

## 11.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Клюев Р.В., к.т.н., доцент, зав. кафедрой  
«Электроснабжение промышленных предприятий»

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

В статье показаны математические модели зависимости потребления электроэнергии от различных технологических факторов. Модели получены в результате проведения комплексных энергетических исследований в процессе производства и потребления электроэнергии на гидроэлектростанции, промышленных предприятиях цветной металлургии и горнодобывающей отрасли. Полученные математические модели имеют высокую адекватность и могут быть использованы в процессе эксплуатации энергетических объектов, для оптимального планирования и прогнозирования режимов электропотребления. Исследования проводились с использованием двух грантов Президента РФ для поддержки молодых ученых.

Развитие рыночной экономики и предстоящее вступление Российской Федерации во Всемирную торговую организацию (ВТО) предъявляет повышенные требования по соответствию показателей качества продукции отечественной промышленности международным стандартам. Основопологающей отраслью является электроэнергетическая, от ее надежной работы зависит эффективное функционирование всех систем электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий РФ.

В программе развития электроэнергетики первоочередная роль отводится разработке и внедрению в производство комплекса энергосберегающих мероприятий, получаемых в процессе исследования параметров электропотребления на основе энергоаудита. Следует подчеркнуть, что энергоаудит должен проводиться как в процессе производства (гидро- (ГЭС) и тепло- (ТЭС), атомные электростанции (АЭС)), так и потребления (промышленные предприятия) электроэнергии. Это позволяет проследить весь процесс получения и распределения электроэнергии и изучить влияние различных технико-экономических факторов на него.

Значимость факторов во всем цикле можно оценить в ходе математического моделирования электропотребления с помощью проведения активных и пассивных экспериментов, экспертных оценок, рангового анализа техноценозов, использования потребителей-регуляторов (ПР) и т.д. [10-12]. В Республике Северная Осетия – Алания (РСО-Алания), субъекте Северо-Кавказского федерального округа, имеется значительный запас водно-энергетических ресурсов, сосредоточенный в энергии высокогорных рек. В настоящее время Северо-Осетинский филиал компании «РусГидро» включает пять ГЭС со среднегодовой выработкой электроэнергии 331,5 млн. кВт·ч. Начиная с 1979 г., ведется строительство каскада Зарамагских ГЭС (ЗГЭС) на р. Ардон, введение в эксплуатацию которых позволит полностью решить энергетические проблемы РСО-Алания, заключающиеся в имеющемся в республике значительном дефиците мощности и энергии. В ходе выполнения гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых МК-2576.2009.8 на тему «Исследо-

вание водно-энергетических режимов, статической и динамической устойчивости работы высоконапорных ГЭС» проведено математическое моделирование водно-энергетических режимов (ВЭР) ЗГЭС, в ходе которого разработаны математические модели зависимости вырабатываемой на ЗГЭС электроэнергии от водно-энергетических параметров станции.

ЗГЭС имеют протяженный деривационный туннель (14,5 км):

- с пусковой отметкой верхнего бьефа ГЭС ( $z_{вб}$ ) – 1 690,6 м;
- нижнего бьефа ( $z_{нб}$ ) – 1653,9 м;
- напором ( $H$ ) – 36,7 м.

На основе измерений среднемесячного водопритока р. Ардон  $Q$  с помощью программы Excel получены регрессионные модели сезонного изменения  $Q$ , имеющие вид линейных уравнений со степенью достоверности аппроксимации, близкой к единице ( $R^2 \approx 1$ ) [6], используемые в ходе планирования режимов работы ЗГЭС:

- $Q = -1,6T + 9,3$  (зимний период);
- $Q = 22,4T - 18$  (весенний период);
- $Q = -6,9T + 66,5$  (летний период);
- $Q = -1,95T + 15,4$  (осенний период).

Собраны представительные выборки зависимостей:

- $\{z_{вб} = f(V_{в})\}$  (рис. 1);
- $\{z_{нб} = f(Q_{нб})\}$  (рис. 2);

где

$V_{в}$  – объем водохранилища, м<sup>3</sup>;

$Q_{нб}$  – расход воды в  $z_{нб}$ , м<sup>3</sup>/с.

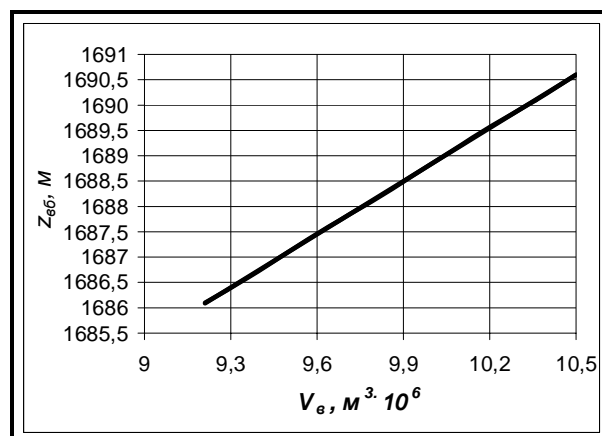


Рис. 1. Зависимость  $z_{вб} = f(V_{в})$

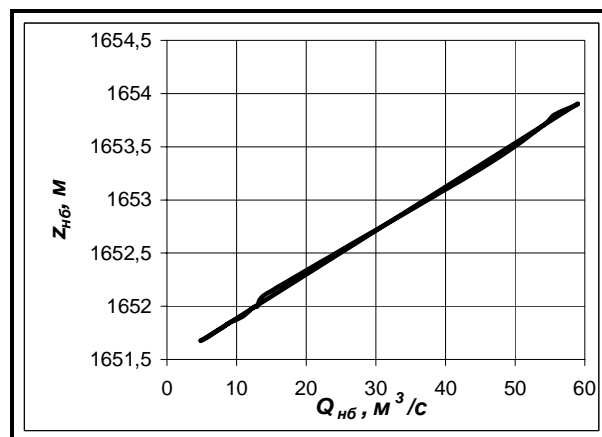


Рис. 2. Зависимость  $z_{нб} = f(Q_{нб})$

Полученные зависимости описываются уравнениями:

$$z_{вб} = (3,5V_e + 1653,9) \cdot 10^6 (R^2 = 1);$$

$$z_{нб} = 0,04Q_{нб} + 1651,5 (R^2 = 1).$$

Получена выборка значений предельных расходов воды ГЭС  $\{Q_{ГЭС.преді}\}$  в зависимости от выборки напора агрегата  $\{H_{ai}\}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{ГЭС.преді} = \frac{N_{ГЭС.уст}}{H_{ai} \cdot \cos \varphi}, \text{ если } H_{ai} \geq H_p^N; \\ Q_{ГЭС.преді} = \frac{N_{ГЭС.уст}}{H_p^N \cdot \cos \varphi} \cdot \sqrt{\frac{H_{ai}}{H_p^N}}, \text{ если } H_{ai} < H_p^N, \end{array} \right. \quad (1)$$

где

$N_{ГЭС.уст}$  – установленная мощность ГЭС, кВт;

$H_{ai}$  – значение из выборки напора агрегата, м;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности;

$H_p^N$  – расчетный по мощности напор, м.

