять процедуру расчета парных коэффициентов корреляции в программных пакетах *MS Excel* и *Statistica* [5, 6].

В программном пакете *MS Excel* коэффициенты парной корреляции рассчитываются с помощью встроенной функции «КОРРЕЛ».

В пакете анализа данных *Statistica* имеется встроенный инструмент для нахождения парных корреляций между переменными «МАТРИЦА ПАРНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ» (см. табл. 1).

Таблица 1

Таблица для расчета парных коэффициентов корреляции, полученная в *Statistica*

Переменная	Корреляция (Книга1.sta) Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05000$ N = 12 (Построчное удаление ПД)				
	Потребление ЭЭ, кВт*ч	Кол-во произвед. прод., шт. (x1)	HDD 15,5 (x2)	Потери в цеховых сетях, кВт*ч (x3)	Стоимость тонны алюминия, \$ (x4)
Потребление ЭЭ, кВт*ч		0,72	0,48	1,00	0,36
Кол-во произвед. прод., шт. (x1)	0,72		-0,10	0,72	0,79
HDD 15,5 (x2)	0,48	-0,10		0,48	-0,46
Потери в цеховых сетях, кВт*ч (x3)	1,00	0,72	0,48		0,36
Стоимость тонны алюминия, \$ (x4)	0,36	0,79	-0,46	0,36	

Составлено автором

Величина y и фактор x_3 имеют взаимный коэффициент корреляции 1, что говорит о том, что между этими величинами имеется прямая зависимость. Это объясняется тем, что потери электроэнергии в цеховых сетях достаточно стабильны во времени, основная их доля приходится на потери в трансформаторах. Доля потерь возрастает с ростом потребления электроэнергии. Фактор x_3 также исключаем из матрицы взаимных корреляций. Параметр y – потребленная энергия первичен, фактор x_3 – вторичен.

Тогда, исходя из рассчитанных значений коэффициентов корреляции, наиболее значимым будет фактор x_1 (коэффициент корреляции $r = 0,72$). Менее значимые факторы x_2 (коэффициент корреляции $r = 0,48$) и x_3 (коэффициент корреляции $r = 0,36$). Рассчитав значения коэффициентов корреляции, можем определить, какой из факторов в той или иной степени влияет на результирующий показатель y . Условимся, что факторы, коэффициент корреляции которых больше 0,45, для нашего случая будут включены в уравнение регрессии.

Тогда, для рассматриваемого случая уравнение множественной регрессии примет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

Значения y , x_1 , x_2 известны, а коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 требуется найти. В этом и заключается задача решения уравнения множественной линейной регрессии.

Неизвестные коэффициенты b можно отыскать тремя способами:

- 1) с помощью встроенной функции *Excel* «ЛИНЕЙН»;
- 2) с применением встроенного инструмента «МНОЖЕСТВЕННАЯ РЕГРЕССИЯ» в пакете *Statistica*;
- 3) с применением метода наименьших квадратов.

Функция **ЛИНЕЙН** рассчитывает статистику для ряда с применением метода наименьших квадратов, чтобы вычислить прямую линию, которая наилучшим образом аппроксимирует имеющиеся данные и затем возвращает массив, который описывает полученную прямую.

Искомые коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 выделены цветом на табл. 2, 3.

Таблица 2

Результат применения функции ЛИНЕЙН в MS Excel

	B2	b1	b0
	100,4280475	4,75828416	366555,5889
	24,53071949	0,835445626	25269,05256
	0,83342141	27202,23214	#Н/Д
F расчт	22,51427596	9	#Н/Д
	33319391824	6659652902	#Н/Д
F табл	2,228138852		

