

**Ανάπτυξη και υλοποίηση βέλτιστου αυτομάτου ελέγχου
της διεργασίας άλεσης τσιμέντου**
Development and realization of optimal automatic control of
the cement grinding process

Δημήτρης ΤΣΑΜΑΤΣΟΥΛΗΣ¹

Λέξεις κλειδιά: Τσιμέντο, άλεση, δυναμική, αβεβαιότητα, PID, προσομοίωση
Keywords: Cement, grinding, dynamics, uncertainty, PID, simulation

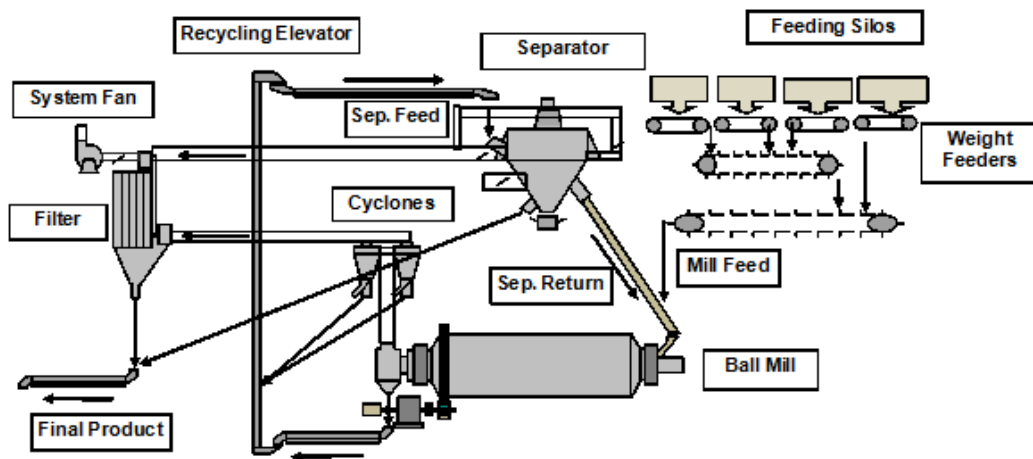
ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα μελέτη υλοποιείται η βελτιστοποίηση των ελεγκτών PID που ρυθμίζουν την διεργασία άλεσης με βάση δυναμικά πρότυπα και ολοκληρωμένο λογισμικό. Τα σφάλματα συσχετίζονται με μοντέλα αυτό-συσχέτισης. Οι παράμετροι και η διασυνδεδεμένη αβεβαιότητά τους υπολογίζονται ανά τύπο τσιμέντου και τροφοδοτούνται σε λογισμικό που υπολογίζει την βέλτιστη περιοχή των συντελεστών του PID, ικανοποιώντας συγκεκριμένα κριτήρια ευρωστίας, κατόπιν δε τροφοδοτούνται σε προσομοιωτή που περιλαμβάνει όλα τα βασικά στοιχεία της διεργασίας. Η εφαρμογή της βελτιστοποίησης σε βιομηχανικούς μύλους οδηγεί σε τιμές της μεταβλητής διεργασίας που απέχουν έως και 2.0% από το σημείο λειτουργίας. Έτσι επιτυγχάνεται σταθερότερο ποιοτικά προϊόν με παράλληλη υψηλή παραγωγικότητα.

ABSTRACT: The current study realizes the optimization of PID controllers regulating the cement grinding process, based on dynamic models and integrated software. Autoregressive models are used to correlate the derived errors. The parameters and their uncertainty are computed per cement type and are fed to the software that calculates the optimum region of PID coefficients, satisfying concrete robustness criteria. These results are the inputs of a simulator that incorporates all the basic elements of the process. The implementation of the optimization to industrial mills leads to values of the process variable differing up to 2% from the set point. In this way products of constant quality and high productivity are simultaneously achieved.

Συντονιστής Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε. email:
d.tsamatsoulis@halyps.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αυτόματος έλεγχος της διεργασίας της άλεσης παραμένει για την τσιμεντοβιομηχανία ένα προκλητικό πεδίο έρευνας εφόσον συνεχώς απαιτείται μια σταθερή ποιότητα προϊόντος συνδυασμένη με υψηλή παραγωγικότητα. Στην διεργασία υπεισέρχονται πολλαπλές αβεβαιότητες, μη γραμμικότητες, συχνή αλλαγή των σημείων λειτουργίας και των αντιστοίχων μεταβλητών. Για λόγους παραγωγικότητας και ποιότητας η άλεση συνήθως επιτελείται σε κλειστά κυκλώματα: Ο μύλος τσιμέντου (MT) τροφοδοτείται με πρώτες ύλες μέσω πλαστίγγων υψηλής ακρίβειας. Τα προϊόν του MT τροφοδοτείται μέσω του αναβατορίου κύκλου σε δυναμικό διαχωριστή (Δ/Χ). Το λεπτό προϊόν του Δ/Χ αποτελεί το τελικό προϊόν, ενώ το χοντρό προϊόν επιστρέφει στον MT και αλέθεται ξανά. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής του κλειστού κυκλώματος άλεσης φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Κλειστό κύκλωμα άλεσης τσιμέντου

Στους τρέχοντες αυτοματισμούς μεταβλητή ελέγχου αποτελεί συνήθως η παροχή τροφοδοσίας του MT ενώ μεταβλητή της διεργασίας αποτελούν συνήθως: (α) Η ισχύς του αναβατορίου κύκλου, (β) η παροχή των επιστροφών στον MT, (γ) η ισχύς του MT ή συνδυασμός των παραπάνω. Σημαντικός αριθμός μελετών περιγράφουν ποικιλία τεχνικών αυτοματισμού της λειτουργίας των MT. Ο έλεγχος με μοντέλο