Максимальное значение расхода воды  $Q_{ГЭС.мах}$  из выборки  $\{Q_{ГЭС.преді}\}$  используется для определения напорных и энергетических характеристик ГЭС. Установлена необходимость сработки-наполнения водохранилища при заданной начальной отметке верхнего бьефа  $z_{вб.н}$ , приточности к створу гидроузла  $Q_{пр}$  и установленной мощности ГЭС  $N_{ГЭС.уст}$ . При этом вычисляется расчетная мощность ГЭС:

$$N_{ГЭС.расч} = k_N \cdot H_p^N \cdot Q_{пр}, \quad (2)$$

где  $k_N$  – коэффициент мощности.

Необходимость сработки-наполнения водохранилища при  $z_{вб.н} = 1\ 690,6$  м рассчитывается согласно условию:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{ГЭС.расч} > N_{ГЭС.уст} - \text{наполнение}; \\ N_{ГЭС.расч} < N_{ГЭС.уст} - \text{сработка}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Выполнены расчеты режима наполнения водохранилища от начальной отметки верхнего бьефа до нормального подпорного уровня двумя методами: равномерным и максимально быстрым. Использование методов динамического программирования позволило выбрать оптимальную структуру управления работой ЗГЭС по параметрам, обеспечивающим максимальную выработку электроэнергии. Выполнены расчеты статической устойчивости работы генераторов, определены соответствующие коэффициенты запаса статической устойчивости. Использование в исследованиях критерия Гурвица, частотного метода Д-разбиения позволило определить области существования параметров регулирования автоматического регулирования возбуждения (АРВ) пропорционального действия, обеспечивающих статическую устойчивость работы станции на систему. Произведен расчет динамической устойчивости работы ЗГЭС на систему в нормальном и аварийном режимах. Выполнен анализ динамической устойчивости работы ЗГЭС при всех видах КЗ. Построены зависимости предельного времени отключения КЗ от вида предельного угла расхождения ЭДС генератора и напряжений системы. Установлено, что при всех видах КЗ, динамическая устойчивость выполняется, поскольку предельное время отключения этих токов превышает время срабатывания релейной защиты 0,1 с, что требует применения быстродействующего автоматического

повторного включения (АПВ) и системной автоматики по условию поддержания динамической устойчивости. Также произведен анализ и расчет токов качания в послеаварийном режиме, позволяющий исключить ложное срабатывание токовых защит линий 110 кВ. Полученные адекватные математические модели выработки электроэнергии на ЗГЭС от различных факторов могут использоваться в ходе эксплуатации ГЭС аналогичного типа и позволяют обеспечить оптимальное и эффективное производство электроэнергии на ГЭС.

Промышленность РСО-Алания представлена главным образом двумя предприятиями цветной металлургии: ОАО «Электроцинк» (цинковое производство) и ОАО «Победит» (производство твердых сплавов). На этих предприятиях на протяжении нескольких десятилетий проводится комплексный энергоаудит, позволивший провести математическое моделирование важнейших технологических процессов, от надежной и эффективной работы которых зависит выпуск качественной продукции. Получены адекватные математические модели в ходе исследования следующих процессов:

- восстановление диоксида молибдена, осуществляемое во вращающихся камерных печах (ВКП) и трубных печах (ТП);
- производство водорода, производимое в электролизерах;
- электролиз цинковых растворов с использованием вентильных кремниевых преобразователей (ВК);
- добыча полиметаллических руд для производства свинца и цинка. Ниже приведены полученные результаты.

### Восстановление диоксида молибдена [1]

Из энергетического баланса ОАО «Победит» следует, что энергетическая составляющая процесса восстановления молибдена в удельном расходе электроэнергии на производство твердых сплавов равна 15-20%. Адекватная математическая модель позволяет предложить методы и средства минимизации удельного расхода электроэнергии. Технологические факторы были выявлены на основании кластерного анализа экспертных оценок специалистов (энергетиков и технологов). К факторам, оказывающим наиболее существенное влияние на удельный расход электроэнергии, относятся:

- $x_1$  – масса загружаемого в трубную печь порошка  $MoO_2$ ,  $\gamma$ , кг;
- $x_2$  – количество водорода, необходимого для восстановления  $MoO_2$ ,  $V$ ,  $m^3$ .

В соответствии с существующей технологической картой загрузка печи порошком  $MoO_2$  составляет 15,6 кг. В каждую из труб загружаются по две лодочки массой 0,8 кг через каждые 40 мин., количество водорода поддерживается в объеме  $V = 12\ m^3$ . Для получения математической модели зависимости удельного расхода электроэнергии на восстановление диоксида молибдена  $W_{уд}$ , кВтч/кг  $y$  от указанных выше факторов, был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) вида  $N = 2^2$ , т.е. использования двух факторов ( $x_1$ ,  $x_2$ ) на двух уровнях варьирования – нижнем и верхнем. По данным текущего технологического контроля исследуемых факторов определены условия проведения опытов в натуральном и кодовом масштабах. При этом увеличена загрузка печи. Вместо двух лодочек  $\gamma$ , кг были загружены три лодочки ( $\gamma = 23,4\ кг$ ), снижен расход водорода с  $V_1 = 12\ m^3$  до  $V_2 = 11\ m^3$ . Для расчета дисперсий выходного параметра  $y$  – удельного расхода электроэнергии и проверки их однородности ставились параллельные опыты, числом  $m = 3$ . Матрица

планирования ПФЭ  $N = 2^2$ . Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ПФЭ  $N = 2^2$  И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА**

№	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб		Wуд, кВтч/кг (y)			Wуд. ср, кВтч/кг ( $\bar{y}$ )
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$\gamma$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	1	2	3	
1	1	-1	-1	15,6	11	7,2	7,1	7,15	7,15
2	1	1	-1	23,4	11	4,78	4,75	4,7	4,74
3	1	-1	1	15,6	12	7,45	7,4	7,45	7,45
4	1	1	1	23,4	12	4,96	4,91	4,96	4,96
$\Sigma$	0	0	0	-	-	-	-	-	24,3

В табл. 1 введена фиктивная постоянная  $x_0 = 1$ , входящая в уравнение регрессии при коэффициенте  $b_0$ . Для проверки однородности дисперсий принимается нулевая гипотеза  $H_0$ : при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$  – дисперсии однородны. Для проверки гипотезы  $H_0$  вычисляется дисперсия  $s_u^2$  для каждой строки матрицы планирования (см. табл. 1). Расчетные значения дисперсии:

- $s_1^2 = 25 \cdot 10^{-4}$ ;
- $s_2^2 = 16,5 \cdot 10^{-4}$ ;
- $s_3^2 = 25 \cdot 10^{-4}$ ;
- $s_4^2 = 20,5 \cdot 10^{-4}$ .

