

УДК 658.26:621.31

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОТРЕБЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

**А. Г. УС, А. В. ДРОБОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**В. Н. ГАЛУШКО**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет транспорта», г. Гомель*

Часто высокая себестоимость выпускаемой продукции в определенной степени обусловлена затратами на электроэнергию. В связи с этим для предприятий представляется целесообразной задачей рассматривать вопросы энергосбережения и нормирования электропотребления. Под энергосбережением в промышленности понимается применение технологии с рациональным расходом топливно-энергетических ресурсов и снижением их потерь, в частности электроэнергии. Если предприятие не знает реальных графиков нагрузки своих подразделений, не может достоверно оценить, кто, когда, сколько и на что расходует электроэнергию, оно вынуждено завышать заявленное значение максимума нагрузки, увеличивать нормы, предельные уровни расхода электроэнергии, что приводит к значительной переплате за установленную мощность.

Структура норм должна соответствовать технологии и организации производства и охватывать все статьи расхода электроэнергии на нормированный вид выпускаемой продукции или выполняемых работ. Нормы должны учитывать также планируемые к осуществлению мероприятия по экономии электроэнергии. Нормы подлежат своевременной корректировке при изменении условий производства [1], [2].

Процедуре лимитирования должен предшествовать энергоаудит, который выявляет величину фактического потребления предприятием электроэнергии, а также реальный потенциал энергосбережения. Для каждого агрегата или технологической линии, электропотребление которых фиксируется по счетчикам, удельные расходы на единицу продукции (или технологическую операцию) могут быть рассчитаны за каждые сутки и за год (месяц, квартал). Выход параметра из области технологически нормальной работы должен фиксироваться, технологу следует проанализировать причины отклонения и найти пути его устранения. Чем лучше работает агрегат, тем меньше среднее значение удельного расхода, однако его снижение имеет предел, обусловленный возможностями технологии.

С целью выявления значимых отклонений в удельном расходе электроэнергии для пользователей реализован программный статистический инструментарий. Данный инструментарий основывается на аналитических записках по энергетическому обследованию предприятий и включает разнообразные статистические процедуры. В качестве примера в статье приведен фрагмент анализа энергетического обследования Республиканского унитарного предприятия «Гомельский завод литья и нормалей».

Для исследуемых цехов получены интервальные оценки среднего значения и среднего квадратического отклонения исследуемой величины с доверительной вероятностью  $p = 0,95$  (в табл. 1 приведен пример расчета для энергомеханического цеха), с помощью которых можно сравнить нормируемые параметры с полученными по фактическим данным. Данное сравнение позволит выявить на первом этапе зна-

чимые отклонения от нормы среднего потребления электроэнергии с учетом разброса значений, вызванного влиянием случайных факторов.

Таблица 1

Удельный фактический расход электроэнергии Энергомеханическим цехом литейного производства, тыс. кВт · ч /т. за девять месяцев 2012 г.

Месяц								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
337,7	271,5	305,5	353,8	304,1	236,7	231,6	154	300,6

Выборочное среднее:

$$\hat{a}[x] = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = 277,28. \quad (1)$$

Оценка среднего квадратического отклонения

$$\hat{\sigma}[X] = \sqrt{\hat{D}[X]} = 61,78. \quad (2)$$

Объем выборки составил  $n = 9$ . Применяем формулу

$$\bar{x} - t_{(\alpha/2; n-1)} \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n-1}} < \hat{a}[x] < \bar{x} + t_{(\alpha/2; n-1)} \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n-1}}, \quad (3)$$

где  $n = 9$ ;  $\alpha = 0,05$ ; значение  $t_{(\alpha/2; n-1)}$  определяем по таблицам распределения Стьюдента. Таким образом, с вероятностью  $p = 0,95$  можно гарантировать, что среднее находится в пределах:  $226,9 < \hat{a}[x] < 327,6$ .

В зависимости от цели исследования можно провести статистическую проверку значимости различий между расходом по норме и фактическим потреблением. При этом проверяемой нулевой гипотезой служит предположение: все выборочные средние являются оценками одной генеральной средней и, следовательно, различия между ними несущественны. Если  $F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$ , то нулевая гипотеза не отвергается; между всеми выборочными средними нет существенных различий и на этом проверка заканчивается. Нулевая гипотеза отвергается, когда  $F_{\text{факт}} \geq F_{\text{теор}}$ . В этом случае дополнительно проводят оценку, между какими средними имеются значимые различия (приведен пример расчета для энергомеханического цеха (табл. 2, 3)).