Составлено автором

Таблица 3

Итоги регрессии для зависимой переменной y , полученные в Statistica

N = 12	Итоги регрессии для зависимой переменной: Потребление ЭЭ, кВт*ч (Книга1.sta)					
	R = 0,91291917 R2 = 0,83342141 Скорректир. R2 = 0,79640395 F(2,9) = 22,514 p < 0,00031 Станд. ошибка оценки: 27202					
	БЕТА	Стд.Ош. БЕТА	В	Стд.Ош. В	T(9)	p-уров.
Св. член			366555,6	25269,05	14,50611	0,000000
Кол-во производ. прод., шт. (x1)	0,778671	0,136717	4,8	0,84	5,69550	0,000296
HDD15,5 (x2)	0,559714	0,136717	100,4	24,53	4,09397	0,002701

Составлено автором

Уравнение регрессии примет вид:

$$y = 366555,6 + 4,76x_1 + 100,43x_2$$

Зная количество произведенной продукции и значение градусо-суток отопительного сезона, мы можем прогнозировать количество потребляемой электроэнергии.

Для оценки соответствия расчетных значений y фактическому потреблению электрической энергии, был построен график (рис. 1):

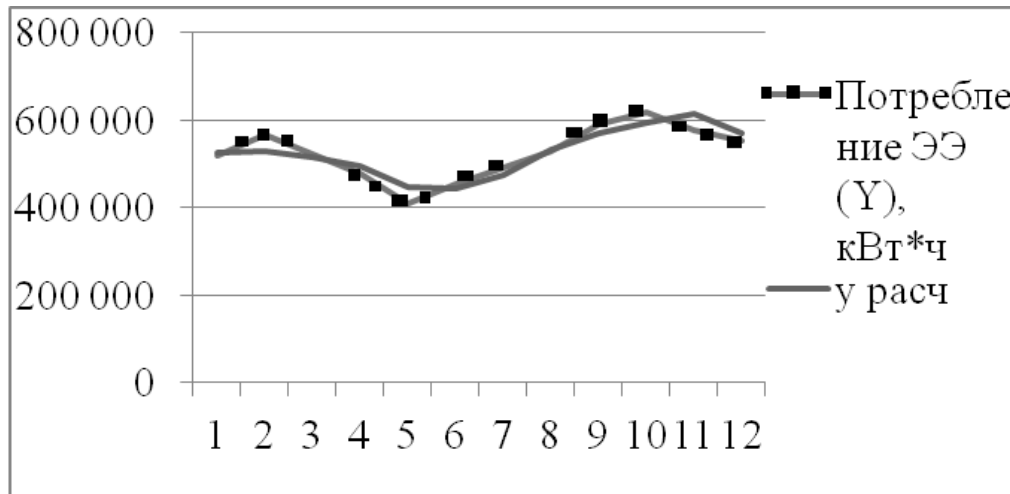


Рисунок 1. График потребления электрической энергии и расчетных значений y , построенный в MS Excel (рисунок автора)

График показывает, насколько адекватна полученная модель: кривая $y_{расч}$ достаточно хорошо описывает кривую фактического потребления электрической энергии.

Для оценки качества построенной модели в пакете *Statistica* проводится процедура анализа остатков. [7] Если остатки нормально распределены и ложатся на прямую, то это свидетельствует о хорошем качестве модели (рис. 2).