Сумма дисперсий  $\sum_{u=1}^N s_u^2 = 8,7 \cdot 10^{-3}$ . Ошибка опыта

(средняя дисперсия по ПФЭ)  $\bar{s}_0^2$  равна:

$$\bar{s}_0^2 = \frac{1}{N} * \sum_{u=1}^N s_u^2 = 2,175 * 10^{-3}.$$

Проверка однородности дисперсий проводится по критерию Кохрена. Расчетное значение критерия определяется по выражению:

$$G_{max} = \frac{s_{u_{max}}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} = \frac{s_1^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} = 0,287.$$

Табулированное критическое значение критерия Кохрена  $Gm(f_1, f_2), \alpha$  определяется при значениях:

$$f_1 = m - 1 = 2;$$

$$f_2 = N = 4;$$

$$\alpha - \text{уровне значимости, } \alpha = 0,05;$$

$$Gm(2, 4), 0,05 = 0,7679.$$

Так как неравенство  $G_{max} < Gm(f_1, f_2), \alpha$  выполняется, то гипотеза  $H_0$ : дисперсии однородны при  $\alpha = 0,05$  – принимается.

По данным матрицы планирования ПФЭ (см. табл. 1) определяются коэффициенты уравнения регрессии:

- $b_0 = 6,075$ ;
- $b_1 = -1,225$ ;
- $b_2 = 0,13$ ;
- $b_{12} = -0,02$ .

Полученное линейное уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 6,075 - 1,225x_1 + 0,13x_2 - 0,02x_1x_2. \quad (4)$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии (4) при принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$  проводится на основе метода регрессионного анализа. Для этого определяется дисперсия коэффициентов уравнения регрессии  $s_b^2$  и отклонение  $\Delta b$  по выражениям:

$$s_b^2 = \frac{\bar{s}_0^2}{N * m} = 18,125 * 10^{-5};$$

$$s_b = \sqrt{s_b^2} = 13,5 * 10^{-3};$$

$$\Delta b = \mp s_b * t_m(f_1, \alpha) = \mp 31 * 10^{-3},$$

где

$N * m = 12$  – общее количество опытов в эксперименте;

$t_m(f_1, \alpha)$  – табулированное критическое значение  $t$ -критерия Стьюдента, где  $f_1 = N(m - 1) = 8$ , при  $\alpha = 0,05$ ;  $t_m(8; 0,05) = 2,306$ .

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии определяются расчетные значения  $t$ -критерия Стьюдента как отношение абсолютных значений коэффициентов к его среднему квадратическому отклонению:

$$t_{ij} = \frac{|b_{ij}|}{s_b}. \quad (5)$$

Полученные по выражению (5) расчетные значения  $t_{bi}$  равны:

- $t_1 = 90,74$ ;
- $t_2 = 9,63$ ;
- $t_{12} = 1,48$ .

Согласно условию  $t_{ij} > t_m(8; 0,05)$ , значимыми являются коэффициенты  $b_1, b_2$ .

При этом уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 6,075 - 1,225x_1 + 0,13x_2. \quad (6)$$

Адекватность математической модели (6) проверяется по значениям дисперсий  $\bar{s}_0^2$  – средней по ПФЭ и

остаточной  $\hat{s}_{ocm}^2$  – уравнения регрессии. Средняя дисперсия (ошибка опыта) по ПФЭ  $\bar{s}_0^2 = 2,175 \cdot 10^{-3}$ .

Остаточная дисперсия уравнения регрессии (6) определяется по формуле:

$$\hat{s}_{ocm}^2 = \frac{m}{f} * \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_u)^2,$$

где

$f = (N * m - l)$  – число степеней свободы;

$l$  – число связей для линейного полинома.

$$l = n + 1,$$

где

$n$  – количество факторов;

$$l = 3;$$

$$f = 9.$$

Полученное значение  $\hat{s}_{ocm}^2 = 0,53 \cdot 10^{-3}$ .

Сравнение дисперсий  $\bar{s}_0^2$  и  $\hat{s}_{ocm}^2$  показывает, что уравнение регрессии (6) адекватно описывает исследуемый процесс, так как выполняется условие  $\bar{s}_0^2 > \hat{s}_{ocm}^2$ .

Переходя от кодовых значений независимых переменных к их значениям в натуральных единицах, получаем математическую модель в виде следующего уравнения регрессии:

$$Wуд = 9,21 - 0,314\gamma + 0,26V, \text{ кВтч/кг.} \quad (7)$$

Рассчитанные по уравнению (7) значения удельного расхода электроэнергии совпадают со значениями,

полученными по уравнению (6). Из уравнения (7) следует, что удельный расход электроэнергии снижается с увеличением массы загружаемого в печь порошка и повышается с увеличением количества водорода, необходимого для восстановления. Из уравнения (6) следует, что в условиях проведенного ПФЭ подтверждена значимость экспертных оценок факторов:

- $x_1$  – массы загружаемого в печь порошка  $\text{MoO}_2$ , кг;
- $x_2$  – количества водорода, необходимого для восстановления,  $\text{м}^3$ .

### Производство водорода [2, 8, 9]

Водород является важнейшим компонентом технологических процессов на предприятиях цветной металлургии, в частности, при производстве твердых сплавов, где водород является основным восстановителем в печах и сварочных аппаратах. На заводе «Победит» разложение дистиллированной воды на водород и кислород производится в электролизерах типа ФВ-500 М. Энергетическая составляющая производства водорода в удельном расходе электроэнергии на производство твердых сплавов составляет 40-60%. Поэтому в условиях постоянного роста тарифов на электрическую энергию важной и актуальной проблемой является разработка и исследование математической модели зависимости удельного расхода электроэнергии на получение 1  $\text{м}^3$  водорода от ряда технологических факторов, связанных с получением водорода. В качестве независимых переменных были избраны:

- $x_1$  – количество бихромата калия в электролизере,  $\gamma$ , кг;
- $x_2$  – плотность электролита,  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

Для получения математической модели зависимости удельного расхода электроэнергии на выработку водорода  $W_{уд}$ ,  $\text{кВт}\cdot\text{ч/м}^3$  ( $y$ ) от указанных выше факторов также был проведен ПФЭ. Матрица планирования ПФЭ  $N = 2^2$  и результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

### МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ПФЭ $N = 2^3$ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

№	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб		Wуд, кВт·ч/м <sup>3</sup> (y)			Wуд.ср, кВт·ч/м <sup>3</sup> ( $\bar{y}$ )
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$\gamma$ , кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1	2	3	
1	1	-1	-1	10	1267	4,765	4,78	4,756	4,767
2	1	1	-1	70	1267	4,720	4,71	4,725	4,718
3	1	-1	1	10	1275	4,68	4,77	4,725	4,725
4	1	1	1	70	1275	4,65	4,6	4,575	4,608
$\Sigma$		0	0	-	-	-	-	-	18,841

Расчетные значения дисперсии:

- $s_1^2 = 1,47 \cdot 10^{-4}$ ;
- $s_2^2 = 5,833 \cdot 10^{-5}$ ;
- $s_3^2 = 2,025 \cdot 10^{-3}$ ;
- $s_4^2 = 1,458 \cdot 10^{-3}$ .

Сумма дисперсий  $\sum_{i=1}^N s_{ui}^2 = 3,688 \cdot 10^{-3}$ ;

ошибка опыта:  $\bar{s}_0^2 = 0,922 \cdot 10^{-3}$ ;

расчетное значение критерия Кохрена:  $G_{max} = 0,549$ .

