

Σχεδιασμός των Παραμέτρων Ρυθμισιών Αυτόματης Λειτουργίας Κλειστών Κυκλωμάτων Άλεσης Τσιμέντου Design of the Parameters of Controllers Installed in Closed Circuit Cement Grinding Systems

Δ.Χ. ΤΣΑΜΑΤΣΟΥΛΗΣ¹

Λέξεις κλειδιά: Τσιμέντο, άλεση, ρύθμιση, αντοχή, παραμετροποίηση, αβεβαιότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η παραμετροποίηση ρυθμιστών PID που είναι εγκατεστημένοι σε κλειστά κυκλώματα άλεσης τσιμέντου ακολουθώντας τη μεθοδολογία του ελέγχου εσωτερικού μονηείου (IMC). Ο υπολογισμός της δυναμικής του συστήματος και η εκτίμηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων επιτυγχάνεται με χρήση βιομηχανικών στοιχείων τρέχουσας λειτουργίας. Η ύπαρξη διαταραχών επιβάλλει το σχεδιασμό ενός «εύρωστου» (robust) ρυθμιστή. Η αξιολόγηση της επίδοσης των ρυθμιστών που σχεδιάστηκαν γίνεται με χρήση του ολοκληρώματος της απόλυτης διαφοράς από την στόχο (IAE). Η επιλεγείσα παραμετροποίηση οδηγεί σε βελιωμένους ρυθμιστές. Η σταθερή αυτόματη λειτουργία των μύλων ισιμέντου γύρω από ένα set point έχει σοβαρή θετική επίδραση, τόσο στο επίπεδο παραγωγικότητας όσο και στο επίπεδο αντοχών του ισιμέντου και της σταθερότητάς τους.

ABSTRACT: In the present study a parameterization of PID controllers installed in closed circuit cement grinding systems is attempted by applying the methodology of Internal Model Control (IMC). The calculation of the system dynamics as well as the estimation of the parameters uncertainty is attained by using industrial data of routine operation. The presence of disturbances imposes the design of a robust controller. The evaluation of the performances of the designed controllers is performed using the integral of the absolute difference from the target (IAE). The selected parameterization leads to improved regulators. The stable automatic operation of the cement mills around a set point has a positive impact on the productivity level as well as on the cement strength level and their stability

¹ Δρ. Χημικός Μηχανικός, Συντονιστής Ποιότητας του Κλάδου Τσιμέντου και Αδρανών του Ομίλου Italcementi στην Ελλάδα και Βουλγαρίαemail: d.tsamatsoulis@halyps.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

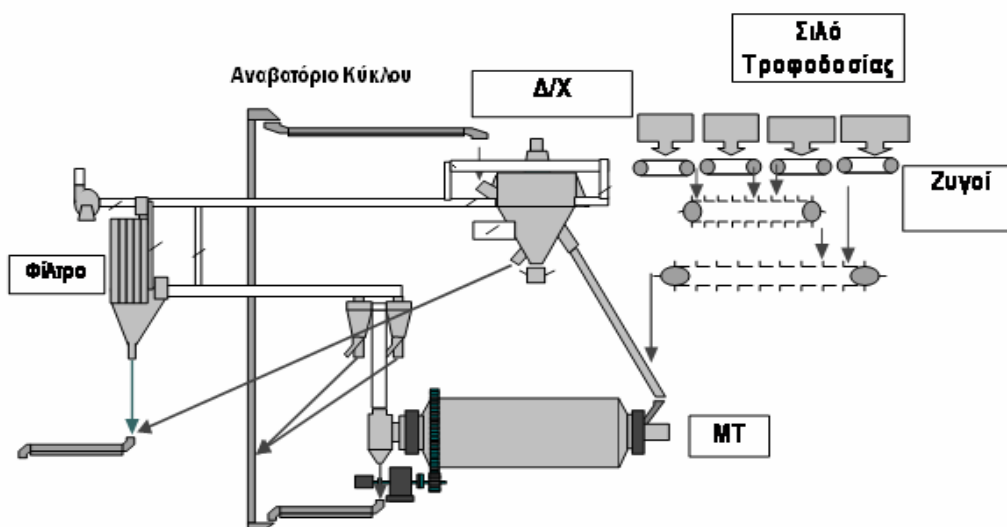
Το 75% της ολικά απαιτούμενης ενέργειας σε μια μονάδα παραγωγής ισιμέντου καταναλώνεται στις διεργασίες άλησης τόσο των Πρώτων Υλών όσο και του τελικού προϊόντος (Duda (1984)). Με την έννοια αυτή η διεργασία της άλησης ηναι ιδιαίτερα κρίσιμη όσον αφορά τον τομέα της ενεργειακής κατανάλωσης. Από την άλλη μεριά αυτή η διεργασία είναι ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηρισικά του προϊόντος εφόσον μέσω αυτής επιτυγχάνεται μια ορισμένη σύνθεση και λεπτότητα του ισιμέντου. Για τους λόγους αυτούς σε μία σύγχρονη μονάδα παραγωγής ισιμέντου εφαρμόζεται συνεχής και πολύ συχνά αυτόματο έλεγχος τόσο της διεργασίας όσο και της ποιότητας. Σε κάθε περίπτωση οι δύο αυτές παράμετροι πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται σε συνδυασμό και ποτέ ως διακριτές λειτουργίες. Μόνο στην περίπτωση αυτή μπορεί να υπάρχει ένα συνολικό όφελος, τόσο στην σταθερότητα της ποιότητας όσο και στους δείκτες παραγωγής. Ένα παράδειγμα μη σωστής εφαρμογής της παραπάνω αρχής είναι η παραγωγή σε ένα μύλο ισιμέντου (MT) με συνεχείς διακοπές της λειτουργίας και συνεχείς, σε διαστήματα λίγων ωρών αλλαγές της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος. Στην περίπτωση αυτή τόσο η ειδική ηλεκτρική κατανάλωση εκφρασμένη σε KWh/tn ισιμέντου είναι υψηλή και τα προϊόντα δεν έχουν ούτε σταθερή θύνηση ούτε λεπτότητα. Υπάρχει εκτενής και λεπτομερειακή βιβλιογραφία σχετική με τις αρχές της διεργασίας ης άλεσης καθώς και με τις μεθόδους βελτιστοποίησης των εγκαταστάσεων και της λειτουργίας (Clemens (2002), Espig et al. (2002). Οποσδήποτε όμως ο αποτελεσματικός έλεγχος και ρύθμιση της διεργασίας και της ποιότητας του προϊόντος απαιτεί ένα βέλτιστο και συνεχή βάση συνδυασμό, προχωρημένων τεχνικών αυτομάτου ελέγχου, μαθηματικής επεξεργασίας, στατιστικής, κανόνων ρύθμισης και πάνω από όλα τρέχουσας εμπειρίας. Με τον τρόπο αυτό η εμπειρία μπορεί να βοεήσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνικών και μεθόδων και αντίστροφα οι νέες μέθοδοι βοηθούν στην πιηρέστηρη κατανόηση της διεργασίας.

