

시멘트 분쇄공정에서의 변수 상관관계 분석 및 실험모델 구성

°황일영, 방성호*, 김기범*, 이형두*, 전 귀*, 이원규*, 이광순
서강대학교 공과대학 화학공학과
*동양중앙연구소

Correlation Analysis of Variables and Construction of Experimental Model for a Cement Grinding Process

° I. Y. Hwang, S. H. Bang*, G. B. Kim*, H. D. Lee*, G. Jeon*, W. K. Lee, K. S. Lee
Dept. of Chem. Eng., Sogang University
* Tong Yang Central Laboratories

ABSTRACT

Grinding in the cement industry is a very energy-exacting process, therefore it is essential that these systems should operate with the highest possible efficiency. But, Cement grinding process is a complicated nonlinear system with large dead time, very noisy signal and many stochastic disturbances. So, it is difficult to develop mathematic process model. This paper presents correlation analysis of process variables and construction of experimental model for a ball mill grinding process.

1. 서론

시멘트 공장에서 분쇄공정에 사용되는 전력은 전체 사용전력의 50-70%를 차지하며 전체 제조원가의 20-30%를 차지한다. 따라서 생산성 향상의 측면에서 공정 최적화가 절실히 요구된다. 즉 제품의 입도를 원하는 기준치로 유지하면서 생산량을 극대화 시켜야 한다. 그러나 시멘트 분쇄공정은 변수 측정시 잡음과 외란이 심하고, 지연시간이 길고, 비선형적이며, 재순환이 있는 공정이므로 적절한 공정 모델링이 어렵다. 이 중에서 특히 분쇄공정의 모델링의 기초가 되는 공

정 주요 변수들간의 상관관계 분석은 변수 측정 시 생기는 잡음과 직접 측정이 곤란한 변수들 때문에 어렵다. 따라서 시멘트 분쇄공정의 정확한 공정 모델링을 위해서는 공정의 주요 변수들간의 상관관계 분석과 변수들간의 실험 모델 구성이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 동양시멘트 삼척공장의 조업 데이터를 이용하여 시멘트 분쇄공정에서 가장 많이 사용되는 볼 밀 분쇄공정에 대한 주요 공정변수인 원료 공급량, 조분량, 밀 공급량, 버킷 엘리베이터 전력, 밀 유향레벨 등의 주요 변수들간의 상관관계 분석과 identification을 통하여 모델 구조를 제시하였다.

2. 공정개요

동양시멘트에서 시멘트 분쇄를 위해 사용하고 있는 분쇄기는 ball mill의 일종인 튜브밀이다. 밀동체는 diaphragm에 의해 2개의 실로 나누어져 있다. 1실에서는 대형강구(ϕ 100 mm - ϕ 60 mm)를 충전하여 조분쇄가 이루어지고, 조분쇄된 피분쇄물은 밀 통풍공기에 의해 밀 2실로 이송된다. 2실의 역할은 주로 미분쇄이며 소형강구 (ϕ 50 mm - ϕ 17 mm)가 충전된다.

볼밀의 분쇄공정은 폐회로(closed circuit) 방

식으로 밀 본체와 분급기인 cyclone air separator, 집진장치인 E.P.(electrostatic precipitator), 혹은 B/F(bag filter)로 구성되어 있다. 밀에서 분쇄된 피분쇄물은 배출되어 B/E(bucket elevator)에 실려 분급장치인 separator에 투입된다. Separator에서는 조분과 정분을 분급하여 조분은 밀 1실로 투입하여 재분쇄시키고, 정분은 A/S(air slide), F/C(flow conveyor), B/E등의 장치에 의해 수송되어 silo에 저장된다. 시멘트 제조를 위해 사용되는 원료로는 소성공정에서 제조한 클링커와 용결지연제인 석고를 약 3-4% 정도 시멘트밀에 투입한다. 그림 1은 일반적인 불 밀 분쇄공정에 대한 공정도이다.

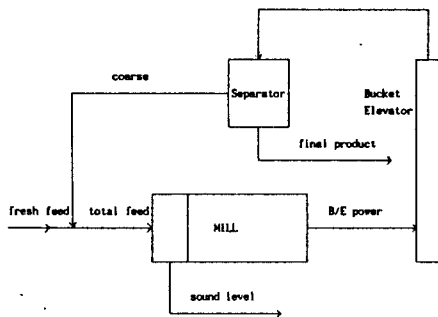


Fig. 1. Block-scheme of the end-discharge ball mill-classifier system.