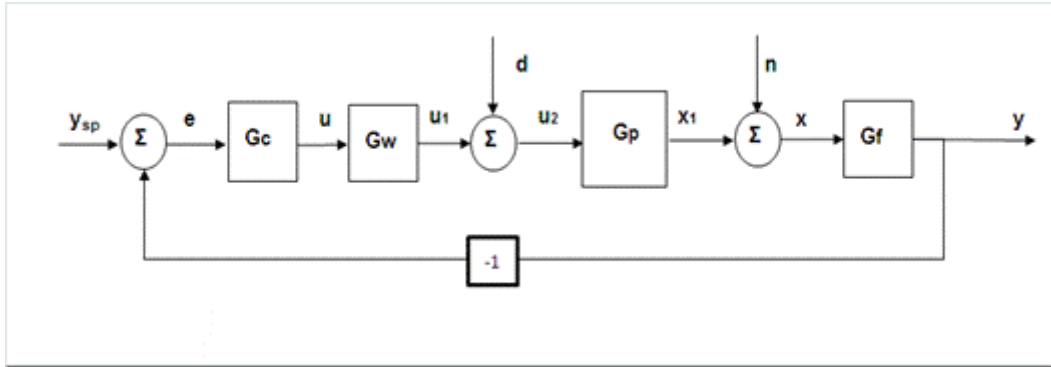
πρόβλεψης (Model predictive control – MPD) χρησιμοποιείται αρκετά συχνά - Ramasamy et al. (2005), Prasath et al. (2010). Ωστόσο, όπως σημειώνουν οι Astrom και Hagglund (2006), πάνω από το 95% των βρόχων ελέγχου στις βιομηχανικές διεργασίες είναι τύπου αναλογικού – ολοκληρωτικού – διαφορικού (PID). Επιπλέον όπως αναφέρει ο Astrom (2000), η ευρωστία (robustness) και η αβεβαιότητα του μοντέλου κατέχουν κεντρική θέση στο πεδίο του αυτομάτου ελέγχου. Για το λόγο αυτό, όσον αφορά ένα πρότυπο που περιγράφει την δυναμική της άλεσης είναι σημαντικές τόσο οι τιμές των δυναμικών παραμέτρων όσο και η αβεβαιότητά τους. Ένα ενδιαφέρον πρότυπο «μαύρου κουτιού» (black box model) εφαρμόστηκε από τον Van Breusegem et al. (1994) βασισμένο σε ένα σύνολο τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός πολύ-μεταβλητού γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή (multivariable linear quadratic controller -MLQC). Παραπλήσια προσέγγιση ακολουθήθηκε από τον Boulvin et al. (1999) και τον Tsamatsoulis (2009). Ο προηγούμενος συγγραφέας αξιοποίησε τις δυναμικές παραμέτρους για να υπολογίσει του συντελεστές PID ρυθμιστή μεταξύ της τροφοδοσίας του ΜΤ και της ισχύος του αναβατορίου κύκλου – Tsamatsoulis et al. (2010).

Στην τρέχουσα εργασία επιχειρείται: (α) Ο προσδιορισμός της δυναμικής της άλεσης ανά τύπο τσιμέντου (CEM) που αλέθεται σε ένα συγκεκριμένο ΜΤ, με βάση βιομηχανικά δεδομένα άλεσης ακολουθώντας μια λεπτομερειακή προσέγγιση ανάλυσης της αβεβαιότητας των δυναμικών παραμέτρων. Επιχειρείται επίσης συσχέτιση των σφαλμάτων μεταξύ πραγματικών και υπολογιζόμενων τιμών της μεταβλητής διεργασίας που είναι η ισχύς αναβατορίου κύκλου. (β) Τα αποτελέσματα της δυναμικής αποτελούν είσοδο προχωρημένων τεχνικών για την εύρεση των συντελεστών του ρυθμιστή PID, ικανοποιώντας μια συνθήκη ευρωστίας (robustness constraint). (γ) Τα αποτελέσματα των δύο πρώτων βημάτων τροφοδοτούν προσομοιωτή έτσι ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη περιοχή των ρυθμιστών PID. (δ) Ένα σετ συντελεστών PID εντός της βέλτιστης ζώνης, τοποθετείται στον πραγματικό ΜΤ, και τα αποτελέσματα αξιολογούνται για μακρό χρονικό διάστημα.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ως μεταβλητή διεργασίας θεωρείται η ισχύς του αναβατορίου κύκλος και ως μεταβλητή ελέγχου, η παροχή τροφοδοσίας του ΜΤ. Ο βρόχος ανατροφοδότησης (feedback control loop) δίνεται στο Σχήμα 2. Τα σύμβολα G_c , G_w , G_p , G_f

συμβολίζουν τις συναρτήσεις μεταφοράς του ρυθμιστή, των πλαστίγγων, της διεργασίας και του φίλτρου αντίστοιχα. Η έξοδος των πλαστίγγων, u_1 , είναι η είσοδος στο σύστημα ενώ η έξοδος του φίλτρου είναι η μεταβλητή διεργασίας.