Табулированное критическое значение критерия Кохрена:

$G_m(2, 8), 0,05 = 0,7679$ .

Так как неравенство  $G_{max} < G_m(f_1, f_2), \alpha$  – выполняется, то гипотеза  $H_0$ : дисперсии однородны при  $\alpha = 0,05$  – принимается.

Значения коэффициентов уравнения регрессии:

- $b_0 = 4,705$ ;
- $b_1 = -0,041$ ;
- $b_2 = -0,038$ ;
- $b_{12} = -0,017$ .

Линейное уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 4,705 - 0,041x_1 - 0,038x_2 - 0,017x_1x_2; \quad (8)$$

$$s_b^2 = 7,685 \cdot 10^{-5};$$

$$s_b = 8,766 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta b = \mp 20,2 \cdot 10^{-3},$$

Расчетные значения  $t_{bi}$  равны:

- $t_1 = 4,677$ ;
- $t_2 = 4,335$ ;
- $t_{12} = 1,939$ .

Согласно условию  $t_{ij} > t_m(8; 0,05)$ , значимыми являются коэффициенты  $b_1$ ,  $b_2$ . При этом уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 4,705 - 0,041x_1 - 0,038x_2. \quad (9)$$

Переходя от кодовых значений независимых переменных к их значениям в натуральных единицах получаем математическую модель в виде следующего уравнения регрессии:

$$W_{уд} = 16,8342 - 1,37 \cdot 10^{-3}\gamma - 9,5 \cdot 10^{-3}\rho. \quad (10)$$

Рассчитанные по уравнению (10) значения удельного расхода электроэнергии совпадают со значениями, полученными по уравнению (9). Из уравнения (10) следует, что удельный расход электроэнергии снижается с увеличением содержания бихромата калия и плотности электролита в электролизере. Из уравнения (9) следует, что в условиях проведенного ПФЭ подтверждена значимость экспертных оценок факторов:

- $x_1$  – количества бихромата калия в электролизере, кг;
- $x_2$  – плотности электролита,  $\text{г/см}^3$ .

Адекватная математическая модель (10) используется для расчета и прогнозирования удельного расхода электроэнергии на выработку водорода и позволяет, в определенных пределах варьирования количества бихромата калия и плотности электролита, управлять потреблением электроэнергии на промышленных предприятиях по производству твердых сплавов.

### Электролиз цинковых растворов [5, 8]

В ходе решения общегосударственной задачи повышения эффективности использования электроэнергии на предприятиях различных отраслей промышленности все большую актуальность и значимость приобретают вопросы обеспечения надлежащего качества электроэнергии (КЭ). В рамках использования гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1324.2007.8 на тему «Исследование и разработка математических моделей показателей качества электроэнергии на предприятиях цветной металлургии» проведены исследования различных показателей КЭ.

На ОАО «Электроцинк», крупнейшем предприятии цветной металлургии РСО-Алания, основным технологическим процессом является электролиз цинковых растворов, от которого в значительной мере зависит выпуск качественной продукции. Наиболее энергоемким оборудованием в цепи электролиза являются вентиляционные кремниевые преобразователи (ВК), работа которых сопровождается появлением высших гармонических (ВГ)

составляющих токов и напряжений, значительно ухудшающих КЭ в системе электроснабжения всего предприятия. С целью исследования КЭ были проведены измерения уровня ВГ при работе пяти шестифазных преобразователей на главной понизительной подстанции (ГПП). ВК 4, 5, 6, 7, 8 типа ПКВВ-6300/850 (номинальный выпрямленный ток 6300 А, номинальная мощность 5355 кВт, напряжение выпрямленного тока 850 В,  $\eta = 98,5\%$ ,  $\cos\phi = 0,95$ ) имеют шестифазную схему выпрямления и питаются от трансформаторов типа ТДНПВ-12500/10 мощностью 6100 кВА. Известно, что спектр гармоник тока зависит от числа фаз преобразователя  $m$  и может быть представлен в виде ряда  $v = mk \pm 1$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Для шестифазного режима выпрямления в кривых имеются гармоники соответственно порядка  $v = 5, 7, 11, 13, \dots$ . С помощью прибора комплексного контроля ПКК-57 были проведены измерения коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $k_{U(n)}$  и тока  $k_{I(n)}$ , значения которых регламентированы. В результате было установлено наличие гармоник 5, 7, 11 и 13-го порядков при работающих ВК, что не противоречит теоретическим положениям.

С помощью метода наименьших квадратов (МНК) в программе Microsoft Excel были получены математические модели расчета ВГ токов и напряжений (табл. 3).

Таблица 3

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ВГ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ**

№	Математические модели	Достоверность аппроксимации R <sup>2</sup>
1	$k_{U(5)} = 0,05n^4 - 1,16n^3 + 9,72n^2 - 34,65n + 46,864$	1
2	$k_{U(7)} = -0,08n^4 + 1,91n^3 - 17,45n^2 + 69,64n - 100,15$	1
3	$k_{U(11)} = -0,22n^4 + 5,52n^3 - 50,04n^2 + 197n - 281,31$	1
4	$k_{U(13)} = -0,3n^4 + 7,32n^3 - 66,24n^2 + 260,6n - 373,63$	1
5	$k_{I(5)} = 0,29n^4 - 7,55n^3 + 72,4n^2 - 301,14n + 474,67$	1
6	$k_{I(7)} = -0,1n^4 + 2,37n^3 - 21,21n^2 + 81,32n - 104,86$	1
7	$k_{I(11)} = 0,25n^4 - 6,07n^3 + 54,94n^2 - 218,03n + 322,17$	1
8	$k_{I(13)} = 0,07n^4 - 1,51n^3 + 11,97n^2 - 42n + 56,944$	1

Таблица 4

**ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ  $k_{U(n)}$  И  $k_{I(n)}$**

$k_{U(n)}$	ДИ [ $k_{U(n)}$ ], %	$k_{I(n)}$	ДИ [ $k_{I(n)}$ ], %
$k_{U(5)}$	2,11-3,179	$k_{I(5)}$	15,05-20,17
$k_{U(7)}$	1,37-2,138	$k_{I(7)}$	7,14-10,203
$k_{U(11)}$	1,622-3,173	$k_{I(11)}$	2,266-6,216
$k_{U(13)}$	0,462-2,292	$k_{I(13)}$	1,498-4,734

Из табл. 3 видно, что все математические модели представлены в виде полиномиальных трендов 4-го порядка, имеющих  $R^2$ , равный единице. Для оценки средних значений  $k_{U(n)}$  и  $k_{I(n)}$  определены доверительные интервалы (ДИ) (табл. 4).