3. 변수들간의 상관관계 분석

시멘트 분쇄공정에서 운전시 측정되는 중요한 변수로는 원료 공급량, 조분량, 밀 공급량, 버킷엘리베이터 전력, 밀 음향레벨 등이 있다. 그림 2는 실제 공장에서 센서를 통하여 측정된 값을 시간에 대하여 0-1.1 volt 사이의 값으로 표준화하여 나타내었다.

밀 생산량을 나타내는 버킷엘리베이터 전력, 밀 체류량을 나타내는 밀 음향레벨과 silo에서 공급되는 원료 공급량과 재순환되는 조분량의 합인 밀 공급량은 불 밀 분쇄공정의 제어에 가장 많이 사용되는 변수들이다. 이 중에서 버킷엘리베이터 전력은 밀 생산량에 비례하는 간접 측정변수이고, 밀 음향레벨은 밀 체류량에 반비례하는 간접 측정변수이다. 일반적으로 피분쇄물의

양이 많으면 밀 음향레벨은 낮아지고, 밀 생산량은 증가하므로 버킷엘리베이터 전력은 증가한다. 그러므로 이들 세 변수들간의 상관관계 분석은 불 밀 분쇄공정의 특성을 파악하는데 중요한 자료가 된다.

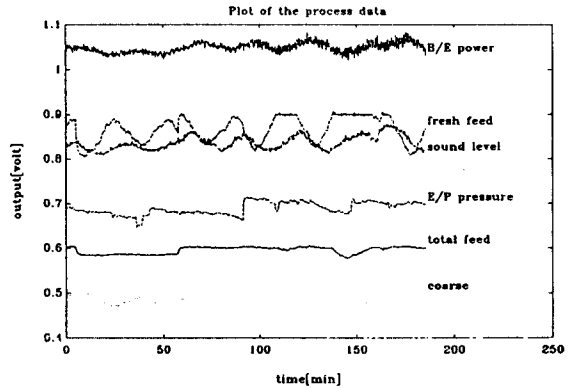


Fig. 2. Plot of the process data.

상관관계 분석을 위하여 이들 세 변수들간의 Cross-Covariance를 구하여 각각의 변수들간의 관계의 정도를 수식화 하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$\phi_{xy}(m) = E((x_n - \bar{x})(y_{n+m} - \bar{y})) \quad (1)$$

여기서 \bar{x} , \bar{y} : 각각의 측정치들의 평균값

분석결과는 그림 3과 같다. 밀 공급량과 밀 음향 레벨 사이에는 4.17분의 주기로 강한 correlation이 있고, 밀 음향레벨과 버킷엘리베이터 전력간에는 9.00분의 주기로 강한 correlation이 있다. 또 밀 공급량과 버킷엘리베이터 전력간에도 14.00분의 주기로 강한 correlation이 있다.

이 결과는 실제 공정의 운전상황과 일치한다. 즉 분석하여 얻은 주기들은 실제 공정에서 밀 체류시간과 일치한다. 밀 공급량과 밀 음향레벨의 4.17분의 주기는 밀 입구에서 밀 1실 사이의 체류시간을 나타낸다. 밀 음향레벨과 버킷엘리베이터 전력의 9.00분의 주기는 밀 2실에서 밀 출구 사이의 체류시간을 나타낸다. 그리고 밀 공급량과 버킷엘리베이터 전력간의 14.00분의 주기는 밀 입구에서 밀 출구까지의 전체 밀 체류시간을 나타낸다. 이 밀 체류시간은 피분쇄물인 클링커

의 분쇄성에 따라서 변하는데, 우리가 구한 밀 체류시간은 약 3시간의 운전시간동안 분쇄된 피 분쇄물의 평균 체류시간이다.