Συνήθως ο αυτόματος έλεγχος της διεργασίας επιτυγχάνεται με χρήση ρυθμιστή Αναλογικού-Ολοκληρωτικού-Διαφορικού (PID). Όπως αναφέρει ο Astrom et al. (2006), στον έλεγχο διεργασιών, ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 95% των βρόγχων ελέγχου είναι τύπου PID. Ωστόσο όπως αναφέρει ο Ender (1993), ποσοστό 30% των εγκατεστημένων ρυθμιστών λειτουργούν χειροκίνητα, ένα άλλο ποσοστό 20% λειτουργεί με τις παραμέτρους που τοποθετήθηκαν από τον κατασκευαστή, ενώ ένα άλλο 30% λειτουργεί φτωχά, λόγω προβλημάτων σε αισθητήρες ή στην εγκατάσταση. Εκτός των παραπάνω, συχνά στην πράξη, οι παράμετροι των ρυθμιστών PID, υπολογίζονται με δοκιμή και σφάλμα (Gao, (2003)). Στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο σχεδιασμός των παραμέτρων ενός ρυθμιστή PID, που ρυθμίζει την παροχή τροφοδοσίας του MT, έτσι ώστε να διατηρείται κατά το δυνατό σταθερή η ισχύς του αναβατηρίου κύκλου, άρα και η παροχή εισόδου στον Δ/Χ για ένα συγκεκριμένο κλειστό κύκλωμα άλησης. Για τον σχεδιασμό χρησιμοποιείται η μέθοδος του ελέγχου εσωτερικού μοντέλου (Internal Model Control) όπως περιγράφεται από τους Rivera et al. (1986) και Arbogast και Cooper (2007). Ο σχεδιασμός εφαρμόστηκε σε δύο μύλους ισιμέντου (MT) του

εργοστασίου ΧΑΛΥΨ και οι υπολογιθείσες υμές ανικατέστησαν επιτυχώς υς προηγούμενες που είχαν ευρεθεί με δοκιμή και σφάλμα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στο Σχήμα 1 δίνεται ένα ιπικό κλειστό κύκλωμα άλσης.



Σχήμα 1. Κλειστό κύκλωμα άλσης τσιμέντου.

Ως κρίσιμες λειτουργικές παράμετροι, όσον αφορά την παραγωγικότητα της εγκατάστασης και την ποιότητα του προϊόντος μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

- (1) Ακρίβεια ζυγισικών πιαστίγγων
- (2) Ισχύς ΜΤ
- (3) Παροχή αερίων μέσα από τον ΜΤ
- (4) Υποπίηση εξαγωγής από τον ΜΤ
- (5) Ισχύς αναβτόριου κύκλου
- (6) Παροχή επιστροφών υλικού από τον Δ/Χ
- (7) Στροφές δευτερογενούς κίνησης του Δ/Χ (για 2ης και 3ης γενεάς Δ/Χ)
- (8) Παροχή αερίων μέσα από τον Δ/Χ (για 2ης και 3ης γενεάς Δ/Χ)
- (9) Διαφορά πίησης στο φίλτρο

Σης σύγχρονες μονάδες παραγωγής ένα κλειστό κύκλωμα άλσης λειτουργεί σε αυτοματισμό: Δηλ. η τροφοδοσία – μεταβλητή χειρισμού - αυξομειώνεται με μικρές συνεχείς μεταβολές, ανάλογα με την υμή μιας ή περισσότερων

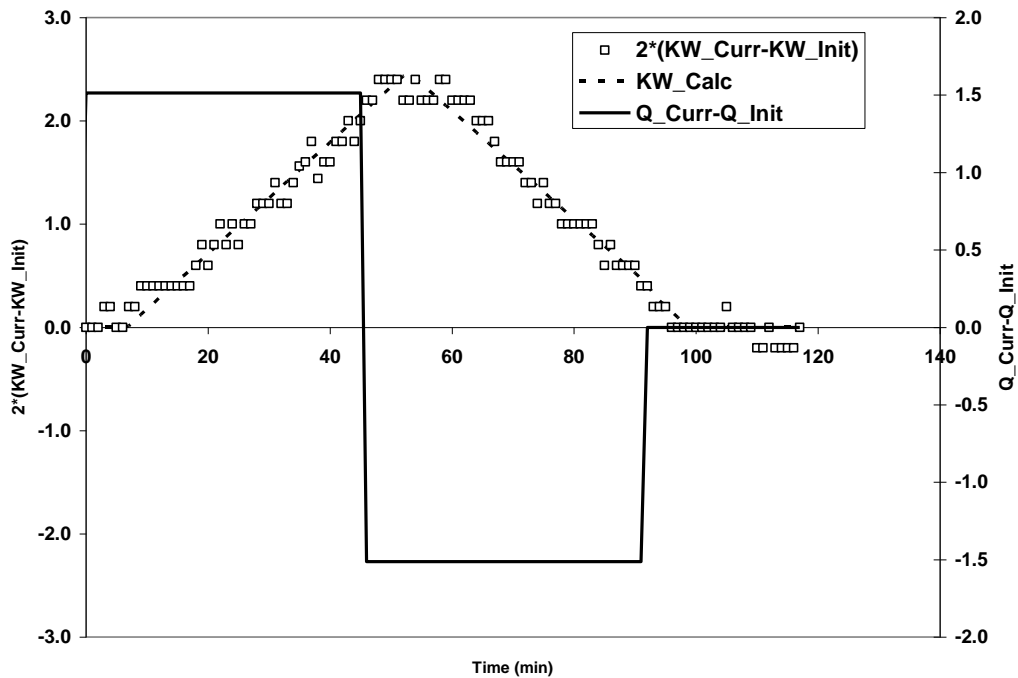
μεταβλητών ελέγχου, ώστε να διατηρεί τις τελευταίες σταθερές. Υπάρχουν διάφοροι τύποι και στρατηγικές ελέγχου και αυτοματισμού (Duda (1984)) εκ των οποίων άλλοι συναντώνται συχνότερα ενώ άλλοι σπανιότερα, οι παρακάτω:

- (1) Έλεγχος με το αναβατόριο κύκλου
- (2) Έλεγχος με ζύγιση της παροχής επιστροφών από τον Δ/X
- (3) Έλεγχος με την ισχύ του Δ/X
- (4) Έλεγχος με ηλεκτρονικό αυτό στην εισαγωγή του MT
- (5) Συνδυασμός των παραπάνω

Στη συγκεκριμένη ανάλυση θεωρείται αυτόματο μεταξύ της παροχής τροφοδοσίας και της ισχύος του αναβατορίου κύκλου.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Ο ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ

Στο συγκεκριμένο σύστημα είσοδο και μεταβλητή χειρισμού αποτελεί η παροχή τροφοδοσίας, ενώ έξοδο και μεταβλητή της διεργασίας η ισχύς του αναβατορίου κύκλου. Στόχος της ρύθμισης είναι να διατηρηθεί η ιμμή της τελευταίας γύρω από ένα σταθερό προκαθορισμένο σημείο – set point. Για να περιγραφεί η συμπεριφορά του συστήματος και η μεταβατική του απόκριση απαιτείται η εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει τη μετάδοση του σήματος εισόδου – παροχή – στην έξοδο – ισχύς αναβατορίου. Ένα αναλυτικό μοντέλο απαιτεί την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της μεταβολής των εισόδων και εξόδων που να περιλαμβάνει παράλληλα την άληση του υλικού, την λειτουργία του Δ/X , την μεταβολή των επιστροφών, την σχέση της μαζικής παροχής με την δυναμική ενέργεια του υλικού στο αναβατόριο κύκλου. Ένα τέτοιου τύπου, σταικό όμως μοντέλο έχει αναπτυχθεί από τον Τσαματσούλη και άλλοι (2001). Αυτό το πρότππο παρά το γεγονός ότι εμβαθύνει στην διεργασία, θα πρέπει παράλληλα να λάβει υπόψη την μεταβατική κατάσταση, με αποτέλεσμα να γίνεται αρκετά πιο πολύπλοκο. Σύμφωνα με τον Astrom et al. (1995) υπάρχει μια περιορισμένη τάξη προτύπων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γραμμικά χρονικά αμετάβλητα συστήματα ή για συστήματα που τα προσεγγίζουν. Κατ' αρχήν μελετάται εάν το σύστημα είναι σταθερό. Δηλ. εάν μια βηματική επιβολή της τροφοδοσίας οδηγεί σε νέα μόνιμη κατάσταση του αναβατορίου κύκλου. Σε αντίθετη περίπτωση εάν μια βηματική επιβολή οδηγεί σε συνεχή αύξηση της ισχύος, τότε η διεργασία διαθέτει ολοκλήρωση. Απαιτείται επίσης να διερευνηθεί και να ο υπολογιστεί ο τυχόν χρόνος υσηέρεσεο μεταξύ ηροφοδοσίας και ισχύος του αναβατορίου. Για να μελετηθεί το παραπάνω χρησιμοποιήθηκε η πειραματική μέθοδος του διπλού παλμού – doublet pulse method. Δηλ. ξεκινώντας από μια μόνιμη κατάσταση ισχύος – παροχής, η παροχή (α) αυξάνει κατά ορισμένη ημμή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (β) μειώνεται κατά την ίδια ιμμή για το ίδιο χρονικό διάστημα και (γ) επανέρχεται στην αρχική ιμμή έως ότου επανέλθει το σύστημα κοντά στην ισορροπία. Ένα ιπικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στον MT5 δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Εφαρμογή της μεθόδου του διπλού παλμού στον MT5.

Από την παραπάνω μορφή της απόκρισης συνάγεται ότι η δυναμική δείχνει ολοκληρωτική συμπεριφορά, έχοντας παράλληλα χρόνο υστέρησης. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός τέτοιου συστήματος σε μορφή Laplace δίνεται από την Εξίσωση (1):

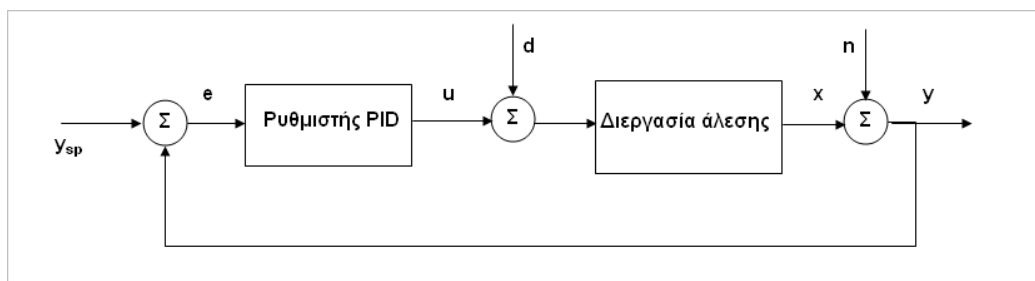
$$2 \cdot (KW - KW_0) = (Q - Q_0) \frac{k_v}{s} e^{-Td \cdot s} \quad (1)$$