**Добыча полиметаллических руд для производства свинца и цинка [7]**

Одним из основных направлений развития горнодобывающей промышленности РСО-А является использование производственных мощностей Садонского свинцово-цинкового комбината (ССЦК), добывающего полиметаллические руды на Садонском, Згидском и Архонском месторождениях и освоение в первую очередь участка Бозанг Джимидонского месторождения. По ряду причин, вызванных новой рыночной экономикой и уменьшением запасов сырья, в 2002 г. комбинат был остановлен. В начале 2004 г. ОАО «Электроцинк» вошло в состав ОАО «УГМК-Холдинг» и в связи с существенным увеличением объемов производства свинца и цинка, возникла необходимость в добыче большего объема полиметаллических руд. Руководством УГМК было принято решение о вхождении ССЦК в холдинг и создании на его базе Садонского рудоуправления (РУ). Принятое решение позволяет уже в ближайшем будущем решить важную и актуальную задачу по увеличению добычи имеющихся запасов сырья горных районов РСО-А. В результате анализа исследования электропотребления ССЦК и основных показателей его работы в качестве значимых параметров были определены следующие:

- $X_1$  – потребление электроэнергии, МВтч;
- $X_2$  – максимум нагрузки, МВт;
- $X_3$  – добыча руды, т;
- $X_4$  – объем горно-капитальных работ, т;
- $X_5$  – проходка горных выработок, м;
- $X_6$  – списочное число рабочих, чел.;
- $X_7$  – количество смен, ч. (1 смена – 6 ч.);
- $X_8$  – геологоразведочное бурение, м.

Обобщенный (интегральный) показатель эффективности использования электроэнергии по добыче руды  $E$  определяется по выражению:

$$E = \frac{W_{уд}}{P_{тр}}, \frac{МВт \cdot ч^2 \cdot чел}{m^2}, \tag{11}$$

где

$$W_{уд} = \frac{X_1}{X_3} - \text{удельный расход электроэнергии на}$$

добычу руды, МВтч/т;

$$P_{тр} = \frac{X_3}{X_6 \cdot X_7} - \text{производительность труда по до-}$$

быче руды, т/чел. ч.

В качестве независимых по размерности (базовых) параметров принимаем:  $X_4$ , т;  $X_6$ , чел.;  $X_7$ , ч.;  $X_8$ , м. Для формирования безразмерных критериев используем теорию подобия. Формула размерностей при этом имеет вид:

$$P_i = \frac{X_i}{X_4^{\alpha_i} \cdot X_6^{\beta_i} \cdot X_7^{\gamma_i} \cdot X_8^{\delta_i}}, \tag{12}$$

где  $i = 1, 2, 3, 5$ ;

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$  – коэффициенты.

Для расчета критериев подобия ( $\Pi_i$ ) составляем матрицу показателей степени размерности величин  $X_i$  (табл. 5).

Таблица 5

**МАТРИЦА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТЕПЕНИ  
РАЗМЕРНОСТЕЙ  $X_i$**

$X_4, \text{т}$	$X_6, \text{чел.}$	$X_7, \text{ч.}$	$X_8, \text{м}$	
1	0	0	2	$X_1, \text{МВтч}$
1	0	-1	2	$X_2, \text{МВт}$
1	0	0	0	$X_3, \text{т}$
1	0	0	0	$X_4, \text{т}$
0	0	0	1	$X_5, \text{м}$
0	1	0	0	$X_6, \text{чел.}$
0	0	1	0	$X_7, \text{ч.}$
0	0	0	1	$X_8, \text{м}$

В табл. 5 по столбцам ( $m = 4$ ) расположены независимые переменные  $X_4, X_6, X_7, X_8$ , а по строкам ( $n = 8$ ) – все показатели  $X_i$ . Расчет коэффициентов  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$  производится путем решения системы уравнений для каждого из  $i$ -го критерия подобия  $\Pi_i$ . Матрица заполняется показателями степени размерностей.

Так, для  $X_1$  (электропотребление) имеем:

$$[MBm = \frac{m * M^2}{4} * \chi = m * M^2],$$

соответственно:  $X_4 * X_8^2$ . В левой части уравнения записываются численные значения показателей  $X_4 = 1, X_6 = 0, X_7 = 0, X_8 = 2$ , а в правой – значения тех же показателей, взятых в соответствующих столбцах матрицы. Система уравнений для расчета  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$  имеет вид:

$$\begin{cases} 1 = 1 * \alpha_1 + 0 * \beta_1 + 0 * \gamma_1 + 0 * \delta_1; \\ 0 = 0 * \alpha_1 + 1 * \beta_1 + 0 * \gamma_1 + 0 * \delta_1; \\ 0 = 0 * \alpha_1 + 0 * \beta_1 + 1 * \gamma_1 + 0 * \delta_1; \\ 2 = 0 * \alpha_1 + 0 * \beta_1 + 0 * \gamma_1 + 1 * \delta_1. \end{cases} \quad (13)$$

В результате решения (13) получаем:

$$\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0, \gamma_1 = 0, \delta_1 = 2.$$

Критерий подобия электропотребления будет равен:

$$\Pi_1 = \frac{X_1}{X_4^{\alpha_1} * X_6^{\beta_1} * X_7^{\gamma_1} * X_8^{\delta_1}} = \frac{X_1}{X_4 * X_8^2}.$$

Критерии подобия, найденные аналогично, составили:

$$\Pi_2 = \frac{X_2}{X_4} \quad (\text{критерий подобия добычи руды});$$

$$\Pi_3 = \frac{X_5}{X_8} \quad (\text{критерий подобия проходки горных выработок});$$

$$\Pi_4 = \frac{X_2 * X_7}{X_4 * X_8^2} \quad (\text{критерий подобия максимума нагрузки}).$$

Для обобщенного показателя  $E$  критерий подобия равен:

$$\Pi = \frac{E * X_4}{X_6 * X_7 * X_8^2}. \quad (14)$$

Анализ производственных данных ССЦК за ряд предыдущих лет по отдельным кварталам позволил получить представительные выборки данных, используемые для получения адекватных математических моделей.

Гистограмма изменения по кварталам обобщенного показателя эффективности использования электроэнергии по добыче руды, рассчитанного по выражению (11), приведена на рис. 3.

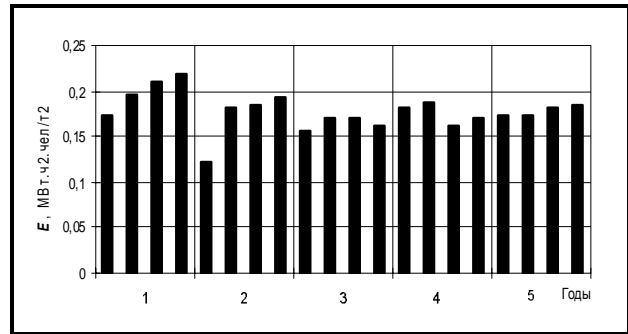


Рис. 3. Гистограмма изменения показателя  $E$  по кварталам в течение 5 лет

Из рис. 3 видно, что на значения показателя  $E$  определенное влияние оказывают климатические условия, главным образом температура окружающей среды. Так, среднее значение показателя  $E$  по кварталам составило:

- $E = 0,162$  (I кв.);
- $E = 0,182$  (II кв.);
- $E = 0,182$  (III кв.);
- $E = 0,186$  (IV кв.).