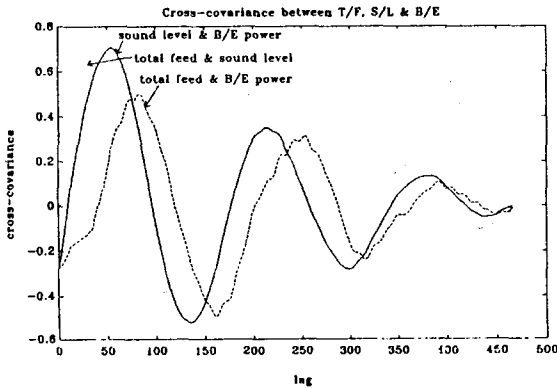


Fig. 3. Cross-covariance between total feed, sound level, B/E power.

4. 불 밀 분쇄공정에 대한 모델 구성

실제 조입데이터를 이용하여 밀 공급량을 입력변수로 하고 버켓엘리베이터 전력을 출력변수로 하는 ARMAX 모델과, 밀 공급량을 입력변수로 밀 음향레벨을 출력변수로 하는 ARMAX 모델을 구성하였다. ARMAX 모델의 일반적인 구조는 다음과 같다.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-nk) + C(q^{-1})e(t) \quad (2)$$

여기서 $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$

$$B(q^{-1}) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_nq^{-n+1}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_nq^{-n}$$

nk = number of delays from input to output

$e(t)$ = white noise

ARMAX 모델의 계수와 차수는 반복적인 Gauss-Newton 알고리즘에 의하여 구하여진다. 이 알고리즘은 Gauss-Newton 벡터의 norm이 0.01보다 작을때까지 반복 수행된다.

4.1 밀 공급량과 버켓엘리베이터 전력 사이의 ARMAX 모델 구성

그림 4는 입력변수인 밀 공급량과 출력변수

인 버켓엘리베이터 전력의 실제 운전시 측정된 값을 0-1.1 volt로 표준화하여 나타내었다. 그림 5는 출력변수의 주기성을 분석하기 위하여 버켓엘리베이터 전력의 power spectral density를 계산하여 나타내었다. 계산결과 버켓엘리베이터 전력은 28.45분의 주기성을 보였다. 이것은 실제공정에서 밀 1실에서 밀 2실로 피분쇄물의 주기적인 넘침 현상과 밀 공급량 자체의 주기성에 기인한다.

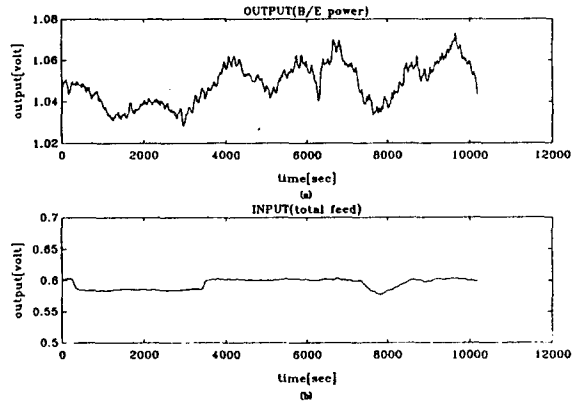


Fig. 4. Plot of the output variable-B/E power(a) and the input variable-total feed(b).

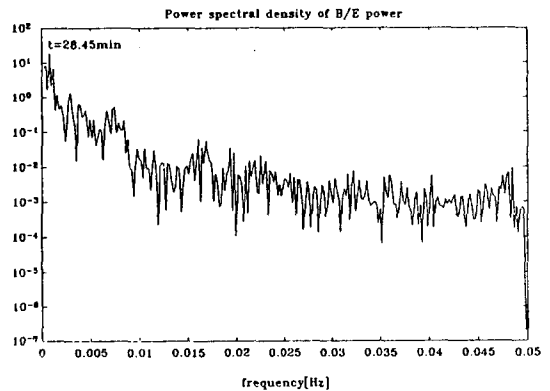


Fig. 5. Power spectral density of B/E power.

그림 6은 모델의 차수를 나타내는 na , nb , nc , nk 의 값이 각각 [6 2 4 6]인 ARMAX 모델에 의하여 구한 출력변수 값과 실제 공정에서 측정된 측정변수 값을 비교하여 나타냈다. 실제 측정치인 실선과 계산값인 점선이 거의 일치함을 보이고 있다. 그림 7은 ARMAX 모델에 대한 전달함수의 pole과 zero의 위치를 나타내었다. 그림에서 보듯이 pole과 zero는 안정한 영역에 있

다. 진동이 없는 1개의 pole과 공정자체의 진동을 유발하는 5개의 pole이 있다.