Таблица 2

Статистические параметры

Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Расход по норме	147,45	7	1249,26	178,4657
Расход по факту	138,9	7	891,86	127,4086

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-значение	F критическое
Между группами	9123	1	9123,9	12,20	0,004429	4,7472
Внутри групп	8967,2	12	747,26	—	—	—
Итого	18091	13	—	—	—	—

В рассмотренном примере  $F$ -критерий (критерий Фишера) показывает, что различие между средними статистически значимо (значимо на уровне  $p = 0,004429$ , т. е. меньше, чем критическое значение  $0,05$ ). Поскольку различие между средними значениями значимо, нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза о существовании различия между средними [3].

На втором этапе расчета выполняется одномерный и множественный корреляционный и регрессионный анализ в программном продукте Statistica или STATGRAPHICS [3] с целью прогнозирования, проверки результатов, выявления значимо влияющих факторов с помощью полученных уравнений (зависимости табл. 4, 5).

Таблица 4

Данные о потреблении электроэнергии автоматным цехом для одномерного регрессионного и корреляционного анализа

Наименование цеха: АЦ	
Объем производства, тыс. р.	Потребление электроэнергии, тыс. кВт · ч
26357,0	167,80
26210,0	206,20
29841,0	172,20
27883,0	140,20
28761,0	139,10

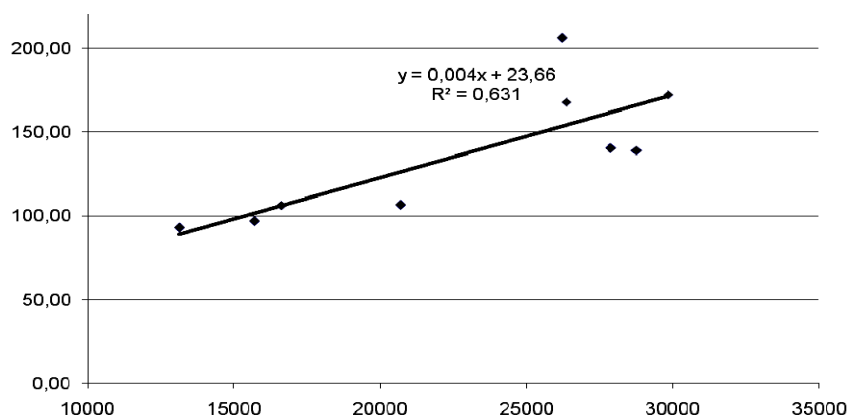


Рис. 1. Пример результатов линейного регрессионного анализа (Excel)

Полученное уравнение гиперболической регрессионной зависимости объема производства продукции и потребления электроэнергии, тыс. кВт · ч, имеет вид  $Y = 23,66 + 0,004 \cdot X$  (рис. 1). Коэффициент корреляции составил  $0,631$ .

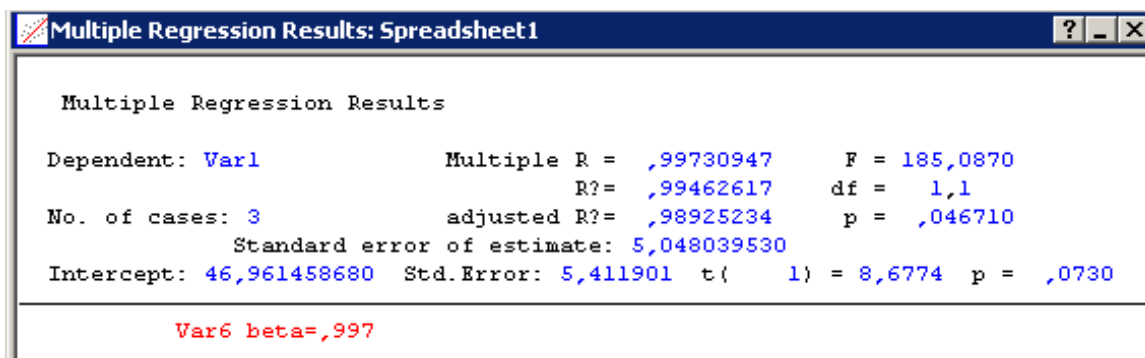


Рис. 2. Пример окна оценивания параметров в примере (Statistica)