Σχήμα 2. Βρόχος ανατροφοδότησης

Η συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας περιγράφεται από τις Εξισώσεις 1-3:

$$G_p = \frac{x}{u_1} = \frac{k_v \cdot e^{-T_d \cdot s}}{s} \quad (1)$$

$$x = a_x (PV - PV_0) \quad (2)$$

$$u_1 = Q - Q_0 \quad (3)$$

Όπου Q είναι η παροχή της τροφοδοσίας (t/h), PV η ισχύς του αναβατορίου κύκλου (KW), Q_0 παροχή τροφοδοσίας που αντιστοιχεί στην μόνιμη $PV = PV_0$, k_v είναι το κέρδος και T_d ο χρόνος υστέρησης. Ο συντελεστής a_x έχει το παρακάτω νόημα: Σε περίπτωση που η είσοδος του φίλτρου είναι η ισχύς PV , τότε $a_x = 1$. Αν η είσοδος είναι ο λόγος της ισχύος προς τη μέγιστη ισχύ του αναβατορίου, εκφρασμένη ως ποσοστό, τότε $a_x = 100 / PV_{Max}$. Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου δίνεται από την Εξίσωση 4 ενώ αντίστοιχα η συνάρτηση μεταφοράς των πλαστίγγων από την Εξίσωση 5:

$$G_f = \frac{y}{x} = \frac{1}{1 + T_f \cdot s} \quad (4)$$

$$G_w = \frac{u_1}{u} = \frac{1}{1 + T_w \cdot s} \quad (5)$$

Όπου T_f και T_w οι σταθερές χρόνου πρώτης τάξης του φίλτρου και πλαστίγγων αντίστοιχα (s). Παραμέτρους του προτύπου αποτελούν το κέρδος, ο χρόνος υστέρησης T_d , η παροχή Q_0 και η ισχύς PV_0 της μόνιμης κατάστασης που σχετίζονται με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας: (α) τύπος τσιμέντου, (β) αλεστικότητα και υγρασία α! υλών, (γ) παροχές αερίων, (δ) πιέσεις, (ε) θερμοκρασίες, (στ) κατάσταση των αλεστικών, (ζ) διαχωριστική ικανότητα του Δ/X κλπ. Η βραχυχρόνια και μακροχρόνια διασπορά αυτών των συνθηκών δημιουργεί διασπορά και αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων. Οι παράμετροι υπολογίζονται με χρήση του θεωρήματος της συνέλιξης μεταξύ εισόδου u_1 και εξόδου y , που εκφράζεται με την Εξίσωση 6.

$$y = \int_0^t u_1(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

Όπου $g(t)$ είναι η παλμική απόκριση. Η δειγματοληψία των βιομηχανικών δεδομένων έγινε με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Κατόπιν με χρήση μη – γραμμικής παλινδρόμησης (Newton-Raphson) υπολογίζονται οι βέλτιστες παράμετροι ανά σετ δεδομένων ελαχιστοποιώντας το σφάλμα (s_{res}) που παρέχεται από την Εξίσωση 7:

$$s_{res}^2 = \sum_{I=1}^N \frac{(y_{calc}(I) - y_{exp}(I))^2}{N - k_0} \quad (7)$$

Όπου y_{calc} είναι η μεταβλητή διεργασίας που υπολογίζεται από το μοντέλο ενώ, y_{exp} η πραγματική, N είναι ο αριθμός των πειραματικών σημείων και k_0 ο αριθμός των ανεξαρτήτων μεταβλητών του μοντέλου. Τη χρονική στιγμή I το σφάλμα μεταξύ y_{calc} και y_{exp} δίνεται από την Εξίσωση 8 και συσχετίζεται με την αυτοσυσχετιζόμενη Εξίσωση 9.

$$Err(I) = y_{exp}(I) - y_{calc}(I) \quad (8)$$

$$Err(I) = A_0 + A_1 \cdot Err(I - 1) + A_2 \cdot Err(I - 2) + Std_{ModErr} \quad (9)$$

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Το λογισμικό δειγματοληπτεί ανά ένα λεπτό χρονικά διαστήματα συνεχούς λειτουργίας διάρκειας 250 min του ΜΤ, ελέγχοντας τον τύπο τσιμέντου που αλέθεται. Στην εφαρμογή που αναπτύσσεται, αξιοποιούνται δεδομένα ενός

ολόκληρου έτους, ενός ΜΤ της εταιρείας ΧΑΛΥΨ όπου αλέθονται τρεις τύποι τσιμέντου. Παρακάτω ακολουθεί η εξής κωδικοποίηση για την περιγραφή αυτών των τύπων: Κωδ. 1 = CEM A-L 42.5 N, Κωδ. 2 = CEM IV B (P-W) 32.5 N, Κωδ. 3 = CEM II B-M (P-L) 32.5. Η μεταβλητή διεργασίας είναι ποσοστό της μέγιστης ισχύος του αναβατορίου και $PV_{Max} = 50 \text{ KW}$, επομένως $\alpha_x = 2$. Πειραματικά προσδιορίστηκε $T_w = 11 \text{ s}$, ενώ $T_f = 180 \text{ s}$. Το λογισμικό λαμβάνει υπόψη μόνο τα σετ δεδομένων που αλέθεται ένας τύπος τσιμέντου, υπολογίζοντας τις βέλτιστες παραμέτρους και τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης, R. Θεωρείται ελάχιστος συντελεστής συσχέτισης $R_{Min} = 0.7$. Τα σετ παραμέτρων που εμφανίζουν $R < R_{Min} = 0.7$ αποκλείονται από παραπέρα επεξεργασία. Η επεξεργασία συνεχίζεται με τον υπολογισμό μέσω και ενδιάμεσων τιμών, της τυπικής απόκλισης, η οποία είναι μέτρο της αβεβαιότητας, καθώς και του συντελεστή διασποράς, $\%CV = 100 \times \text{Std. Dev.} / \text{Average}$ για κάθε παράμετρο. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δυναμικού προτύπου