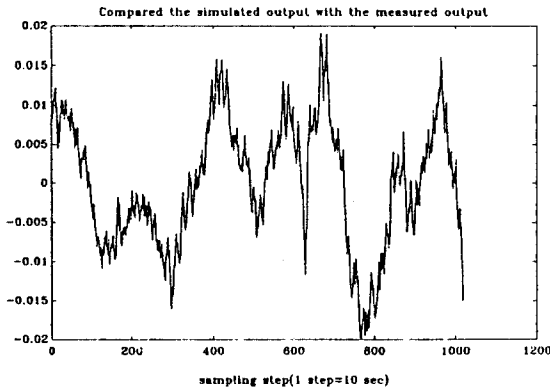


Fig. 6. Compared the simulated output(B/E power) with the measured output(B/E power).

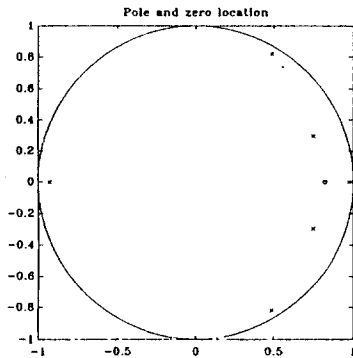


Fig. 7. Pole and zero location.

모델 검증은 ARMAX 모델 구성시 사용한 다음과 같은 가정을 역으로 검증하는 방법을 사용하였다.

- 가정1: $e(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음이다.
 - 가정2: $e(t)$ 는 모든 입력신호와 독립적이다.
- 즉 $Ee(t)u(s)=0$, 모든 t, s

여기서 $e(t)$: 시간 t 에서의 예측오차
 $u(s)$: 시간 s 에서의 입력신호(밀 공급량)

가정1은 예측오차 $e(t)$ 의 autocorrelation을 구하여 검증하였다. $e(t)$ 의 autocorrelation function $\hat{r}_e(\tau)$ 는 식(3)과 같다.

$$\hat{r}_e(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} e(t+\tau)e(t) \quad (\tau \geq 0) \quad (3)$$

식(3)이 가정1을 만족하기 위해서는 다음 식(4)를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \hat{r}_e(\tau) &\rightarrow 0 \quad \tau \neq 0 \\ &\text{as } N \rightarrow \infty \quad (4) \\ \hat{r}_e(0) &\rightarrow \lambda^2 = Ee^2(t) \end{aligned}$$

식(4)를 표준화하면 식(5)와 같다.

$$x_t = \frac{\hat{r}_e(\tau)}{\hat{r}_e(0)} \quad (5)$$

그림 8은 ARMAX 모델에 의하여 구한 출력변수와 추정된 출력변수와의 차이인 예측오차이다. 이 값들의 평균은 0이다. 그림 9는 식(3)에서 계산된 예측오차의 autocorrelation 값이다. 그림 10은 식(5)에 의하여 계산된 표준화된 autocorrelation 값이다. 각각의 값들이 식(4)를 만족하는 범위인 점선으로 그려진 99% 신뢰구간에 수렴함을 알 수 있다.

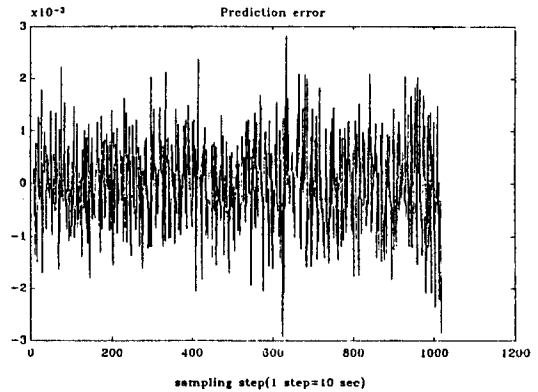


Fig. 8. Prediction error.