Όπου Q = παροχή τροφοδοσίας (tn/h), KW = ισχύς αναβατορίου κύκλου (kw), Q_0 = παροχή που αντιστοιχεί σε ισχύ KW_0 σε μόνιμη κατάσταση, k_v = κέρδος (gain) και Td = χρόνος υστέρησης (min). Οπωσδήποτε το μοντέλο αυτό είναι απλοποιημένο αλλά περιγράφει επαρκώς την διεργασία. Εάν οι όροι των παροχών και των ισχύων ανικατασταθούν με τα σήματα εισόδου u και εξόδου και KW_0 θεωρηθεί ως το set point της ρύθμισης, τότε η μεταβλητή εξόδου ισούται με το σφάλμα e , για set point = 0 και η Εξίσωση (1) μετατρέπεται στην Εξίσωση (2) και αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας G_p :

$$\frac{e}{u} = \frac{k_v}{s} e^{-Td \cdot s} \quad (2)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή G_c δίνεται από την εξίσωση (3), ιπική μορφή κατά τον Astrom et al. (2006). Συντελεστές του ρυθμιστή αποτελούν ο αναλογικός, k_p , ολοκληρωτικός, k_i και διαφορικός, k_d . Ο κλειστός βρόγχος ανατροφοδότησης δίνεται στο Σχήμα 3.

$$\frac{u}{e} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (3)$$



Σχήμα 3. Βρόγχος ανατροφοδότησης του κυκλώματος άλεσης

Όπου n = θόρυβος μέτρησης και d = διαταραχή. Η ύπαρξη του θορύβου και των διαταραχών καθιστά αρκετά πιο πολύπλοκη την συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού κυκλώματος και για λόγους συντομίας δεν παρουσιάζεται. Ως αιτίες διαταραχών μπορούν να αναφερθούν: η αλεστικότητα του κλίνκερ, οι διαφορικές συνσέσεις ησημέντου και ε μενάβαση από ηε μία σύνσese σθεν άι ι ε, κηαβολέο σθεν παροχή των αερίων και σις θερμοκρασίες. Κάποιες από ις διαταραχές προκαλούν μεταβολή των δυναμικών χαρακτηρισικών του συστήματος.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ

Ο πειραματικός υπολογισμός των παραμέτρων της δυναμικής, αν και αποτελεί αναγκαίο βήμα για να ευρεθεί ένα προσεγγιστικό μοντέλο, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα: (α) Η διαταραχή στην τροφοδοσία προκαλεί διαταραχή στην ομαλή πορεία της παραγωγικής διαδικασίας (β) Η επίτευξη μόνιμης κατάστασης δεν είναι καθόλου εύκολη εφόσον η διεργασία περιέχει ολοκλήρωση (γ) Για να

γίνει εκτίμηση του εύρους στο οποίο μεταβάλλονται οι δυναμικές παράμετροι απαιτείται πιθανά μεγάλος αριθμός πειραμάτων ώστε να μπορεί να γίνει μια αξιόπιστη εκτίμηση της αβεβαιότητας των παραμέτρων. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται το θεώρημα της συνέλιξης μεταξύ των παροχών εισόδου $u = Q - Q_0$ και των σφαλμάτων $e = KW - KW_0$ το οποίο δίνεται από τη Εξίσωση (4).

$$e = \int_0^t u(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (4)$$

Όπου $t = 0$ χρονικός ορίζοντας σε min και $g(t)$ η αντίστροφη μετασχηματισμένη Laplace της G_p . Ως χρονικός ορίζοντας λήφθηκε $t = 250$ min. Όσον αφορά το κέρδος k_v και το χρόνο υστέρησης T_d θεωρούνται διαφορετικές υμές όταν το αναβατόριο βρίσκεται σε άνοδο k_{vAsc} και T_{dAsc} και διαφορεικές υμές όταν βρίσκεται σε κάθοδο k_{vDecs} και T_{dDesc} . Συνολικά έισι το μαθηματικό πρότυπο περιλαμβάνει προς υπολογισμό 6 παραμέτρους: Q_0 , KW_0 , k_{vAsc} , k_{vDecs} , T_{dAsc} , T_{dDesc} .

Μέσω κατάλληλου λογισμικού δειγματοληπτούνται υμές της παροχής τροφοδοσίας και της ισχύος του αναβατορίου με περίοδο 1 min και μπορούν έισι να λαμβάνονται συνεχώς 250 ζεύγη πειραμαικών σημείων κατά ομαλή πορεία του ΜΤ. Μέσω αλγορίθμου μη γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίζονται οι παράμετροι. Το μοντέλο επιλύεται παράλληλα για ίδιες υμές των κερδών και των χρόνων υστέρησης για την άνοδο και την κάθοδο. Υπολογίζονται τα ιπτικά σφάλματα και οι συντελεστές συσχέισης για κάθε μια από υς δύο περιπτώσεις. Εάν ο συντελεστής συσχέισης για διαφορεικές παραμέτρους ανόδου και καθόδου είναι τουλάχιστον 1% μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για ίδιες παραμέτρους, τότε επιλέγονται διαφορεικές παράμετροι ανόδου και καθόδου. Διαφορετικά επιλέγονται οι ίδιες. Τα σημανικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Με βάση υς μέσες υμές των παραμέτρων δυναμικής υπολογίζονται οι παράμετροι του ρυθμιστή PID ακολουθώντας την τεχνική του ελέγχου εσωτερικού μοντέλου – IMC – όπως περιγράφεται από τον Cooper (2004) για μη αυτορρυθμιζόμενα συστήματα δηλ. αυτά που περιέχουν ολοκλήρωση. Αυτές οι παράμετροι δίνονται από το σύστημα εξισώσεων (5)

$$\begin{aligned} T_C &= \alpha \cdot T_d \sqrt{10} & k_p &= \frac{1}{k_v} \cdot \frac{2 \cdot T_C + T_d}{(T_C + 0.5 \cdot T_d)^2} \\ T_{Int} &= 2 \cdot T_C + T_d & T_{Deriv} &= \frac{0.25 \cdot T_d^2 + T_C \cdot T_d}{2 \cdot T_C + T_d} \quad (5) \\ k_i &= \frac{k_p}{T_{Int}} & k_d &= k_p \cdot T_{Deriv} \end{aligned}$$