	Aver.	Med.	s	%CV	Aver.	Med.	s	%CV
CEM		$k_v \times 10^2 \text{ (60/t)}$				$T_d \text{ (min)}$		
1	2.03	1.93	0.91	44.8	14.3	14.0	6.7	47.1
2	2.01	1.96	0.86	42.6	14.1	13.0	6.9	49.2
3	2.18	2.21	0.87	39.7	14.5	14.0	6.6	45.6
		$\alpha_x \cdot PV_0$				$Q_0 \text{ (t/h)}$		
1	25.5	25.9	1.8	7.1	28.6	29.2	2.3	8.0
2	25.8	25.9	1.9	7.4	29.7	29.7	1.9	6.4
3	25.8	25.9	1.7	6.6	30.0	30.4	1.7	5.7
	Tot. Sets		%		Aver. S_{Res}		Aver. R	
1	110		13.2		0.243		0.87	
2	394		47.3		0.219		0.85	
3	329		39.5		0.241		0.86	
	A_1		A_2		$A_1 + A_2$			
	Av.	s	Av.	S	Av.	s	Aver.	S_{Err}/S_{Res}
							S_{Err}	
1	0.810	0.129	0.085	0.108	0.894	0.059	0.087	0.360
2	0.803	0.111	0.088	0.096	0.891	0.055	0.087	0.398
3	0.823	0.108	0.081	0.097	0.904	0.052	0.089	0.369

Σε κάθε τύπο τσιμέντου παρατηρείται μια σημαντικότερη διασπορά των k_v , T_d . Στον ίδιο πίνακα δίνονται και οι τιμές A_1 , A_2 του μοντέλου σφάλματος: Η σταθερά A_0 , ήταν σε όλες τις περιπτώσεις ίση με μηδέν. Η επάρκεια του προτύπου αυτοσυσχέτισης υπολογίζεται μέσω του λόγου s_{EIT} and s_{RES} ο οποίος διατηρείται σταθερά μικρότερος του 0.4. Άρα η υπέρθεση του μοντέλου αυτοσυσχέτισης στο δυναμικό μοντέλο συμβάλλει σε σημαντική βελτίωση του εκτιμώμενου σφάλματος σε περίπτωση προσομοίωσης της διεργασίας.

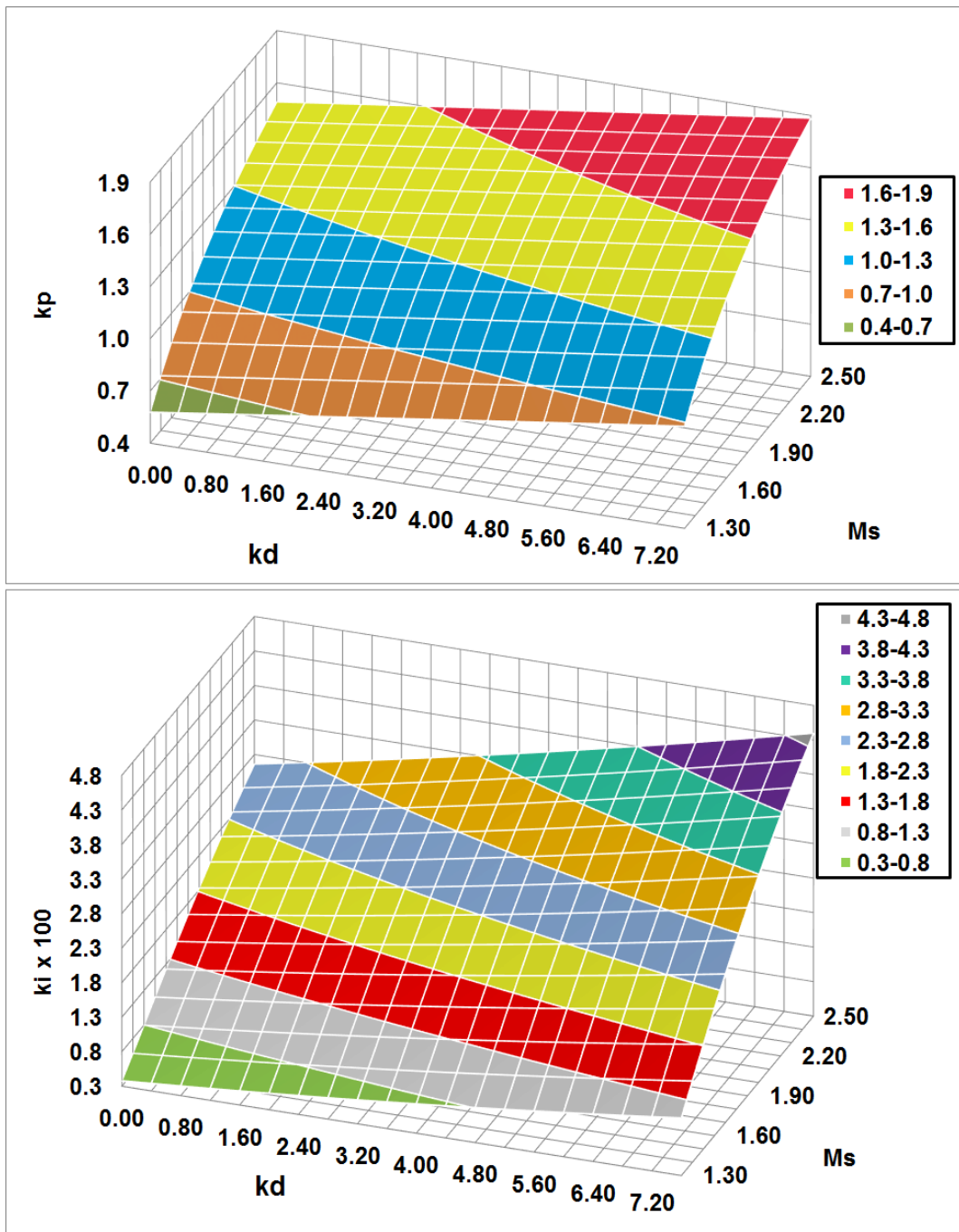
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗ PID

Μια ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνική σχεδιασμού είναι η μορφοποίηση του βρόχου (loop shaping) και ειδικότερα όταν υπάρχει περιορισμός στην ευαισθησία του βρόχου. Η ειδική αυτή μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Astrom et al. (1998, 2004). Η μέθοδος μεγιστοποιεί τον ολοκληρωτικό συντελεστή δεχόμενη ένα περιορισμό στην μέγιστη ευαισθησία M_s του βρόχου. Για το συγκεκριμένο βρόχο η μέγιστη ευαισθησία δίνεται από τη Εξίσωση 10, ενώ η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή από την Εξίσωση 11:

$$M_s = \text{Max}\left(\frac{1}{1 + G_c G_w G_p G_f}\right) \quad (10)$$

$$G_c = \frac{u}{e} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (11)$$

Όπου οι συντελεστές k_p , k_i , k_d αποτελούν το αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό κέρδος του ρυθμιστή αντίστοιχα. Με εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου για κάθε M_s στο διάστημα [1.3, 2.5] και για βηματική αύξηση ίση με 0.1 υπολογίστηκαν τριάδες (k_p , k_i , k_d) για κάθε τύπο τσιμέντου και για τις μέσες και ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 1. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 3 για το τσιμέντο CEM II B-M 32.5, από το οποίο προκύπτει ότι για κάθε ζεύγος (M_s , k_d) η μέθοδος υπολογίζει ένα αντίστοιχο ζεύγος (k_p , k_i). Αυτές οι τριάδες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε προσομοιωτή, ώστε να ανιχνευθεί η βέλτιστη περιοχή συντελεστών.



Σχήμα 3. Συντελεστές του ρυθμιστή ως συνάρτηση του M_s .

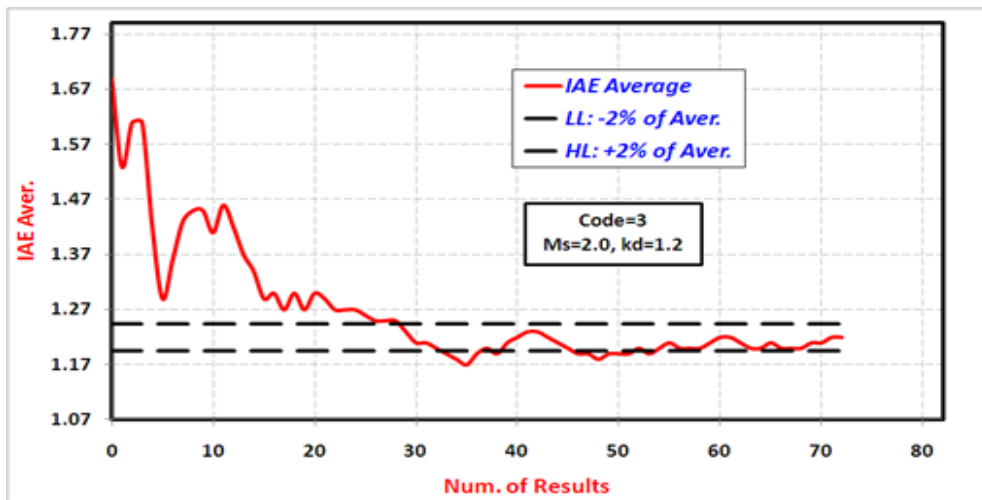
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

Ο βρόχος ανατροφοδότησης του Σχήματος 2 προσομοιάστηκε με βάση την τρέχουσα διεργασία, έτσι ώστε να προσδιοριστούν βέλτιστα σει συντελεστών του PID ρυθμιστή, κάνοντας χρήση του Ολοκληρώματος του Απολύτου Σφάλματος (Integral of Absolute Error, IAE) μεταξύ της μεταβλητής διεργασίας y και του σημείου λειτουργίας y_{sp} , ως ένα ποσοστό του y_{sp} . Αυτό το κριτήριο βελτιστοποίησης περιγράφεται από την Εξίσωση 12.