Таблица 5

Исходные данные для множественного регрессионного анализа

Цех	Количество оборудования, ед.	Объем производства, тыс. р.	Трудоемкость производственной программы, н./ч	Время работы оборудования в течение года, н./ч	Среднемесячная зарплата, тыс. р.	Потребление электроэнергии, тыс. кВт · ч
№ 1	160	103159150,8	312897,6	292853	5506,3	1603,59
№ 2	104	67053448,6	255954,0	255850	5202,1	741,9
№ 3	63	72999133,2	299416,0	299403	5307,4	261,2

В окне оценивания параметров (рис. 2) содержатся краткие сведения о результатах анализа. А именно:

Dep. Var. (имя зависимой переменной). В данном случае – Var 6 (*W*).

No. of Cases (число случаев, по которым построена регрессия). В примере это число равно 3.

Multiple R = 0,9973 (коэффициент множественной корреляции).

R2 (квадрат коэффициента множественной корреляции), обычно называемый коэффициентом детерминации.

Оцененная модель потребления электроэнергии в Statistica имеет вид:

$$Z = 46,96 + 0,0714 \cdot X_1 - 0,1487 \cdot X_2 - 0,07929 \cdot X_3 - 0,0733 \cdot X_4 - 0,1126 \cdot X_5. \quad (4)$$

С помощью STATGRAPHICS пример уравнения регрессии потребления электроэнергии приняло вид:

$$W = 1885,22 + 0,0000526739 \cdot X_{\text{объем произв}} - 0,0182661 \cdot X_{\text{время раб.оборуд}} \quad (5)$$

С помощью процедуры пошагового регрессионного анализа подбирается наилучшее уравнение регрессии потребления электроэнергии, сравнение нескольких альтернативных моделей регрессии реализовано с помощью приведенных значений коэффициентов детерминации (например, в приведенном случае, наиболее значимо влияющим факторов являлось значение постоянного параметра (табл. 6)).

Таблица 6

Исходные данные для множественного регрессионного анализа для цеха № 3

Период	Объем производства, тыс. р.	Трудоемкость производственной программы, н./ч	Время работы оборудования в течение года, н./ч	Среднемесячная зарплата, тыс. р.	Потребление электроэнергии, тыс. кВт · ч
Январь	5121585,4	22698,6	22694,7	4555,5	33,1
Февраль	5187041,8	24724,7	24725,3	4695,2	40,8
Март	6440631,2	21765,9	21770,1	4952,2	23,2
Апрель	5242706,6	22353,0	22354,2	5606,3	16,2
Май	2503282,9	21929,0	21931,4	5913,7	13,3
Июнь	8423148,3	23433,5	23431,8	6219,8	12,6
Июль	6009406,8	31593,5	31590	5867,0	11,7
Август	6599531,4	31593,5	31592,1	6399,4	18,3
Сентябрь	13683097,6	31596,3	31595	5294,2	16,9

Окончание табл. 6

Период	Объем произ-водства, тыс. р.	Трудо-емкость произ-водственной программы, н./ч	Время работы оборудования в течение года, н./ч	Средне-месячная зар-плата, тыс. р.	Потребление электроэнер-гии, тыс. кВт · ч
Октябрь	8415510,8	24133,6	24138,4	5109,1	19,3
Ноябрь	2649346,9	24133,6	24136	4467,9	21,8
Декабрь	3306015,5	27337,0	27331,5	4631,4	31,5

Multiple Regression Results: Spreadsheet1

Multiple Regression Results (Step 1)

Dependent: Var5      Multiple R = ,7531777      F = 13,10946  
 R² = ,56727675      df = 1,10  
 No. of cases: 12      adjusted R² = ,52400442      p = ,004684  
 Standard error of estimate: 6,298608131  
 Intercept: 75,371817048      Std. Error: 14,97354      t( 10) = 5,0337      p = ,0005

Var4 beta = -,75

N=12	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(10)	p-level
Intercept			75,37182	14,97354	5,03367	0,000511
Var4	-0,753178	0,208020	-0,01014	0,00280	-3,62070	0,004684

Effect	Sums of Squares	df	Mean Squares	F	p-level
Regress.	520,0845	1	520,0845	13,10946	0,004684
Residual	396,7246	10	39,6725		
Total	916,8092				