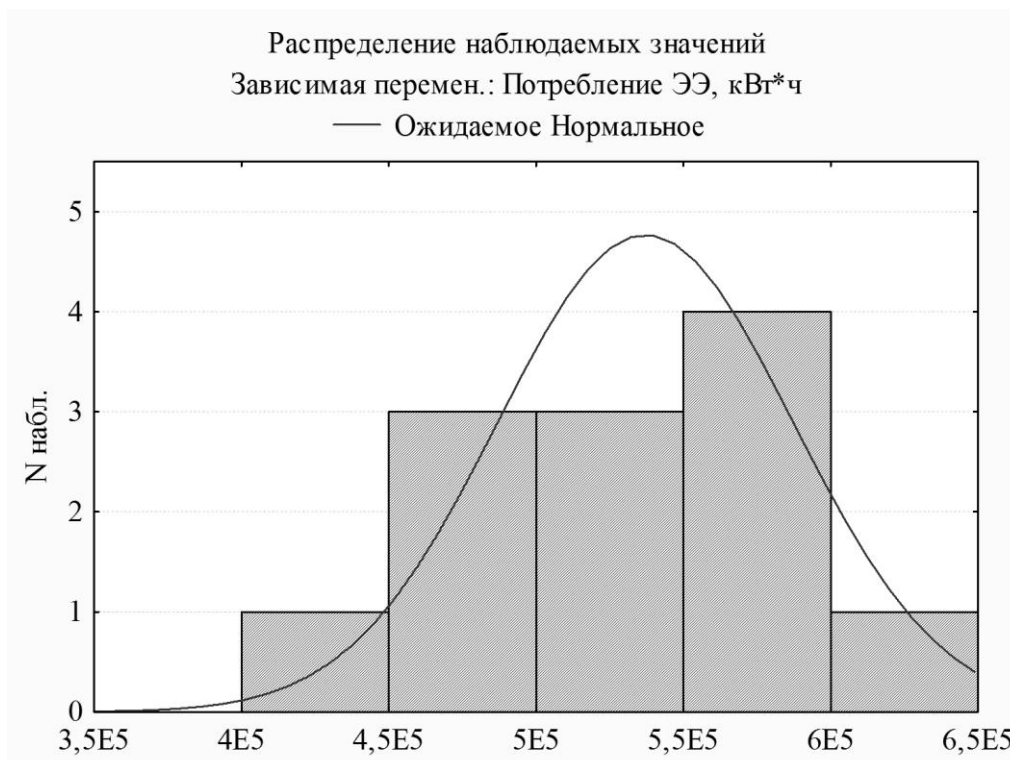


Рисунок 2. Гистограмма распределения остатков, построенная в Statistica (рисунок автора)

Модель считается адекватной, если выполняется условие:

$$F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}} \quad (4)$$

Для рассматриваемого случая получили значения $F_{\text{расч}} = 22,5$, $F_{\text{табл}} = 2,23$. Условие выполняется, полученным уравнением можно пользоваться для проведения расчетов. Полученное табличное значение рассчитано с учетом допустимой ошибки в 5 %.

В *Statistica* значимость модели также можно проверить с помощью критерия Фишера, рассчитанные значения можно наблюдать в итогах регрессии для зависимой переменной (см. рис. 3). *Statistica* также подтверждает, что модель статистически значима и достоверна.

Третьим способом решения уравнения множественной линейной регрессии является метод наименьших квадратов. [8] Для этого способа рекомендуется применять табличный редактор *MS Excel*.

Формула для расчетов методом наименьших квадратов:

$$B = [[X]^T[X]]^{-1}[X]^TY \quad (5)$$

где: B – вектор столбец, состоящий из параметров b_0 , b_1 , b_2 ;

X^T – транспонированная матрица x_1 , x_2 , x_n ;

X – исходная матрица x_1 , x_2 , x_n ;

Y – столбец y .

Однако, применение данной формулы предполагает построение уравнения линейной регрессии вида:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (6)$$

Для того чтобы появившийся в уравнении фактор x_0 не повлиял на конечный результат, вводится дополнительный столбец фиктивного фактора x_0 , его значение для всех периодов принимается равным единице.

Матрицей X являются все столбцы x_0 , x_1 , x_2 .

Выполнив вычисления по формуле (5), можно получить конечную матрицу, которая состоит из одного столбца и трех строк и содержит в себе три значения коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 .

Все три метода дают одинаковые результаты и в работе можно применять любой из них. Наиболее удобными все же являются автоматизированные способы расчета с применением встроенных функций *MS Excel* и *Statistica*.

В зависимости от того отрицательные или положительные коэффициенты стоят при x , можно судить о том, как будет изменяться зависимая переменная. Например, если коэффициент при x – отрицательный, то при увеличении x , значение y будет уменьшаться. Если же коэффициент b положительный, то с увеличением x , будет увеличиваться y .

