

DETERMINING THE RELATIVE ENERGY CONSUMPTION OF SEMI-AUTOGENOUS MILLS THROUGH COMPUTER PROCESSING OF INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM DATA

Ralitsa Boncheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia, E-mail: boncheva81@gmail.com

ABSTRACT. This study investigates the relative energy consumption of two semi-autogenous (SAG) mills operating under distinct operational conditions. The research methodology is based on the computational processing of real-time data extracted from supervisory control systems during the comminution of various ore types. Statistical analysis was performed to establish mathematical relationships between the objective function (relative energy consumption) and the corresponding control parameters logged by the automation systems. The derived mathematical models were rigorously evaluated regarding their statistical adequacy and significance. A comparative analysis was carried out to select the most appropriate regression model for each mill. Based on the analytical and graphical interpretation of the experimental data, key operational similarities and variations between the models were identified, providing insights into process optimisation.

Key words: semi-autogenous mill, relative energy consumption, mathematical model, grinding, statistical analysis.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТНОСИТЕЛНИЯ ЕНЕРГОРАЗХОД НА ПОЛУАВТОГЕННИ МЕЛНИЦИ ЧРЕЗ КОМПЮТЪРНА ОБРАБОТКА НА ДАННИ ОТ СИСТЕМИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Ралица Бончева

Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, 1700 София

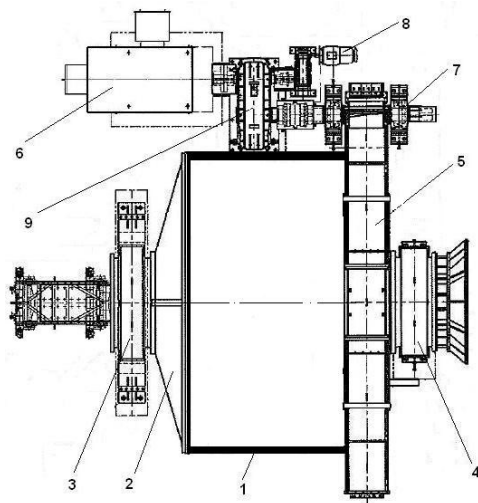
РЕЗЮМЕ. Настоящото изследване е посветено на оценката на относителния енергоразход при две полуавтогенни мелници, функциониращи в различни технологични режими. Методологията се базира на компютърна обработка на данни, генерирани от индустриалните системи за автоматизирано управление и контрол в процеса на смилане на разнообразни типове руди. Извършен е многофакторен статистически анализ за установяване на количествените зависимости между целевата функция (относителен енергоразход) и основните управляващи параметри. Получените математически модели са верифицирани по отношение на тяхната адекватност и статистическа значимост. Проведен е сравнителен анализ на прогнозните възможности на моделите, като за всеки мелничен агрегат е дефинирано оптималното регресионно уравнение. Въз основа на аналитичната и графичната интерпретация на резултатите са идентифицирани основните закономерности, рефлектиращи върху енергийната ефективност на процеса.

Ключови думи: полуавтогенна мелница, относителен енергоразход, математически модел, смилане, статистически анализ.

Въведение

Инсталираните индустриални полуавтогенни мелници са оборудвани със специализирани системи за контрол и управление, които архивират технологичните параметри на процеса в реално време за последващ анализ.

Мелниците, тип SAG (Фиг. 1), представляват барабанни полуавтогенни мелници, които се състоят от барабан 1, със страничните дъна (калаци) 2, на които са монтирани шийките лагерувани на плъзгащите лагери 3 – заден и 4 – преден.



Фиг. 1. Общ изглед на мелница тип SAG

Двигателят 6 задвижва чрез съединител редуктора 9, който е куплиран на вал – зъбното колело 7, зацепено със зъбния венец 5. Задвижването е оборудвано и с помощен двигател 8 и спирачка, използвани при техническо обслужване и ремонт на мелницата. Те работят при каскаден и водопаден скоростен режим. В барабана смилането се осъществява чрез удар, стриване и смачкване на рудата от едрите късове и топките.

Един от основните параметри на барабанните полуавтогенни мелници е относителният енергоразход.

Относителният енергоразход е количеството енергия, която е вложена за получаване на единица готов продукт. Той характеризира процеса на смилане откъм неговата енергийна страна.

Определяне на управляващи параметри влияещи на целевата функция относителен енергоразход

Първата задача при математическото моделиране на процесите в барабанните полуавтогенни мелници е точното дефиниране на целта на изследването и класификацията на технологичните фактори. Към входящите управляващи фактори се предявяват следните методологични изисквания:

1. *Определеност на дефиниционната област:* Всеки управляващ фактор трябва да притежава ясно ограничени

и технологично възможни граници на вариране (минимални и максимални стойности).