Variable	Beta in	Partial Cor.	Semipart Cor.	Tolerance	R-square	t(10)	p-level
Var4	-0,753178	-0,753178	-0,753178	1,000000	0,00	-3,62070	0,004684

Variable	Toleran.	R-square	Partial Cor.	Semipart Cor.
Var4	1,000000	0,000000	-0,753178	-0,753178
Var1	0,940818	0,059182	-0,143224	-0,094215
Var2	0,903036	0,096964	0,065861	0,043324
Var3	0,902983	0,097017	0,065599	0,043152

Variable	Step +in/-out	Multiple R	Multiple R-square	R-square change	F - to entr/rem	p-level	Variables included
Var4	1	0,753178	0,567277	0,567277	13,10946	0,004684	1

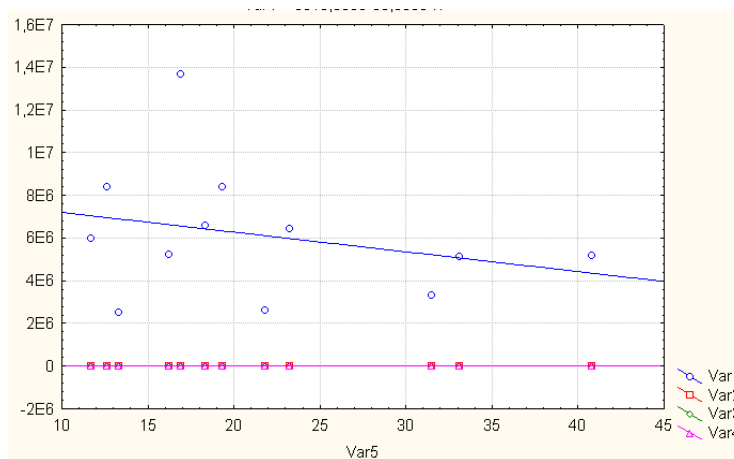


Рис. 3. Пример окон оценивания параметров в примере (Statistica) для цеха № 3

Multiple R = 0,753 (коэффициент множественной корреляции) (рис. 3).

С помощью процедуры пошагового регрессионного анализа оцененная модель потребления электроэнергии для цеха № 3 в Statistica имеет вид:

$$Z = 75,37182 - 0,0101 \cdot X_{\text{зарплата}} \quad (6)$$

Таким образом, для этого цеха можно сделать вывод, что на потребление электроэнергии влияют постоянные факторы.

Во всех технологических процессах только часть потребляемой электроэнергии расходуется пропорционально объему производимой продукции. Для осуществления же большинства обеспечивающих функций электроэнергия расходуется вне зависимости от объема производимой продукции. К таковым относятся, например, все функции подачи охлаждающей воды, охлаждающих эмульсий, систем смазки. Очень небольшой диапазон регулирования имеют центробежные компрессоры сжатого воздуха, кислорода и других газов, и потребление электроэнергии этими механизмами зависит не только от расхода газов, но и от поддерживаемого давления. Наконец, совсем не зависят от объема производства затраты электроэнергии на освещение, отопление и вентиляцию цехов. И это далеко не исчерпывающий перечень направлений использования электроэнергии, в которых интенсивность потребления электрической энергии не зависит от текущей производительности основного технологического оборудования. Вместе с тем, следует отметить, что практически все механизмы и агрегаты изменяют потребление электроэнергии в зависимости от температуры окружающей среды и других влияющих факторов. Наконец, следует подчеркнуть, что для всех видов электрооборудования, в том числе и для электродвигателей, непосредственно приводящих основные технологические агрегаты, существует характеристика «потери холостого хода», которая определяет величину потребления электроэнергии, не зависящую от степени загрузки агрегата.

Таким образом, весь объем потребления электроэнергии любым производственным подразделением, производящим какую-либо продукцию (готовую или промежуточную), делится на две части:

– постоянная составляющая – потребление электроэнергии, не зависящее от объема производимой продукции за интервал времени,  $C_w$ , кВт · ч (отопление; освещение; вентиляция; кондиционирование; транспортирование готовой продукции; транспортирование, хранение отходов; поддержание противопожарной системы; перекачку сточных вод; хранение готовой продукции);

– переменная составляющая – потребление электроэнергии, пропорциональное объему производимой продукции:  $\Pi \cdot K_w$ , где  $\Pi$  – количество произведенной продукции за интервал времени, т;  $K_w$  – потребление электроэнергии в подразделении за соответствующий интервал непосредственно на производство одной тонны продукции, кВт · ч/т [4]–[6].