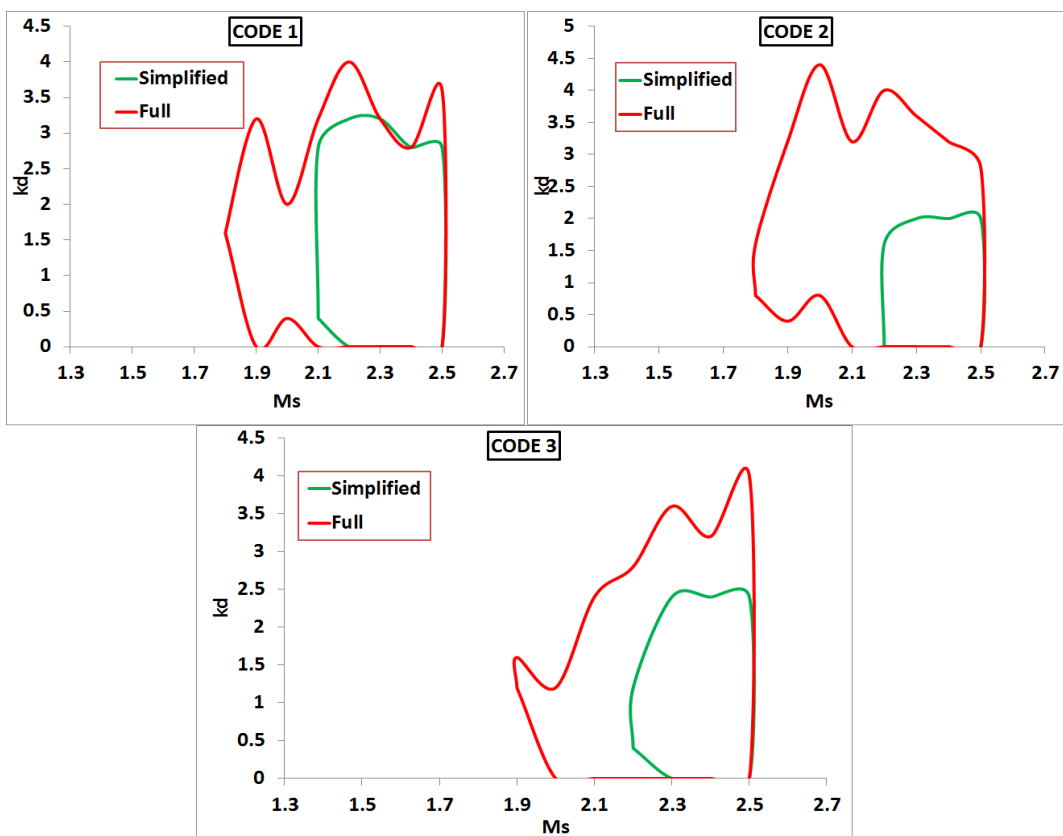
$$\%IAE = \frac{100}{t_0} \int_0^{t_0} \left| 1 - \frac{y}{y_{sp}} \right| dt \quad (12)$$

Η ολοκλήρωση γίνεται για χρόνο t_0 (min). Ο προσομοιωτής έχει την δυνατότητα να επιλέγει μια οικογένεια από διανύσματα συντελεστών PID και να προσομοιώνει τη λειτουργία του ΜΤ για κάθε διάνυσμα $(k_p, k_i, k_d)^T$. Όσον αφορά τον ρυθμιστή, εφαρμόζεται μια ψηφιακή εξίσωση που περιγράφεται από τον Tsamatsoulis (2009). Ο ΜΤ λειτουργεί χειροκίνητα για 50 min. Κατόπιν ο ΜΤ αρχίζει να λειτουργεί αυτόματα με χρήση του διανύσματος $(k_p, k_i, k_d)^T$. Τα δεδομένα είναι τα εξής: (1) Τύπος τσιμέντου, (2) Περίοδος δειγματοληψίας, T_s (s) και περίοδος ενεργοποίησης, T_a (s) του ρυθμιστή, (3) Ελάχιστη και μέγιστη μεταβλητή ελέγχου, Q_{Min} , Q_{Max} (t/h) αντίστοιχα, (4) Σημείο λειτουργίας της μεταβλητής διεργασίας, y_{sp} , (5) Τροφοδοσία εκκίνησης του ΜΤ, Q_{in} (t/h), (6) Χρονικό διάστημα της λειτουργίας του ΜΤ αυτόματα, T_{Oper} (min), (7) Μέσες και ενδιάμεσες τιμές των δυναμικών παραμέτρων και τυπικές αποκλίσεις, (8) Συντελεστές του αυτοσυσχετιζόμενου προτύπου και σφάλμα, (9) Αριθμός τυπικών αποκλίσεων των παραμέτρων (7) και (8), (10) Θόρυβος της μεταβλητής διεργασίας err_{Noise} (KW) και χρονική σταθερά του φίλτρου T_f (sec), (11) Αριθμός επαναλήψεων N_{Iter} (12) Γεννήτρια τυχαίων αριθμών και χρήση κανονικών κατανομών

Ο προσομοιωτής λειτουργεί με δύο τρόπους (α) μια απλοποιημένη έκδοση όπου δεν λαμβάνονται υπόψη αβεβαιότητες (β) μια πλήρη έκδοση όπου αυτές λαμβάνονται υπόψη. Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται σημαντικός αριθμός επαναλήψεων ώστε το %IAE να συγκλίνει. Στο Σχήμα 4 δίνεται ένα παράδειγμα σύγκλισης του προσομοιωτή, όπου απαιτήθηκαν πάνω από 70 επαναλήψεις.