С помощью статистического аппарата программы Excel получены уравнения регрессии, аппроксимирующие исходные данные выборки по МНК. Для критериев подобия электропотребления и максимума нагрузки они описываются следующими линейными уравнениями множественной регрессии с коэффициентами достоверности аппроксимации (детерминации)  $R^2$ :

$$\Pi_1 = 5,63 \cdot 10^{-4} \Pi_2 + 0,044 \Pi_3 - 0,04 \quad (R^2 = 0,82);$$

$$\Pi_4 = 2,08 \cdot 10^{-4} \Pi_2 + 0,014 \Pi_3 - 0,013 \quad (R^2 = 0,84).$$

Достаточно высокие значения  $R^2 \approx 1$  позволяют использовать полученные уравнения регрессии для расчета критериев подобия электропотребления и нагрузки. Для прогнозирования критерия  $\Pi_1$  на краткосрочный поквартальный период следующего года получены следующие уравнения регрессии зависимости  $\Pi_1 = f(t)$  в виде полиномов со значениями  $R^2 = 1$ :

$$\Pi_{1(n+1)} = -0,002t^4 + 0,025t^3 - 0,092t^2 + 0,13t - 0,047 \quad (\text{I кв.});$$

$$\Pi_{1(n+1)} = -0,0012t^4 + 0,015t^3 - 0,063t^2 + 0,105t - 0,0475 \quad (\text{II кв.});$$

$$\Pi_{1(n+1)} = -0,0062t^4 + 0,071t^3 - 0,277t^2 + 0,43t - 0,203 \quad (\text{III кв.});$$

$$\Pi_{1(n+1)} = -0,0001t^4 + 0,003t^3 - 0,0086t^2 - 0,0135t + 0,0476 \quad (\text{IV кв.}).$$

Уравнение регрессии зависимости электропотребления от основных параметров работы ССЦК в натуральных единицах, полученное по МНК:

$$X_1 = 0,04 X_3 + 0,107 X_4 - 0,168 X_5 + 6,39 X_6 + 3,15 X_7 + 0,96 X_8 - 1642 \quad (R^2 = 0,67). \quad (15)$$

Проверка уравнения (5) по  $t$ -критерию Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  показала значимость всех коэффициентов уравнения. Уравнение (15) может быть использовано для поквартального (среднегодового) прогнозирования при заданных предприятию планируемых показателях ( $X_1 - X_8$ ) на следующий год.

Для получения среднегодовых прогнозных значений основных параметров работы ССЦК получены уравнения регрессии, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

**УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ ЗАВИСИМОСТИ СРЕДНЕГОДОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ССЦК ОТ ВРЕМЕНИ**

№	Уравнение регрессии	R <sup>2</sup>
1	$X_1 = 44,771t^4 - 554,37t^3 + 2288,9t^2 - 3487,2t + 4767,5$	1
2	$X_2 = 0,0418t^4 - 0,5177t^3 + 2,142t^2 - 3,2785t + 4,4075$	1
3	$X_3 = 39,6671t^4 - 597,33t^3 + 1692,8t^2 - 3288,8t + 32928$	1
4	$X_4 = 60,6771t^4 - 644,01t^3 + 2194,6t^2 - 2655,4t + 2173,2$	1
5	$X_5 = 1,1667t^4 + 1,5833t^3 - 103,79t^2 + 396,54t + 13,75$	1
6	$X_6 = -1,01t^4 + 11,563t^3 - 46,74t^2 + 89,438t + 180,25$	1
7	$X_7 = -3,7563t^4 + 41,012t^3 - 149,84t^2 + 204,99t + 296,4$	1
8	$X_8 = 27,25t^4 - 324,29t^3 + 1306,9,6t^2 - 2069,3t + 1495,5$	1

Из табл. 6 видно, что коэффициент детерминации равен единице, что указывает на возможность использования полученных уравнений регрессии для расчета и прогнозирования основных параметров работы ССЦК в динамике изменения производственной ситуации на предприятии. Разработанная методика алгоритма расчета критериев подобия и полученные в работе результаты могут быть использованы при проведении энергетического обследования (энергоаудита) на горнодобывающих предприятиях РСО-А.

Для оценки электропотребления в различных отраслях промышленности в последнее время находит применение системный техноэнологический подход, в основе которого лежит понятие техноэноза, где отражена специфика связей между техническими элементами – особями [10]. Для описания структуры техноэнозов, выявления тенденций их развития и изменения разработан особый аппарат гиперболических  $H$ -распределений, представляющих собой убывающую последовательность значений параметров, упорядоченную таким образом, что с возрастанием ранга (порядкового номера) каждое последующее число меньше предыдущего.  $H$ -распределение описывается гиперболическим выражением вида:

$$W = \frac{W_0}{r^\beta},$$

где

$W_0$  – коэффициент;

$r$  – ранг;

$\beta$  – показатель степени.

Ранговый анализ заключается в разбиении объектов техноэноза на три группы рангов: ноевую, пойнтер и саранчевую касты распределения. Ноевая каста – группа самых энергоемких объектов, занимающих первые ранги  $H$ -распределения и образующих первую точку аппроксимирующего рангового  $H$ -распределения. Пойнтер-каста – следующая группа достаточно энергоемких объектов, связанных функцией ценологического влияния. Саранчевая каста (виртуальная) – группа объектов,

находящихся за пойнтер-границей. Это группа объектов небольшой энергоемкости, соответствующих большим рангам («длинному хвосту» рангового  $H$ -распределения) и практически неразличимых по параметру электропотребления.

Ранговый анализ электропотребления основного технологического оборудования был проведен на ОАО «Победит» [3]. Анализ показал, что наиболее энергоемким оборудованием завода являются электролизеры (ранг  $r_1$ ), сварочные аппараты (ранг  $r_2$ ) и насосы (ранг  $r_3$ ). На их долю приходится 47% общего электропотребления предприятия. По результатам построения последовательных ранговых  $H$ -распределений это оборудование отнесено к ноевой касте распределения. Аналогично определено оборудование, составляющее пойнтер (34%) и саранчевую касты распределения (19%). Для каждой из каст с использованием МНК построены аппроксимирующие зависимости изменения электропотребления за 1996-2002 гг.

Для ноевой касты распределения значение  $W_0$  изменяется в пределах  $9 \cdot 10^6 \div 13,9 \cdot 10^6$ , показатель  $\beta$  имеет постоянное значение  $0,55$ . Электропотребление объектов пойнтер касты также описывается гиперболическим выражением ( $W_0 = 2,74 \cdot 10^6 \div 4,24 \cdot 10^6$ ;  $\beta = 0,33$ ). Для саранчевой касты ввиду многочисленности объектов и малой мощности наиболее адекватным является линейное уравнение регрессии:

$$W = a * r + b$$

где

$$a = -7,2 \cdot 10^6 \div -4,7 \cdot 10^6;$$

$$b = 1,14 \cdot 10^6 \div 1,39 \cdot 10^6.$$

Коэффициент достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации) имеет достаточно высокое значение:  $R^2 = 0,85 \div 1$ .

Алгоритм определения доверительных интервалов электропотребления технологического оборудования отдельных каст распределения.

1. По показаниям счетчиков электроэнергии формируют выборку  $\{W\}$  значений электропотребления объемом  $n$  за период времени  $t$  ( $5 \div 7$  лет).