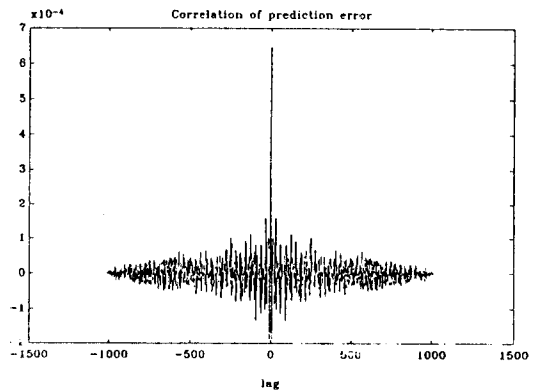


Fig. 9. Correlation of prediction error.

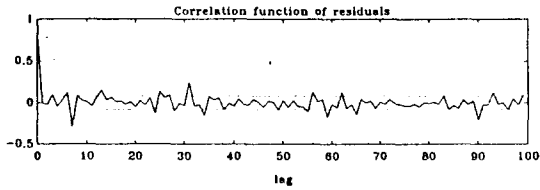


Fig. 10. Normalized autocorrelation function of prediction error.

가정 2는 예측오차 $e(t)$ 와 입력신호 $u(s)$ 의 cross-correlation을 구하여 검증하였다. 가정 2를 만족하기 위해서는 예측오차와 입력신호가 독립적이어야 한다. 따라서 식(6)이 만족되어야 한다.

$$r_{eu}(\tau) = Ee(t+\tau)u(t) = 0 \quad (6)$$

$e(t)$ 와 $u(s)$ 의 cross-correlation function $\hat{r}_{eu}(\tau)$ 는 식(7)과 같다.

$$\hat{r}_{eu}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1-\max(0,\tau)}^{N-\max(0,\tau)} e(t+\tau)u(t) \quad (7)$$

식(7)을 표준화하면 식(8)과 같다.

$$x_{\tau} = \frac{\hat{r}_{eu}(\tau)}{[\hat{r}_e(0)\hat{r}_u(0)]^{1/2}} \quad (8)$$

그림 11은 식(8)에 의하여 계산된 예측오차와 입력신호의 cross-correlation 값이다. 각각의 값들이 식(6)을 99% 신뢰구간에서 만족함을 알 수 있다.

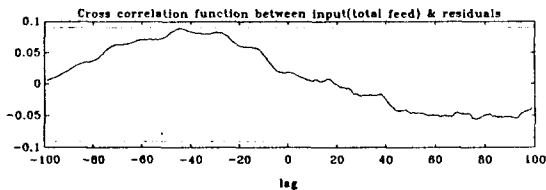


Fig. 11. Normalized cross correlation function between input(total feed) and prediction error.

4. 2 밀 공급량과 밀 음향레벨 사이의 ARMAX 모델 구성

그림 12는 입력변수인 밀 공급량과 출력변수인 밀 음향레벨의 실제 측정값이다. 그림 13은 밀 음향레벨의 주기성을 power spectral density

를 이용하여 분석한 결과이다. 분석결과 버켓엘리베이터 전력과 같은 28.45분의 주기성을 보였다. 그림 14는 모델 차수 n_a, n_b, n_c, n_k 가 각각 [6 2 4 0]인 ARMAX 모델에 의하여 구한 밀 음향레벨과 실제 측정치를 비교하였다. 측정치와 계산값이 거의 일치함을 보이고 있다. 그림 15와 그림 16은 모델 검증을 위해 식(5)와 식(8)에 의하여 계산된 correlation을 99% 신뢰구간에 대하여 나타내었다. 그 결과 각각의 값들이 99% 신뢰구간 안에 수렴한다.

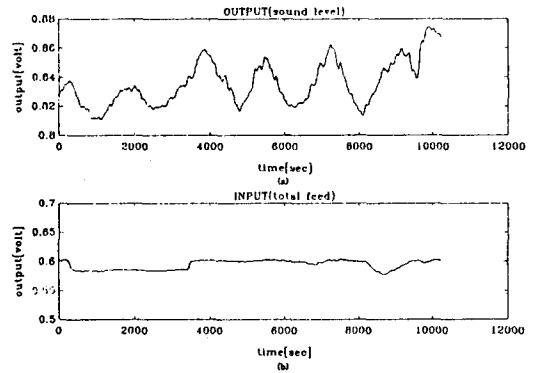


Fig. 12. Plot of the output variable: sound level(a) and the input variable: total feed(b).