Όπου T_c = Χρόνος συνδεόμενος με τη σταθερά χρόνου του κλειστού βρόγχου ανατροφοδότησης (min) και αποτελεί παράγοντα σχεδιασμού. Μία ιμμή της παραμέτρου $\alpha = 1$ αντιστοιχεί σε ιππικό σχεδιασμό, ενώ $\alpha = 5$ σε συντηρητικό σχεδιασμό. T_{int} = χρόνος ολοκλήρωσης (min) και T_{deriv} = χρόνος παραγωγίσισης σε (min).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ

Με βάση τη μέθοδο που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο υπολογίζονται για μεγάλο αριθμό από ομάδες πειραματικών δεδομένων οι παράμετροι της δυναμικής του συστήματος άλησης. Οι υπολογισμοί έγιναν για δύο ΜΤ του Εργοστασίου ΧΑΛΥΨ, τους ΜΤ5, ΜΤ7. Στον Πίνακες 1 και 2 δίνονται για κάθε ΜΤ: (α) Ο αριθμός των ομάδων δεδομένων που επεξεργάστηκαν (β) Τα αποτελέσματα των μέσων ιμμών των παραμέτρων (γ) Οι ιππικές αποκλίσεις των παραμέτρων (δ) Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης

Πίνακας 1. Παράμετροι δυναμικής του ΜΤ5

	T_{dAsc}	k_{vAsc}	T_{dDesc}	k_{vDesc}
Αριθμός αποτελεσμάτων		280		
Μέση τιμή	10.2	$2.96 \cdot 10^{-2}$	10.2	$3.16 \cdot 10^{-2}$
Τυπική απόκλιση	3.2	$1.54 \cdot 10^{-2}$	3.2	$1.63 \cdot 10^{-2}$
Συντελεστής συσχέτισης		0.86		

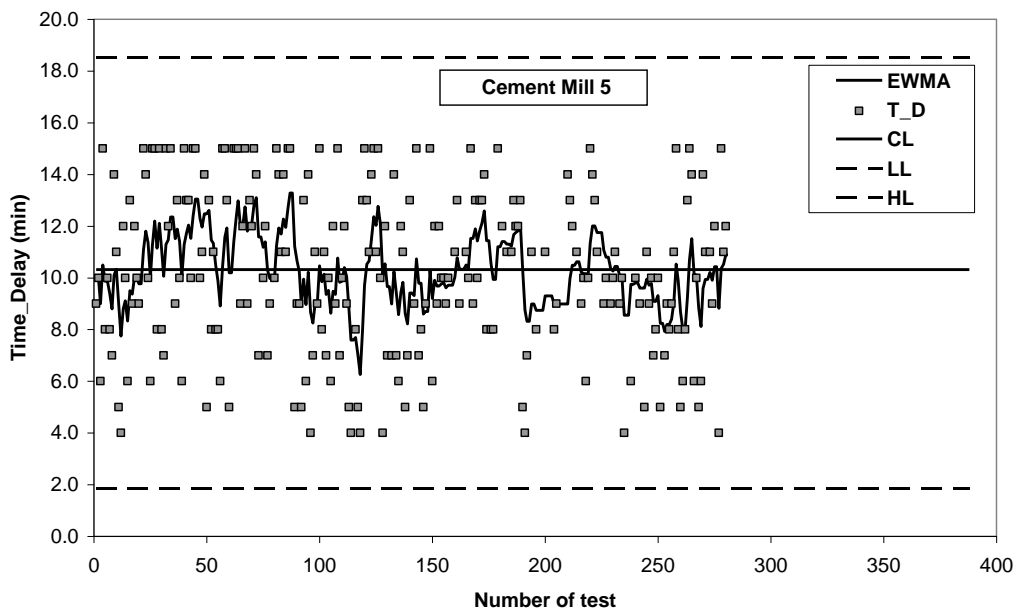
Πίνακας 2. Παράμετροι δυναμικής του ΜΤ7

	T_{dAsc}	k_{vAsc}	T_{dDesc}	k_{vDesc}
Αριθμός αποτελεσμάτων		170		
Μέση τιμή	13.9	$4.76 \cdot 10^{-2}$	13.9	$4.10 \cdot 10^{-2}$
Τυπική απόκλιση	3.8	$2.65 \cdot 10^{-2}$	3.8	$2.38 \cdot 10^{-2}$
Συντελεστής συσχέτισης		0.87		

Από τους Πίνακες παρατηρούνται υψηλά επίπεδα ιππικών αποκλίσεων σε σχέση με τις μέσες ιμμές των παραμέτρων, τόσο στον χρόνο υστέρησης, όσο και στο κέρδος γεγονός που σημαίνει υψηλή αβεβαιότητα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι διαταραχές από το μέσο επίπεδο λειτουργίας προκαλούν μεταβολή στα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Αυτός είναι ο βασικός λόγος να επιδιώκεται βελτιστοποιημένος και «εύρωστος» (robust) ρυθμιστής PID, ώστε να αποσβένει τις διαταραχές φορτίου. Όλες οι ιμμές των χρόνων υστέρησης που υπολογίστηκαν για τους δύο ΜΤ δίνονται στα Σχήματα 4 και 5 με μορφή χάρτη ελέγχου, όπου ως άνω και κάτω όρια ελέγχου έχει ληφθεί ένα περιθώριο $\pm 3\sigma$ από