Целесообразно определить временной интервал, в пределах которого сопоставляются упомянутые выше составляющие потребления электроэнергии. Таковым могут быть час, сутки, неделя, месяц. Оперативное управление производством осуществляется на основе данных за сутки, а для нормирования потребления электроэнергии принимается отчетный период – месяц. Для каждого производственного подразделения постоянная составляющая потребления электроэнергии приблизительно одинакова (более правильно она называется «условно постоянной») для всех суточных интервалов в пределах месяца, а пропорциональная объему производства составляющая потребления электроэнергии меняется в соответствии с количеством произведенной продукции, что определяет переменную величину суммарного

потребления электроэнергии за интервал. В результате этого доля постоянной составляющей потребления электроэнергии за интервал изменяется обратно пропорционально количеству произведенной продукции.

Совершенно аналогично постоянная составляющая проявляет свое влияние на величину удельного расхода электроэнергии – по мере увеличения объема продукции снижается доля постоянной составляющей в удельном расходе электроэнергии,  $w$ , кВт · ч/т:

$$w = \frac{(\Pi \cdot K_w + C_w)}{\Pi}. \quad (7)$$

На третьем этапе расчета анализ фактических отчетных данных об объемах производства и соответствующих им удельных расходах электроэнергии позволяет получить параметры криволинейного уравнения регрессии (как правило, используется экспоненциальная зависимость), описывающего изменение постоянной и переменной составляющих в зависимости от объемов производимой продукции исследуемого производственного подразделения [3].

Таким образом, при наличии определенных резервов по производительности производственных технологических агрегатов планирование их загрузки с учетом зависимостей потребления энергоресурсов от объемов производства может обеспечить существенный энергосберегающий эффект и снижение себестоимости продукции за счет снижения энергозатрат при условии обеспечения выполнения производственной программы. Такой подход может быть применен к любым технологическим агрегатам, выпускающим однородную продукцию, в том числе потребляющим для осуществления основного технологического процесса несколько энергоресурсов. При этом зависимости, характеризующие потребление энергоресурсов, должны регулярно обновляться по мере формирования новых данных об итогах работы.

Процедура выявления значимых отклонений в удельном фактическом расходе электроэнергии для пользователей реализована с помощью программного статистического инструментария.

Выполнен одномерный и множественный корреляционный и регрессионный анализ с целью прогнозирования, проверки результатов, выявления значимо влияющих факторов с помощью полученных уравнений зависимости, применительно к энергетическому обследованию Республиканского унитарного предприятия «Гомельский завод литья и нормалей».

Реализация статистического анализа фактических отчетных данных об объемах производства и соответствующих им удельных фактических расходах электроэнергии позволяет получить параметры криволинейного уравнения регрессии, описывающего изменение постоянной и переменной составляющих в зависимости от объемов производимой продукции исследуемого производственного подразделения.

В результате можно формировать наиболее объективную зависимость удельного расхода электроэнергии от объема производства для анализа обработки полученных результатов электропотребления, нормирования энергоресурсов и в некоторых случаях выявлять подтасовки или ошибки в отчетных данных, обнаруживать ошибки в работе счетчиков.

### Литература

1. Кравченя, Э. М. Охрана труда и основы энергосбережения / Э. М. Кравченя. – Минск, 2005.
2. Самойлов, М. В. Основы энергосбережения : учеб. пособие / М. В. Самойлов. – Минск : БГЭУ, 2002.

3. Боровиков, В. П. Популярное введение в программу STATISTICA / В. П. Боровиков. – М. : КомпьютерПресс, 1998. – 69 с.
4. Копцев, Л. А. Сквозной энергетический анализ и подходы к оптимизации энергобаланса в ОАО «ММК» / Л. А. Копцев, Ф. А. Рашкин, Д. В. Поварницын // Промышл. энергетика. – 2002. – № 9. – С. 5–8.
5. Влияние структурных изменений сталеплавильного производства и собственной энергетической базы на энергоемкость продукции / Ю. А. Бодяев // Сталь. – 2007. – № 12. – С. 83–87.
6. Копцев, Л. А. Нормирование и прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от объемов производства / Л. А. Копцев // Промышл. энергетика. – 1996. – № 3. – С. 5–7.

*Получено 10.06.2013 г.*