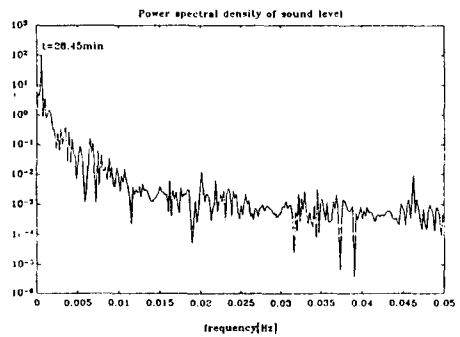


Fig. 13. Power spectral density of sound level.

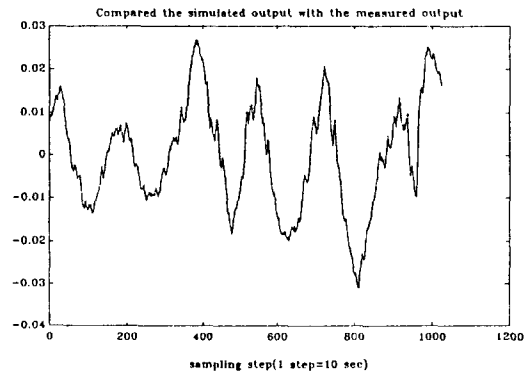


Fig. 14. Compared the simulated output(sound level) with the measured output(sound level).

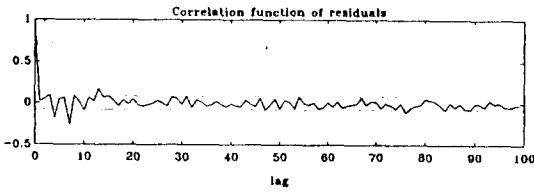


Fig. 15. Normalized autocorrelation function of prediction error.

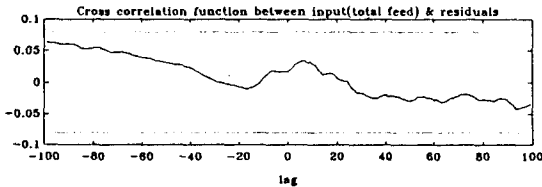


Fig. 16. Normalized cross correlation function between input (total feed) and prediction error.

5. 결론

본 연구에서는 불 밀 분쇄공정의 주요 변수인 밀 공급량, 벤키티리베이터 전력, 밀 음향레벨간에 상관관계 분석과 identification을 통하여 불 밀 분쇄공정에 대한 실험 모델을 제시하였다.

그 결과 밀 입구와 밀 1실 사이의 평균 체류시간은 4.17분, 밀 2실에서 밀 출구까지의 평균 체류시간은 9.00분, 그리고 밀 입구에서 밀 출구까지의 밀 전체의 평균 체류시간은 14.00분으로 밝혀졌다. 실제 조업 데이터 분석을 통하여 밀 공급량을 입력변수로 벤키티리베이터 전력을 출력변수로 하는 밀 공정에 대하여 차수가 [6 2 4 6]인 ARMAX 모델을 구하였다. 또, 밀 공급량을 입력변수로 밀 음향레벨을 출력변수로 하는 밀 공정에 대하여 차수가 [6 2 4 0]인 ARMAX 모델을 구하였다. 각각의 모델은 correlation test에 의하여 검증하였다.

참고문헌

- [1] Keviczky, L., Hilger, M., "Mathematics and Control Engineering of Grinding Technology", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1989.
- [2] Ljung, L., "System Identification-Theory

for the User", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987.

- [3] Torsten Soderstrom, Petre Stoica, "System Identification", Prentice-Hall International, London, 1989.
- [4] Ioan Dore Landau, "System Identification and Control Design", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1990.
- [5] Austin, L.G., Bhatia, V.K., "Experimental Methods for Grinding Studies in Laboratory Mills", Powder Technology, 5, pp261-266, 1972.
- [6] Keviczky, L., "Nonlinear Dynamic Identification of Cement Mill to be Optimized", 4th IFAC Symp. on Ident. and Syst. Par. Est., Tbilisi, pp388-396, 1976.
- [7] Schulz, R., "Adaptive Control of a Ball Mill with Self-Tuning Reference Model", Proc. of IFAC/IFIP Symp. on Real-Time Digital Control Appls., Guadalajara, Mexico, pp203-207, 1983.