2. Рассчитывают среднее  $\bar{W}$  и стандарт  $S$  выборки  $\{W\}$ .

3. По критерию  $3\sigma$  ( $2\sigma$ ) определяют anomальные значения электропотребления, вышедшие за границы доверительных интервалов, которые из выборки  $n$  исключают, уточняют усеченную выборку значений электропотребления, объемом  $n_1 \leq n$ .

4. Вычисляют верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала:

$$W_e = \bar{W} + t_p * \frac{S}{\sqrt{n_1}};$$

$$W_n = \bar{W} - t_p * \frac{S}{\sqrt{n_1}};$$

где  $t_p$  – табулированное значение критерия Стьюдента. При принятом уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ;  $t_p = 1,96$ ;

$n_1$  – объем усеченной выборки  $\{W\}$ .

Таблица 7

**ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
НОВОЙ КАСТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

Ранг	Доверительный интервал электропотребления в 1993-2002 гг., млн. кВтч			Уравнение регрессии ( $W = f(t)$ ), коэффициент детерминации $R^2$	Прогнозное и фактическое значения электропотребления на 2002 г., млн. кВтч		Ошибка прогноза, $\varepsilon$ , %	$W_{пр}$ на 2003 г., млн. кВтч
	$W_n$	$\bar{W}$	$W_e$		$W_{пр}$	$W_{ф}$		
1	9,86	15,2	20,52	$W = 10 \cos(-1,067t + 0,338) e^{-0,575t} + 12,4;$ $R^2 = 0,726$	12,5	12,7	1,34	12,31
2	7,90	12,17	16,44	$W = 10 \cos(-1,023t + 0,197) e^{-0,594t} + 9,93;$ $R^2 = 0,788$	10,1	10,2	1,28	9,92
3	5,21	8,03	10,85	$W = 10 \cos(-0,899t - 0,114) e^{-0,729t} + 6,6;$ $R^2 = 0,788$	6,66	6,72	0,85	6,62

5. С помощью математического аппарата программы MathCAD составляют адекватную математическую модель потребления электроэнергии, представляющую собой экспоненциально-затухающую гармоническую функцию вида:

$$W(t, u) = \cos(u_0 t + u_1) e^{u_2 t} + u_3, \quad (16)$$

где  $t$  – время, год;

$u_0, u_1, u_2, u_3$  – постоянные коэффициенты, для определения которых составляется матрица, первым элементом которой является исходная функция, остальными – частные производные определяемых коэффициентов. Полученная матрица имеет вид:

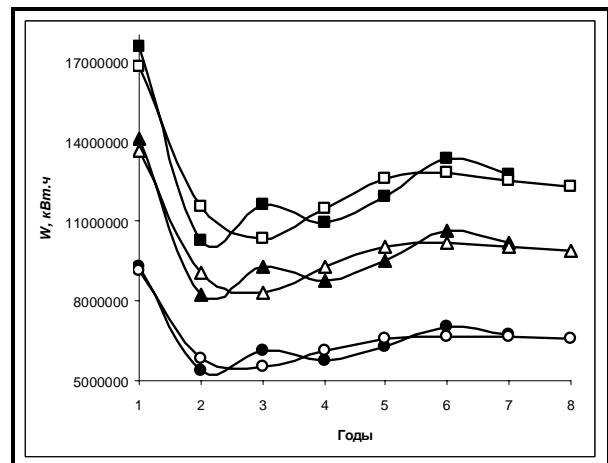
$$F(t, u) = \begin{bmatrix} \cos(u_0 t + u_1) e^{u_2 t} + u_3 \\ -\sin(u_0 t + u_1) t e^{u_2 t} \\ -\sin(u_0 t + u_1) e^{u_2 t} \\ \cos(u_0 t + u_1) t e^{u_2 t} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Анализ уравнения (16) показывает, что при выборке фактических значений электропотребления  $\{W_{ф}\}$  за пять и более лет прогнозное значение  $W_{пр} \approx u_3$  (не зависит от времени).

Алгоритм определения прогнозных значений электропотребления технологического оборудования отдельных каст.

1. Для краткосрочного прогнозирования величины  $W_{пр}$  с лагом в один год используют математическую модель, в которой период времени прогноза равен  $t + 1$ .
2. Проводят ретроспективную оценку относительной погрешности модели. В качестве сравниваемых значений принимают: фактическое потребление электроэнергии  $W_{ф}$  и прогнозные, полученные по математической модели  $W_{пр}$  за  $t$ -й год.

На основании расчетов получены параметры электропотребления для технологического оборудования всех каст распределения. На рис. 4 изображены графики электропотребления оборудования ноевой касты распределения и их аппроксимирующие зависимости.



**Рис. 4. Графики электропотребления и аппроксимирующие зависимости оборудования ноевой касты распределения**

Фактические данные электропотребления: электролизеров (—■—), сварочных аппаратов (—▲—), насосов (—●—); аппроксимирующая зависимость электропотребления: электролизеров (—□—), сварочных аппаратов (—△—), насосов (—○—).

Результаты расчета и прогнозирования электропотребления ноевой касты распределения приведены в табл. 7.

Сравнение  $W_{ф}$  и  $W_{пр}$  показывает, что относительная оценка прогноза составляет 0,85÷1,34%, что подтверждает адекватность и высокую точность полученной математической модели прогнозирования.

Приведенные в статье математические модели могут быть использованы в ходе планирования и прогнозирования потребления электроэнергии в различных отраслях промышленности.

*Клюев Роман Владимирович*

### Литература

1. Васильев И.Е. Анализ и расчет удельного расхода электроэнергии в процессе восстановления диоксида молибдена на основе полного факторного эксперимента (ПФЭ) [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Клюев // Электрика. – 2002. – Вып. 7. – С. 22-25.
2. Васильев И.Е. и др. Использование газольдера в качестве эффективного потребителя-регулятора суточного электропотребления на предприятиях твердосплавного производ-