2. *Управляемост*: Факторите трябва да позволяват целенасочено установяване и стабилно поддържане на различни нива в рамките на тяхната дефиниционна област.

3. *Точност на измерване*: Стойностите на изследваните фактори трябва да се регистрират с възможно най-висока точност и минимална експериментална грешка.

4. *Независимост*: В анализираното множество не трябва да съществуват функционално свързани фактори. При провеждането на активен експеримент това изискване осигурява възможност за установяване и изменение на всеки фактор на определено ниво, независимо от нивата на останалите променливи.

5. *Съвместимост*: Изискването изключва взаимното блокиране на факторите и позволява физическото реализиране на всички комбинации от техните нива в дефиниционната област, което се явява необходимо условие при търсенето на оптимален технологичен режим.

Броят на първоначално набелязаните управляващи фактори се редуцира съгласно посочените критерии, след което се извършва детайлно отсяване на съществени от несъществени за изследването променливи.

Основната цел на настоящата разработка е установяването на количествените математически зависимости между управляващите параметри на мелници, тип SAG и дефинираната целева функция въз основа на статистическа обработка на промишлени масиви от данни, генерирани от системите за контрол. За целева функция на изследването е избран относителният енергоразход (Y).

Входящите управляващи параметри, които се измерват и архивират в процеса на работа, са:

1. Скорост на въртене на барабана (X_1). Представя се като относителна скорост в проценти от критичната (n , %) или в реални обороти за минута (n, min^{-1}).

2. Дебит на входящата руда ($X_2, t/h$). Параметърът отразява текущото количествено натоварване на мелничния агрегат.

3. Дебит на технологичната (задната) вода ($X_3, \frac{m^3}{h}$). Постъпващият воден поток изпълнява предимно транспортни функции за извеждане на готовия класифициран продукт от работното пространство на барабана.

4. Маса на пълнежа в барабана на мелницата (X_4, t). Този параметър характеризира степента на общо запълване на машината и се измерва чрез товарни клетки (везни), разположени под опорния заден лагер.

5. Износването на барабана на мелницата ($X_5, \%$). Този параметър не се получава текущо от автоматизирани системи за управление, а се определя периодично въз основа на данни от детайлно лазерно сканиране на вътрешния профил на мелницата.

Данни за обработка

Първоначално в таблица 1 са представени експерименталните данни за мелничен агрегат, тип SAG 6.7x4.4, които са мащабираны с оглед спазването на изискванията за конфиденциалност. Данните в таблица 1 отразяват работата на мелница SAG 6.7x4.4, като добивът на разчетна класа се регистрира от автоматизираната система за управление и контрол. Този параметър показва

производителността на агрегата по отношение на изходящия поток смляна руда (t/h), съдържащ 80% готов продукт.

Таблица 1

$\psi, \%$ X_1	$Q_B, m^3/h$ X_2	$Q, t/h$ X_3	M, t X_4	$i, \%$ X_5	$E, kWh/t$ Y
67,6	108,9	111,2	134	12,40	15,6
80,7	115,1	112,4	133	24,61	17,9
80,9	91,9	114,9	133,6	38,05	17,9
77,2	108	114,1	134,5	45,38	16,1
82,7	103,7	108,5	134,5	57,58	14,1
77,9	79,1	109,8	134,6	67,47	14,2
71,7	81,8	106,7	134,2	77,63	17,1
75,4	86,1	112,9	136,9	90,24	17,9
76,8	94,4	107,5	137,5	100	13,9
76,5	88,2	107,9	137,8	0	15,0
69,5	92,2	109,1	136,4	11,76	19,8
76,8	86,1	107,8	137,6	18,76	16,1
75,9	93,6	108,3	138,5	33,36	23,5
81,3	105,6	95,1	145	40,07	20,9
73	89,7	103,2	143,6	51,34	23,2
79,3	77,9	93,4	144,7	60,33	22,9
72,6	82,7	94,9	143,4	70,94	15,7
77,7	61,2	95	143,9	77,32	17,3
74,6	82,9	93,8	143,3	0	22,0
114,9	76,8	96,8	141,2	15,36	22,6
82,2	81,1	97,2	142,3	21,73	17,9
85,8	151,2	95,7	144,6	31,22	24,3
89	122,3	88,1	149,8	42,64	18,5
88,9	102,8	90,5	149,2	50,37	20,8
76,9	99,6	98,1	150,7	58,31	21,0
76,3	33,3	75,1	142,8	0	24,3
73,9	34,9	73,4	142,8	7,21	18,5
84,8	78,5	82,6	149,6	16,84	20,8
82,6	78,3	95,6	159,7	25,12	22,3
83,7	91,7	97,7	157,7	35,93	15,9
78,6	94,3	95,4	156,7	36,80	18,8
72,8	40,1	52,4	151,9	54,36	16,0
72,4	111,9	100,5	151,4	56,26	18,1
77,9	125,3	103,7	156,6	0,00	16,9
68,5	126,7	95,7	151,5	8,80	21,6
72,2	83,8	105,3	155,9	21,58	131,9
86,5	107,8	104,8	157,5	27,79	126,7
74,5	79,5	102,3	156,6	39,28	139,7
74,2	71,9	80,2	141,3	0	109,5
77,7	80,35	82,5	142,3	12,40	107,8