Можно сделать вывод о том, что, зная плановое количество выпускаемых изделий и показатель HDD15,5, можно прогнозировать потребление электрической энергии.

Рассматриваемая модель электропотребления является достаточно универсальной. Располагая данными о воздействующих факторах на потребление электрической энергии, на удельный расход ЭЭ, можно оценивать степень их влияния при помощи рассмотренных инструментов, строить зависимости и прогнозировать потребление с учетом этих факторов.

Повышение объемов выпуска производимой продукции и рост интенсивности загрузки оборудования на производство товаров являются основной программой энергосбережения на предприятиях [9]. Прогнозировать потребление и удельные расходы электроэнергии можно по объемам выпускаемой продукции, степени загрузки оборудования. Безусловно, первым и основным является показатель – объем выпускаемой продукции. Он наиболее емко отражает все текущие производственные процессы. [10]

Применение программных комплексов существенно облегчает задачу анализа данных, построения прогнозов и выполнения математических вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьева И. А. Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды / И. А. Соловьева, А. П. Дзюба // Научный диалог. – 2013. – №7(19).
2. Идиятуллин Р. Г., Шуралев Д. В., Вдовин А. М. Исследование зависимости удельного расхода электроэнергии от ряда производственных факторов с использованием методов математической статистики. Известия ВУЗов. Энергетика, 12, 2001.
3. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений, М., 1969. – 402 с.
4. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
5. Ковалев А. А. Комплексное внедрение инноваций на железнодорожном транспорте России // А. А. Ковалев, Ф. С. Несмелов, А. В. Микава, А. А. Кардаполов, Н. А. Исаков // Транспортное дело России. – 2013. – №4. – С. 24-26.
6. Дюк В. А. Обработка данных на ПК в примерах. – СПб: Питер, 1997. – 240 с.
7. Verdu S. V. Characterization and Identification of Electrical Customers Through the Use of Self-Organizing Maps and Daily Load Parameters / S. V. Verdu, M. O. Garcia, F. J. G. Franco, et. al. // Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES. – No. 2. – 2004. – P. 899-906.
8. Kahrobaee S. A Multiagent Modeling and Investigation of Smart Homes With Power Generation, Storage, and Trading Features / S. Kahrobaee, R. A. Rajabzadeh, L-K. Soh, et. al. // IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID. – Vol. 4. – Is. 2. – 2012. – P. 659-668.
9. Шаюхов Т. Т. Расчет удельных норм и прогнозирование электропотребления на промышленных предприятиях. Инновационный транспорт, № 3 (21), 2016 г. ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург. – 74 с.
10. Казаринов Л. С. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – Т. 14, №1. – С. 5-13.

Shajuhov Timur Talgatovich

Ural state university of railway transport, Russia, Ekaterinburg
E-mail: shajuhov@mail.ru

Mathematical modeling of the influence of external factors on parameters of power consumption

Abstract. The use of multivariate mathematical models when establishing energy ensures accurate and valid results monitoring energy efficiency of technological objects.

However, the construction rather complex regression models comprising a large number of independent variables, requires significant amounts of statistical data collection which is rather laborious and requires considerable time.

This article is devoted to the analytical modeling of the influence of various factors on the consumption of electric energy (EE) enterprise. The object of the study are the parameters of power consumption of the plant production enterprise. The subject of research is a system of mathematical ratios in combination with automated software.

As a mathematical model for determining the influence of different factors on the power consumption of the author proposes to introduce a complex system of production of electricity consumption in a multiple linear regression equation, which must take into account the relationship between the factors and give an opportunity to highlight the impact of a particular factor on the output value.

According to the study, the author comes to the conclusion that the present model of power consumption is quite versatile, since it allows the application, positioning data about the factors that affect the consumption of electric energy, to assess the extent of their influence by means of the considered tools to build dependencies and predict EE consumption.

Keywords: energy consumption; mathematical model; factors; electrical energy; software systems; analytical study