- ства [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, Е.И. Васильев // Электрика. – 2005. – №4. – С. 10-13.
3. Васильев И.Е. и др. Использование рангового анализа техноценозов для расчета и прогнозирования электропотребления промышленного предприятия [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, Д.С. Сахаров // Труды молодых ученых / Владикавказский научный центр РАН и Правительства РСО-А. – 2004. – Вып. 2. – С. 39-44.
  4. Васильев И.Е. Математическая модель расчета и прогнозирования удельного расхода электроэнергии при производстве водорода [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. – 2002. – №3. – С. 59-62.
  5. Васильев И.Е. и др. Математическая модель расчета ФВП в несинусоидальности напряжения [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, Е.И. Васильев, О.А. Котова // Исследования по современному анализу и математическому моделированию / отв. ред. Ю.Ф. Коробейник, А.Г. Кусраев. – Владикавказ : Владикавказский науч. центр РАН и РСО-А, 2008. – С. 332-337.
  6. Васильев И.Е. и др. Моделирование водно-энергетических режимов устойчивой работы Зарамагской ГЭС-1 [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, П.Г. Кочиев // Труды СКГМИ : юбилейный выпуск. – 2006. – С. 333-338.
  7. Васильев И.Е. Факторный анализ потребления электроэнергии на горно-металлургических комбинатах [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – №1. – С. 269-273.
  8. Ключев Р.В. Математическая модель расчета высших гармонических составляющих токов и напряжений при работе вентильных преобразователей [Текст] / Р.В. Ключев // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сб. мат-лов Всеросс. студ. олимпиады, науч.-практ. конф. и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 118-120.
  9. Ключев Р.В. Разработка и исследование математической модели зависимости удельного расхода электроэнергии на получение водорода от технологических факторов [Текст] / Р.В. Ключев // Труды молодых ученых / Владикавказский науч. центр РАН и Правительства РСО-А. – 2003. – Вып. 3. – С. 57-64.
  10. Кудрин Б.И. Введение в технетику [Текст] / Б.И. Кудрин. – Томск : ТГУ, 1993. – 552 с.
  11. Олейников В.К. Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях [Текст] : учеб. пособие / В.К. Олейников, Г.В. Никифоров. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – 219 с.
  12. Хронусов Г.С. Комплексы потребителей – регуляторов мощности на горнорудных предприятиях [Текст] / Г.С. Хронусов. – М. : Недра, 1989. – 200 с.

**Ключевые слова**

Математическая модель; эксперимент; планирование; матрица; дисперсия; стандарт; регрессия; коэффициент; уравнение; потребление электроэнергии; водород; электролиз; ток; напряжение; гистограмма; адекватность.

**РЕЦЕНЗИЯ**

В представленной статье отражены вопросы математического моделирования электропотребления на промышленных предприятиях и гидроэлектростанциях. Моделирование проводилось на основе полного факторного эксперимента (ПФЭ), рангового расчета техноценозов, регрессионного и факторного анализов. В работе приводятся результаты многочисленных измерений электрических параметров, полученных в ходе проведения энергетических обследований и выполнения грантов Президента РФ.

Известно множество работ, связанных с математическим моделированием потребления электроэнергии в промышленности, однако комплексный подход к решению подобных задач в системе гидроэлектростанции – промышленные предприятия представляет несомненную новизну и значимость.

Математический аппарат реализован с помощью средств программного комплекса MathCad и MicroSoft Excel.

Все данные получены с использованием сертифицированных средств измерения, результаты имеют высокую степень воспроизводимости и могут быть использованы при построении математических моделей электропотребления на промышленных предприятиях цветной метал-

лургии ОАО «Победит», ОАО «Электроцинк» и в ходе строительства Зарамагской ГЭС

Все выводы, полученные в статье, подтверждаются расчетными данными и строго соответствуют основным положениям статьи. Все таблицы и иллюстрации соответствуют физическому смыслу исследуемых процессов.

В статье сделаны ссылки на 12 литературных источников, в 9 из которых автор принимал самое непосредственное участие, что подтверждает значимость научных положений статьи.

Замечаний по статье нет.

В целом статья написана грамотным техническим языком, в ней приведено много графиков и таблиц, отражающих весь спектр проводимых работ по математическому моделированию потребления электроэнергии в различных отраслях промышленности.

Рецензируемая статья заслуживает положительной оценки, тема, предложенная авторами, является актуальной, таким образом публикация может быть рекомендована к изданию.

*Хасцаев Б.Д., д.т.н., профессор, декан факультета электронной техники Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета)*

**11.2. MATHEMATICAL MODELING IN THE PROCESS OF PRODUCTION AND CONSUMPTION OF ELECTRIC POWER**

R.V. Kluyev, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department «Industrial Power Supply»

SKGMI (GTU)

The paper presents mathematical models of dependence of energy consumption from different technologists-economic factors. The model obtained in the results of the integrated energy surveys in the process of production and consumption of electric power at hydroelectric power stations, the industrial enterprises of non-ferrous metallurgy and the mining industry. The obtained mathematical models have a high adequacy and can be ip-used in the process of operation of energy facilities, for optimal planning and forecasting power consumption regimes. The study was conducted with the use of two Grants of the President of the RUSSIAN federation for support of preparing of young scientists.

**Literature**

1. V.K. Oleinikov, G.V. Nikiforov. Analysis and control of power consumption at the metallurgical enterprises: textbook. – Magnitogorsk: MG TU. G.I. Nosova, 1999. – 219 p.
2. G.S. Chronusov. Complexes consumers – regulators of power at the mining enterprises. – M.: Nedra, 1989. – 200 p.
3. B.I. Kudrin. Introduction to technique. – Tomsk: TOMSK state university, 1993. – 552 p.
4. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev, P.G. Kochiev. Modeling of water-energy regimes of steady work of the Zaramag's HPP-1 // Proceedings of the SKGMI, anniversary issue, 2006, p. 333-338.
5. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev. Analysis and calculation of specific energy consumption in the process of recovery of molybdenum on the basis of a full factorial experiment (FFE) // Journal of Electrical engineering, vol. 7, Moscow, 2002, p. 22-25.
6. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev. Mathematical model of calculation and forecasting of specific energy consumption for hydrogen production, «Iz. v. Electromechanics», №3, 2002, p. 59-62.
7. R.V. Kluyev. Development and research of mathematical models of dependence of specific energy consumption for hydrogen production from technological factors // Proceedings of young scientists, vol. 3, Vladikavkaz scientific center of the RAS and the Government of the republic North Ossetia-Alania, 2003, p. 57-64.

8. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev, E.I. Vasiliev. The use of gasholder as an effective consumer-regulator of the daily power consumption at the enterprises of tungsten carbide production // Journal of Electrical engineering, №4, Moscow, 2005, p. 10-13.
9. R.V. Klyuev. Mathematical model of calculation of higher harmonic currents and voltages in the work of the electronic converters // Energy- and resource saving. Non-traditional and renewable energy sources: a Collection of materials of all-Russian student olympiad, scientific-and-practical conference and exhibition of students, post-graduate students and young scientists, Yekaterinburg: Izd. GOU VPO URAL state technical university-UPI, 2007. – p. 118-120.
10. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev, E.I. Vasiliev, O.A. Kotova. Mathematical model of calculation of FVP in non-sine voltage // Research on modern analysis and mathematical modeling / отв. ред. J.F.. Corobeinik, A.G. Kusraev. – Vladikavkaz: the Vladikavkaz scientific center of the RAS and republic North Ossetia-Alania, 2008, p. 332-337.
11. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev. Factor analysis of energy consumption in the mining and metallurgical complexes // the Mountain information-analytical bulletin №1, Moscow: Izd. MSHU, 2009, p. 269-273.
12. I.E. Vasiliev, R.V. Klyuev, D.S. Sakharov. Using a ranking analysis technocoenoses for assessment and forecasting of electricity consumption of industrial enterprises // Proceedings of young scientists, vol. 2, Vladikavkaz scientific center of the RAS and the Government of the republic North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, 2004, p. 39-44.

### Keywords

The mathematical model; experiment; planning; the matrix; the variance; the standard; the regression; the coefficient; equation; the consumption of electrical energy; hydrogen; electrolysis; current; voltage; histogram; adequacy.