Аналогично, в таблица 2 са изложени мащабираните данни, получени от информационната система за управление и контрол на по-големия мелничен агрегат – тип SAG 8.5x5.3.

При втория изследван обект системата за управление и контрол изчислява относителния енергоразход като директно отношение на консумираната активна мощност към количеството готов продукт, произведен за единица време. Характерно за данните в таблица 2 е, че скоростта на въртене на мелницата е представена чрез работните обороти на главния задвижващ двигател.

Таблица 2.

$n, \text{ min}^{-1}$	$Q_b, \text{ m}^3/\text{h}$	$Q, \text{ t/h}$	$M, \text{ t}$	$i, \%$	$E, \text{ kWh/t}$
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y
982	311	198	77,3	26,34	12,65
1001,9	260	153	80,8	27,38	24,75
996	297	182	75,2	37,52	17,14
998	389	309	72,4	38,19	9,51
989	236	133	74,3	53,49	15,43
991	262	145	72,8	54,20	17,91
990	268	131	74,1	65,49	28,55
990	338	208	70,6	66,47	11,02
990	296	215	74,6	83,34	19,22
989	363	264	81,7	0,00	13,51
990	390	284	77,8	21,44	12,78
988	319	214	79	22,51	18,24
991	377	316	73	40,47	8,26
990	400	321	71,3	41,43	8,14
989	302	218	74,2	61,80	17,98
1057,2	367	290	71,9	62,85	0,00
1084,9	336	249	70,3	77,94	15,60
1005,6	371	292	68,5	0,00	10,33
938	362	294	68,9	21,82	10,48
969	344	273	68,8	22,91	12,50
995	348	277	68,2	35,98	12,67
927	335	261	68,1	36,81	10,88
1007	385	300	69,7	51,51	12,88
1007,2	386	304	67,1	52,62	11,48
1005,2	320	215	64,9	72,27	15,59
921	391	318	69,3	0,00	9,20
892	378	301	67,6	21,18	9,79
953	354	281	68,2	22,23	11,24
958	339	273	64,3	30,08	9,78
888	349	286	69,7	30,50	11,49
964	359	276	69	38,69	13,37
947	339	276	68,7	39,68	10,24
985	312	227	66	58,37	16,54
882	322	285	66,6	0,00	7,63
914	325	242	67,9	15,75	12,29
881	343	300	67,1	16,46	7,98
880	339	247	69,8	38,48	11,87
1006	384	293	68,2	39,59	11,78
978	354	262	66,9	56,11	13,92
1005,9	406	305	72,5	0,70	10,51
928	377	276	72,2	24,91	12,19
953	383	198	69,6	26,57	10,67
901	369	153	68	43,21	9,69
946	361	182	69,7	44,24	11,40
1005,1	371	309	66,4	61,21	10,69
982	385	133	66,6	62,17	12,65
1001,9	394	145	77,3	74,27	24,75
996	311	131	80,8	74,98	17,14
998	260	208	75,2	92,84	9,51
989	297	215	72,4	26,34	15,43
991	389	264	74,3	27,38	17,91
990	236	284	72,8	37,52	28,55
990	262	214	74,1	38,19	11,02
990	268	316	70,6	53,49	19,22
989	338	321	74,6	54,20	13,51

Останалите технологични параметри са идентични по структура с тези от таблица 1. Необходимо е да се отчете, че мелничният агрегат SAG 8.5x5.3 се характеризира с по-

големи габаритни размери и преработва руда с по-висока якост и абразивност.