Σχήμα 4. Σύγκλιση του %IAE για CEM Κωδ.=3, $M_s=2$, $k_d=1.2$



Σχήμα 5. Βέλτιστες περιοχές συντελεστών του ρυθμιστή

Ο προσομοιωτής εφαρμόστηκε για όλη την περιοχή των διανυσμάτων $(k_p, k_i, k_d)^T$ που εμφανίζονται στο Σχήμα 3. Ως βέλτιστη περιοχή θεωρείται εκείνη όπου τα $\%IAE \leq 1.2 \%IAE_{Min}$. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 5.

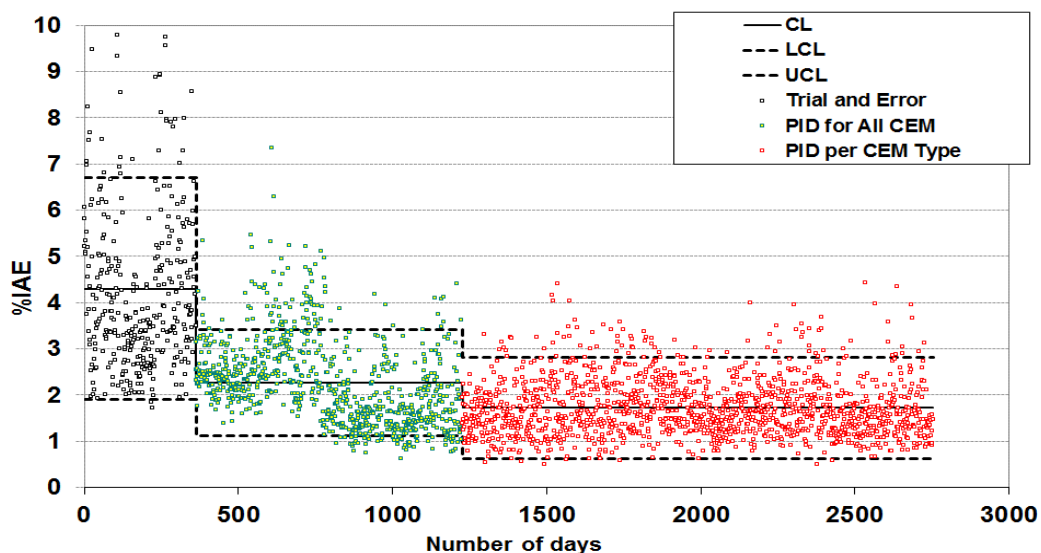
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΚΛΕΙΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΛΕΣΗΣ

Με βάση τα αποτελέσματα του Σχήματος 5, επιλέγηκαν διανύσματα συντελεστών ανά τύπο τσιμέντο και τοποθετήθηκαν στο ΜΤ που μελετάται. Οι τιμές των συντελεστών δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Βέλτιστες τιμές συντελεστών PID

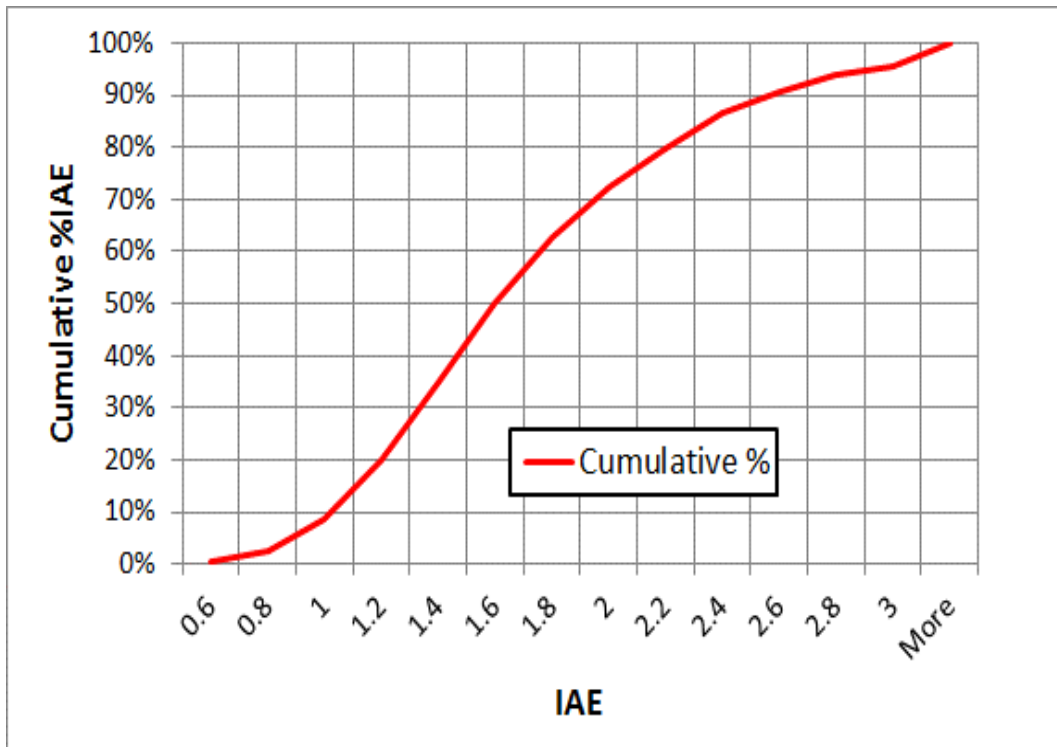
CEM	1	2	3
M_s	1.9	1.9	2.0
k_p	1.345	1.427	1.307
k_i	0.019	0.022	0.020
k_d	0	1.2	1.2

Η λειτουργία του ρυθμιστή αξιολογήθηκε για μακρό χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 6 δίνεται το μέσο ημερήσιο $\%IAE$ για περίοδο δειγματοληψία 1 min, μέσω αντιστοίχου λογισμικού.