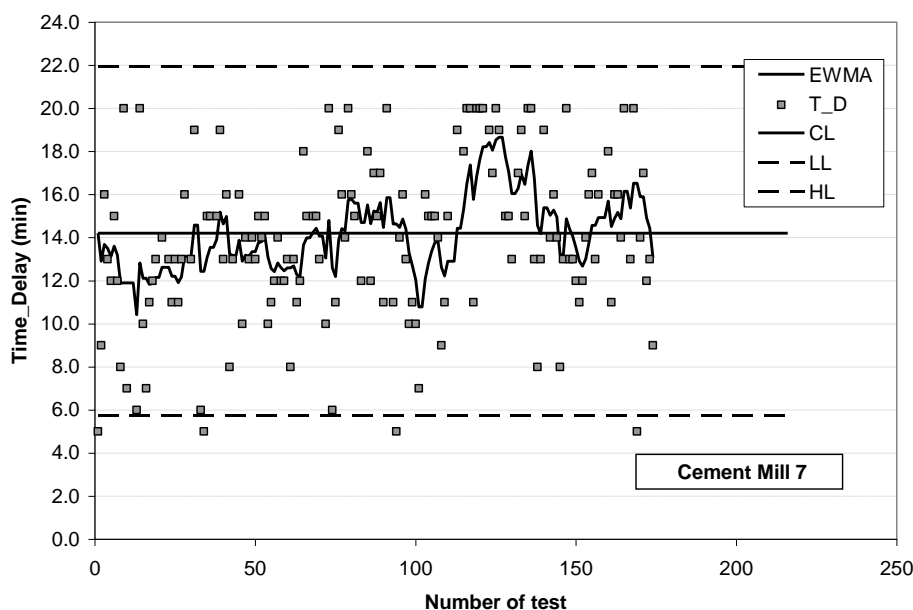
τη μέση τιμή. Στα ίδια Σχήματα δίνεται ο εκθετικά ζυγισμένος κινούμενος μέσος EW_Td του χρόνου υστέρησης που δίνεται από την Εξίσωση (6) για παράμετρο $\lambda=0.25$:

$$EW_Td(I) = \lambda \cdot Td(I) + (1 - \lambda) \cdot EW_Td(I - 1) \quad (6)$$



Σχήμα 4. Διασπορά του χρόνου υστέρησης στον MT5

Εάν ληφθεί υπόψη ότι ο χρονικός ορίζοντας υπολογισμού των παραμέτρων της δυναμικής είναι 250 min, τότε συνάγεται ότι και εντός της ίδιας ημέρας η δυναμική αλλάζει συνεχώς, λόγω των συνεχών διαταραχών. Η τυχόν ύπαρξη τάσης γίνεται κατανοητή από την καμπύλη του κινούμενου μέσου η οποία είναι σημαντικότερη για τη λήψη προληπτικών σε ορισμένες περιπτώσεις ενεργειών. Έτσι για παράδειγμα εάν η τάση είναι ο χρόνος Td να αυξάνει, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα μειωμένη παραγωγή του MT αλλά πιθανά μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στο κύκλωμα ή μεγαλύτερο παρακράτημα σε κάποιο σημείο του, γιατί κάποιο σημείο εξαγωγής έχει φράξει. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι ο σε ρουτίνα υπολογισμός των δυναμικών παραμέτρων, που επιτυγχάνεται ταχύτατα με βάση το λογισμικό που αναπτύχθηκε, παρέχει πληροφορίες και για την τρέχουσα λειτουργία του MT.



Σχήμα 5. Διασπορά του χρόνου υστέρησης στον MT7

Πίνακας 3. Τιμές συντελεστών ρυθμιστών PID

	MT5		MT7	
	Άνοδος αναβατορίου	Κάθοδος αναβατορίου	Άνοδος αναβατορίου	Κάθοδος αναβατορίου
k_p	1.43	2.15	1.31	1.43
k_i	0.03	0.03	0.019	0.021
k_d	5.2	7.0	7.7	8.4

Μετά τον υπολογισμό των δυναμικών παραμέτρων από μια αρχική ομάδα πειραματικών δεδομένων τουλάχιστον 20 ημερών υπολογίζονται οι παράμετροι των ρυθμιστών για τους δύο MT. Για τον υπολογισμό της μεταβλητής σχεδιασμού T_c έχει ληφθεί παράμετρος $\alpha=1$ για τον MT5 και $\alpha=0.7$ για τον MT7 ώστε να δίνουν μια παραπλήσια τιμή του T_c περί τα 31-32 min. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 3.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΤΩΝ

Για την αξιολόγηση της επίδοσης της παραμετροποίησης που επιλέχθηκε για τους ρυθμιστές των δύο MT απαιτείται ένα κριτήριο. Ως τέτοιο επιλέγεται το

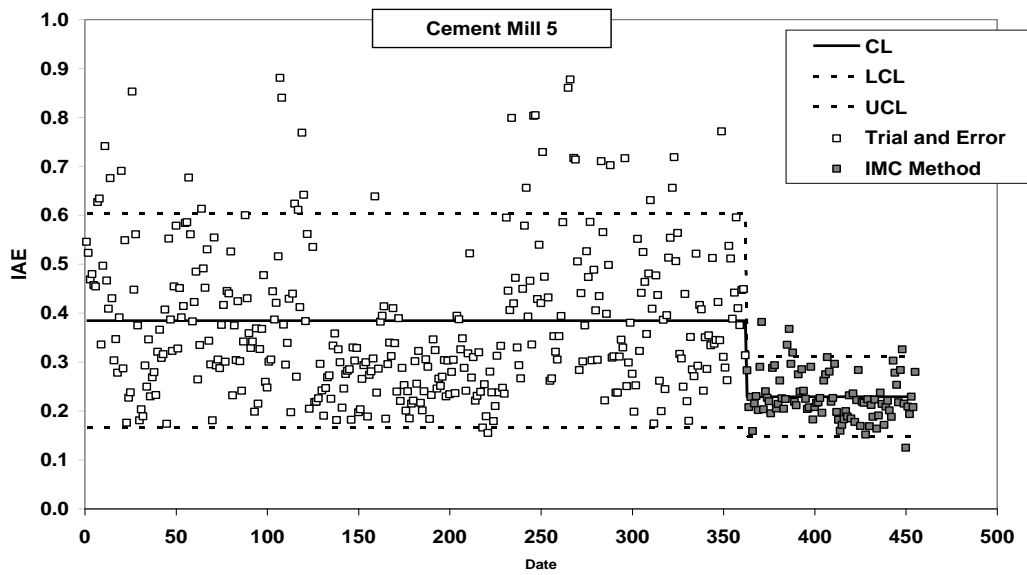
ολοκλήρωμα του απολύτου σφάλματος της ισχύος - integral absolute error (IAE) - που δίνεται από την Εξίσωση (7):

$$IAE = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} |KW(t) - KW_{sp}| dt \quad (7)$$