Резултати от обработката на данните от системите за управление на мелница тип SAG

Данните от мелниците SAG са обработени статистически с програмите R Studio (Задорожний С., 2023) и STATGRAPHICS (Халафян, 2010), в резултат на което бяха генерирани редица регресионни модели. Оценката на статистическата значимост на регресионните коефициенти е извършена по критерия на Стюdent (t-критерий) при избрано доверително ниво $\alpha = 0,05$ и минимален брой на степените на свобода $\nu > 8$. В софтуерната среда тази процедура се базира на изчисляване на вероятността за значимост (P-value). При изпълнение на условието:

$$P - \text{Value} < \alpha \quad (1)$$

съответният регресионен коефициент се приема за статистически значим (където α е нивото на значимост).

Адекватността на получените регресионни уравнения като цяло е оценена чрез проверка на глобалната хипотеза по критерия на Фишер (F-критерий) (Hill & Lewicki, 2006).

Най-висока степен на адекватност сред моделите, генерирани в среда на R Studio за мелница SAG 6.7x4.4, демонстрира регресионното уравнение, чиито параметри са систематизирани в таблица 3.

Таблица 3. Параметри на модела от R STUDIO

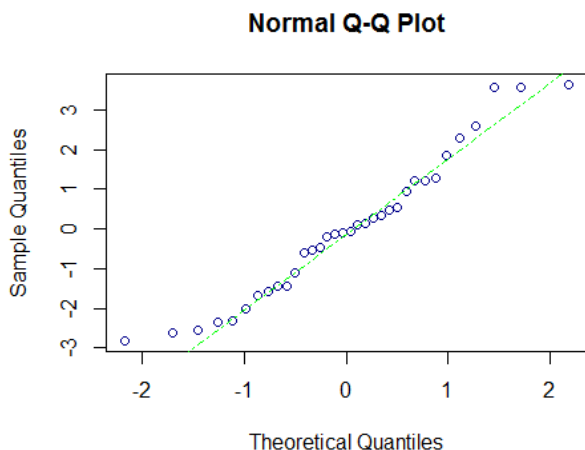
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
i	-13.775327	3.355908	4.105	0.000301
Q	-0.128460	0.029744	-4.319	0.000167
n	2.733458	0.794242	3.442	0.001777
M	0.192564	0.046812	4.114	0.000294
i / M	-0.009283	0.005663	-1.639	0.111937
Parameter	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
i	1	11794.4	11794.4	3151.1633
Q	1	64.7	64.7	17.2735
n	1	466.8	466.8	124.7112
M	1	57.1	57.	15.2653
i / M	1	10.1	10.1	2.6876
Residuals	29	108.5	3.7	
Статистика на модела				
$R^2 =$			99,13	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			98,98	%
Standard Error of Est. =			1,935	
F-statistic =			662,3	
p-value =			< 2,2e-16	

Анализът на параметрите показва, че коефициентът на множествена детерминация възлиза на 99,13%, а неговата коригирана стойност надхвърля 98,98%, което е индикатор за изключително висока представителност. Изчислените равнища на доверителна вероятност (P-value) за модела са значително под критичната граница от 0,05, което потвърждава неговата адекватност с доверителна вероятност над 97%.

Математическият модел може да се представи във вида:

$$E = -13,77.i - 0,128.Q + 2,73.n + 0,192.M - 0,009 \cdot \frac{i}{M}, \text{ kW} \quad (2)$$

Степента на съответствие между прогнозните стойности на модела и реалните експериментални данни е илюстрирана графично на фигура 2.



Фиг. 2. Корелация между експерименталните данни и прогнозния математически модел за мелница SAG 6,7x4,4

Най-адекватен модел получен посредством използването на програмата STATGRAPHICS се отнася за мелница SAG 8,5 x 5,3 и е показан на Таблица 4.

Таблица 4. Параметри на модела от STATGRAPHICS

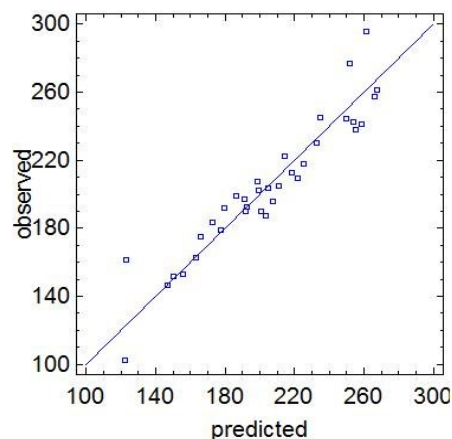
Параметри на модела				
Parameter	Estimate	Error	Statistic	P-Value
Q	-0,0559	0,00677	-0,27041	0
$P.i$	$0,497 \cdot 10^{-4}$	$0,176 \cdot 10^{-5}$	2,8137	0,007
M	0,24687	0,0687	4,6749	0
n	0,008	0,0036	3,191	0,031
	Df	Sum of Squares	Mean Square	P-Value
Model	4	6636,7	1461,34	0
Residual	45	72,564	1,624	
Total	49			
Статистика на модела				
$R^2 =$			98,75	%
R^2 (adjusted for d.f.) =			98,68	%
Standard Error of Est. =			1,273	
Mean absolute error =			0,951	
Durbin – Watson statistic=			1,462	