Σχήμα 6. Μέσα ημερήσια $\%IAE$ - Μακροχρόνια αξιολόγηση

Στο Σχήμα 6 διακρίνονται τρεις περιοχές αυτόματης λειτουργίας του PID ρυθμιστή: (α) Εύρεση συντελεστών με δοκιμή και σφάλμα χωρίς τη χρήση μοντελοποίησης – 362 ημέρες λειτουργίας. (β) Εύρεση συντελεστών σύμφωνα με προηγούμενη τεχνική (Tsamatsoulis, 2009) – 864 ημέρες λειτουργίας. (γ) Παραμετροποίηση σύμφωνα με την τεχνική που αναλύθηκε – 1506 ημέρες λειτουργίας. Στο σχήμα εμφανίζεται επίσης η μέση τιμή του %IAE και τα άνω και κάτω όρια σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8258:1991 που μελετά τους χάρτες ελέγχου *Sewhart*. Από τον πίνακα παρατηρείται ότι το μέσο %IAE για μια πολυετή περίοδο 1506 ημερών λειτουργίας, διατηρείται ~1.7% του σημείου λειτουργίας και επιπλέον δεν απαιτήθηκε σε όλη αυτή την περίοδο επαναρύθμιση του PID, εφόσον αλέθονται οι ίδιοι τύποι τσιμέντου και η ποιότητα του κλίνκερ είναι σταθερή. Στο Σχήμα 7 δίνεται η αθροιστική κατανομή των ημερήσιων IAE κατά την (γ) περίοδο από όπου παρατηρείται ότι η ενδιάμεση τιμή του %IAE είναι 1.6% και μόνο 4% του πληθυσμού παρουσιάζει %IAE μεγαλύτερο του 3%.



Σχήμα 7. Αθροιστική κατανομή του %IAE

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη αναπτύχθηκε η επίτευξη βελτιστοποίησης των συντελεστών ελεγκτή PID που ρυθμίζει την λειτουργία κλειστού κυκλώματος άλεσης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια: (α) Μοντελοποίηση της δυναμικής της διεργασίας βασισμένη σε βιομηχανικά στοιχεία τα οποία δειγματοληπτούνται με ψηλή συχνότητα και υπολογισμός των παραμέτρων καθώς και της αβεβαιότητάς τους (β) Υπολογισμός διανυσμάτων συντελεστών του ρυθμιστή με τεχνική που εφαρμόζει περιορισμό ευρωστίας (γ) Τροφοδότηση των αποτελεσμάτων (α) και (β) σε προσομοιωτή της λειτουργίας του κυκλώματος άλεσης, ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα βασικά στοιχεία της λειτουργίας (δ) Εύρεση μέσω του προσομοιωτή των βέλτιστων συντελεστών του PID έτσι ώστε η μεταβλητή της διεργασίας να απέχει ελάχιστα από το σημείο λειτουργίας.

Στην μελέτη δόθηκε ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου σε βιομηχανικό κύκλωμα άλεσης και η λειτουργία αξιολογήθηκε με βάση το ολοκλήρωμα του απόλυτου σφάλματος (%IAE). Μετά από πάνω από 1500 ημέρες λειτουργίας, το μέσο %IAE είναι μόνο 1.7% του σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ρύθμιση είναι άριστη.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Astrom, K.J., Panagopoulos, H. & Hagglund, T., “Design of PI controllers based on non-convex optimization”, *Automatica*, Vol. 34, No 5 (1998) 585-601

Astrom, K.J. & Hagglund, T., “Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control”, *J. Process Contr.*, Vol. 14, No 6 (2004) 635-650

Boulvin, M. Renotte, C., Vande Wouwer, A., Remy, M., Tarasiewicz, S. & Cesar, P., “Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process”, *Eur. J. Control*, Vol. 5, No 1 (1999) 10-18

Ramasamy, M., Narayanan, S.S & Rao, Ch.D.P, “Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme”, *J. Process Contr.*, Vol. 15, No 3 (2005) 273-283

Van Breusegem, V., Chen, L., Werbrouck, V., Bastin, G. & Wertz, V., “Multivariable linear quadratic control of a cement mill: An industrial application”, *Control Eng. Pract.*, Vol. 2, No 4 (1994) 605-611

Tsamatsoulis, D., “Dynamic behavior of closed grinding systems and effective PID parameterization”, WSEAS Transactions on Systems and Control, Vol. 4, No 12 (2009) 581-602

Κεφάλαια σε Βιβλία

Astrom, K.J., “Model uncertainty and robust control” in “Lecture Notes on Iterative Identification and Control Design”, Lund University (2000), 63-100.

Βιβλία

Astrom, K. & Hagglund, T., “Advanced PID control”, Research Triangle Park: Instrumentation, Systems and Automatic Society (2006)

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια (δημοσιευμένα σε πρακτικά)

Prasath, P., Recke, B., Chidambaram, M. & Jorgensen, J.B., “Application of soft constrained MPC to a cement mill circuit”, in Proceedings of 9th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, (Leuven, Belgium, July 5-7, 2010), IFAC, Leuven, Belgium (2010) 302-307

Tsamatsoulis, D. & Lungoci, C., “Effective optimization of controllers stabilizing closed circuit grinding systems of cement”, in Proceedings of 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, (Brasov, Romania, May 20-22, 2010), IEEE, Brasov, Romania (2010)