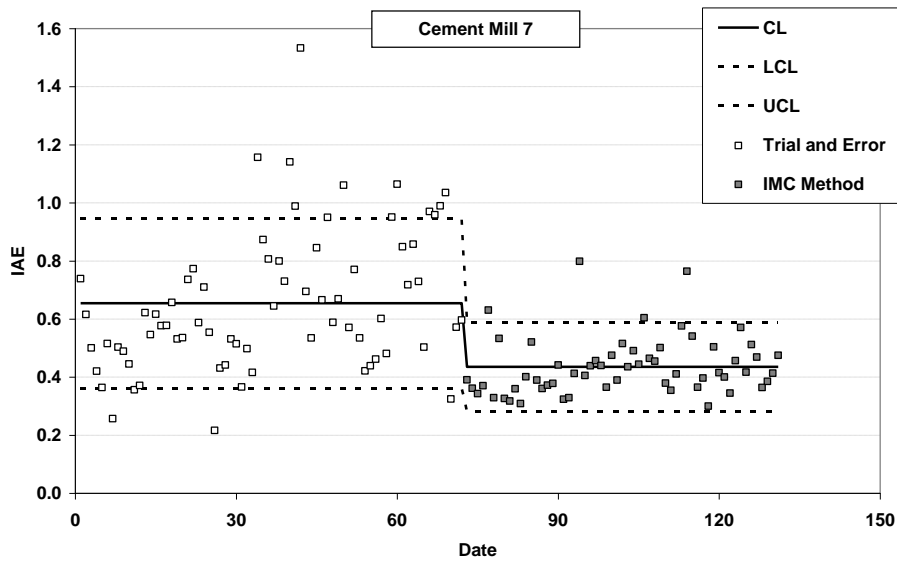
Δηλ. το ολοκλήρωμα ως προς χρόνο τη απόλυτης υμής της διαφοράς της ισχύος σε χρόνο t , από το set point της ισχύος. Ως άνω όριο ολοκλήρωσης t_0 , θεωρείται η μια ημέρα και ως διαφορικός χρόνος $dt=1$ min. Με χρήση κατάλληλου λογισμικού, ανακτώνται οι υμές ισχύος ανά λεπτό και ανά ημέρα και υπολογίζεται το ολοκλήρωμα IAE. Να σημειωθεί ότι για μια πλήρη ημέρα λειτουργίας ενός MT, η ολοκλήρωση περιλαμβάνει 1440 min. Πριν την παραμετροποίηση των ρυθμιστών με την μέθοδο IMC, οι MT λειτουργούσαν αυτόματα με ικανοποιητικό τρόπο και οι παράμετροι είχαν βρεθεί με δοκιμή και σφάλμα. Για να ελεγχθεί εάν ο συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού των συντελεστών βελιώνει τη λειτουργία ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- (1) Για μια σχευικά μακρά περίοδο λειτουργίας με υς αρχικές παραμέτρους υπολογίζεται το IAE για κάθε ημέρα.
- (2) Υπολογίζεται η μέση υμή και η ιπική απόκλιση των IAE για τη θεωρούμενη περίοδο, IAE_{Aver} , σ_{IAE}
- (3) Δημιουργείται χάρτης ελέγχου που περιλαμβάνει τα ημερήσια IAE, την μέση υμή και ένα εύρος $\pm\sigma$ γύρω από τη μέση υμή
- (4) Τα βήματα (1)-(3) επαναλαμβάνονται για μια επαρκώς μακρά περίοδο μετά την εφαρμογή των νέων παραμέτρων.
- (5) Διερευνάται η σχέση των δύο μέσων υμών IAE, η σχέση των δύο άνω ορίων $IAE_{MAX} = IAE_{Aver} + 3\sigma_{IAE}$ καθώς και το ποσοστό των σημείων ως προς τα συνολικά τα οποία ξεπερνούν το άνω όριο.

Στα Σχήματα 6 και 7 δίνονται τα ημερήσια IAE συναρτήσει του χρόνου για τους δύο MT. Παράλληλα εμφανίζονται και τα μέσα IAE καθώς και τα άνω και κάτω όρια ελέγχου. Το set point για τον MT5 είναι 9 KW ενώ το αντίστοιχο για τον MT7 είναι 14 KW. Από τα σχήματα αυτά είναι φανερή η βελτίωση της σταθερότητας της λειτουργίας των MT μετά την παραμετροποίηση των PID ρυθμιστών με τη μέθοδο IMC. Ειδικά στον MT5 η μέση υμή προσεγγίζει τα όρια του σφάλματος μέτρησης και καταγραφής – 0.1 KW – άρα μάλλον αποτελεί το απόλυτο βέλιστο.



Σχήμα 6. Σφάλμα IAE συναρτήσει του χρόνου για τον MT5



Σχήμα 7. Σφάλμα IAE συναρτήσει του χρόνου για τον MT7

Στον Πίνακα 4 δίνονται τα set point των ισχύων, οι μέσες και οι μέγιστες τιμές των IAE - τα άνω όρια ελέγχου καθώς και οι σχέσεις τους για τους για τις δύο ομάδες παραμέτρων των PID για τους 2 MT. Δίνεται επίσης το ποσοστό των

ημερών που το ΙΑΕ ήταν μεγαλύτερο του άνω ορίου, ως προς τις συνολικές ημέρες λειτουργίας με την συγκεκριμένη ομάδα παραμέτρων.