Отчетените коефициенти на детерминация ($R^2 = 98,75\%$) и коригирана детерминация ($R^2_{\text{кор}} > 98\%$) доказват отличните статистически и прогнозни качества на този модел спрямо останалите изследвани варианти. Стойностите на P-value за коефициентите се намират под критичния праг от 0,05, което потвърждава високата надеждност и статистическа адекватност на модела с доверителна вероятност над 98%.

Математическият вид на изведения модел се дефинира чрез уравнението:

$$E = 0,059.Q + 0,497 \cdot 10^{-4}.P.i + 0,268.M + 0,801 \cdot 10^{-2}.n, \text{ kWh / t} \quad (3)$$

Визуалното съответствие между експериментално регистрираните стойности и изчислените по теоретичния модел данни е представено чрез корелационната диаграма на фигура 3.



Фиг. 3. Корелация между експерименталните данни и прогнозния математически модел за мелница SAG 8,5 x 5,3

Изводи

Въз основа на проведените теоретико-експериментални изследвания и компютърната обработка на промишлени масиви от данни могат да бъдат формулирани следните основни изводи с научна и научно-приложна значимост:

1. Многофакторна обусловеност на енергийната ефективност: Доказано е, че относителният енергоразход и при двата типа мелнични агрегати (SAG 6.7x4.4 и SAG 8.5x5.3) е комплексна функция от динамичните параметри на режима (скорост на въртене, количествено натоварване с руда, дебит на технологичната вода), геометричното състояние на работното пространство (износване на облицовките) и индиректно измерваната маса на вътрешномелничния пълнеж.

2. Енергетична и производителна динамика на скоростния режим: Установено е, че интензифицирането на скоростта на въртене на барабана рефлектира в пропорционално нарастване на добива на разчетна класа. Това се явява пряко следствие от физическата закономерност, при която полезната мощност е функция от ъгловата скорост и съпротивителния момент на мелещата среда при прехода от каскаден към водопаден режим на смилане. Генерираните модели позволяват определянето на критичния баланс, при който прирастът в производителността компенсира повишената консумация на електроенергия.

3. Влияние на вътрешномелничното запълване: Нарастването на масата на пълнежа в барабана води до закономерно повишаване на относителния енергоразход. Това се обяснява с увеличаването на общия инерционен

момент и необходимостта от по-голяма мощност за повдигане на материала до точката на откъсване. Практическата стойност на този извод се състои във възможността за оптимизиране на контрола над товарните клетки с цел предотвратяване на претоварването на мелницата, което драстично влошава специфичните енергийни показатели.

4. Машабен геометричен ефект при износване на облицовките: Идентифициран е специфичен машабен ефект: при по-малкия мелничен агрегат (SAG 6.7x4.4) износването на облицовките води до изразено намаляване на относителния енергоразход, докато при по-големия агрегат (SAG 8.5x5.3) това влияние е статистически незначително. Явлението се дължи на факта, че при по-малкия диаметър относителният прираст на полезния вътрешен обем вследствие на износването е по-съществен. Това оптимизира траекторията на движение на мелещите тела и подобрява ефективността на раздробяването на тон готов продукт.

5. Практическа приложимост на моделите в индустриална среда: Изведените високоадекватни регресионни уравнения притежават висок прогнозен потенциал (с коефициенти на детерминация над 98%). В

практически план те могат да бъдат интегрирани директно в софтуерните системи за експертно управление на обогатителните фабрики. Моделите позволяват в реално време да се прогнозира относителният енергоразход при промяна на физико-механичните свойства на входящата руда (якост и абразивност), осигурявайки на операторския състав възможност за своевременна корекция на дебита на захранване и оптимизация на специфичните разходи за енергия.

Литература

- Задорожный, С. С. (2023) *Статистическая обработка данных на языке R: Учебно-методическое пособие*. Москва: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.
- Халафян, А. А. (2010). *STATISTICA 6. Статистический анализ данных*. Москва: Бином-Пресс.
- Hill, T., & Lewicki, P. (2006). *Statistics: Methods and Applications. A Comprehensive Reference for Science, Industry, and Data Mining*. StatSoft