Πίνακας 4. Αξιολόγηση παραμετροποίησης PID

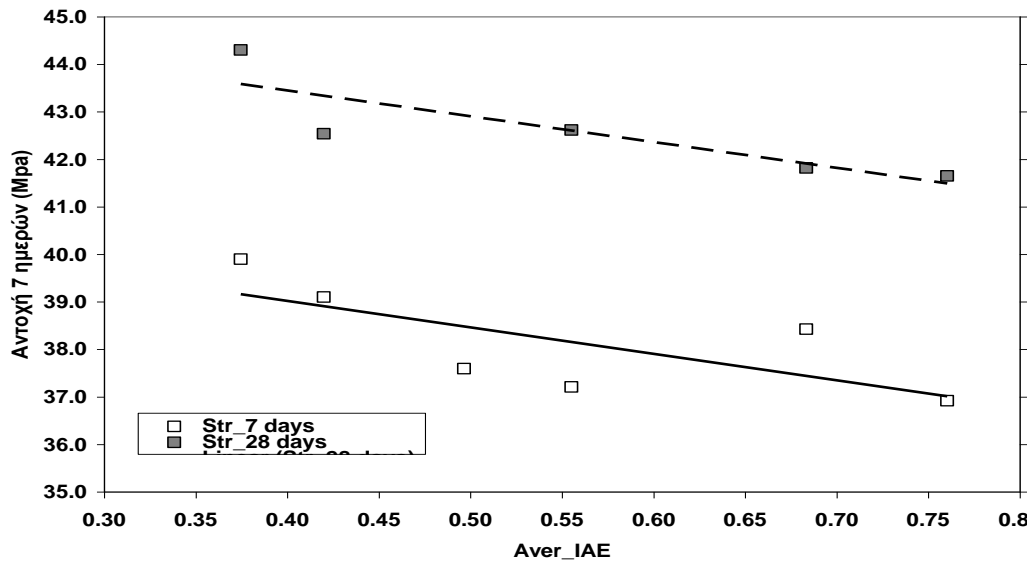
	MT5	MT7
Set Point (KW)	9	14
IAE _{Aver} Trial and Error (1)	0.384	0.654
IAE _{Aver} IMC (2)	0.229	0.435
% (2) / (1)	59.7	66.6
IAE _{MAX} Trial and Error (3)	0.603	0.947
IAE _{MAX} IMC (4)	0.311	0.589
% (4) / (3)	51.5	62.2
% Σημεία εκτός ορίων - Trial and Error (5)	9.9	16.7
% Σημεία εκτός ορίων - IMC(6)	5.4	6.8
% (6) / (5)	54.0	40.7

Από τον Πίνακα 4 παρατηρείται ότι η παραμετροποίηση των PID ρυθμιστών των δύο MT με την μέθοδο IMC, επιφέρει μια δρασικότερη βελτίωση τόσο του μέσου σφάλματος και του μέγιστου σφάλματος, όσο και του ποσοστού των σημείων που βρίσκονται εκτός του μέγιστου σφάλματος. Συνολικά λοιπόν η λειτουργία των MT είναι σημαντικά σταθερότερη, μετά τον σχεδιασμό των παραμέτρων των ρυθμιστών με την αναφερόμενη διαδικασία

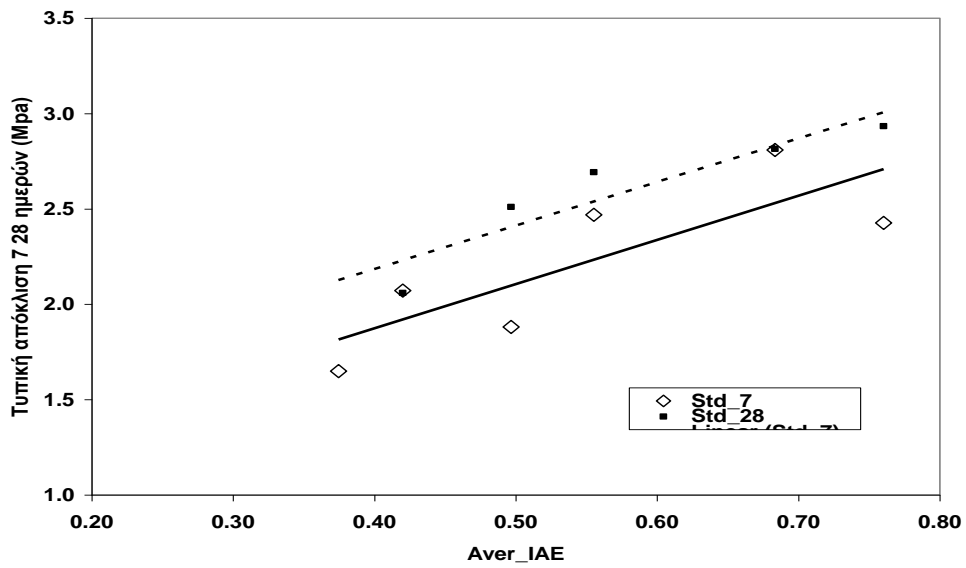
ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

Ένα παραπέρα ανικείμενο διερεύνησης είναι το αν η βελτιωμένη λειτουργία των MT έχει επίπτωση στο επίπεδο παραγωγικότητας και ποιότητας του προϊόντος. Για να μελητηθεί αυτό θεωρούνται τα μηνιαία αποτελέσματα ενός εξαμήνου του 2007 του MT7 για ένα μόνο τύπο ισιμέντου. Στα Σχήματα 8 και 9 δίνονται οι μέσες μηνιαίες αντοχές 7 και 28 ημερών και οι αντίστοιχες ιπικές αποκλίσεις, στο δε Σχήμα 10 η μέση μηνιαία παραγωγή του ίδιου MT για τον ίδιο τύπο ισιμέντου.

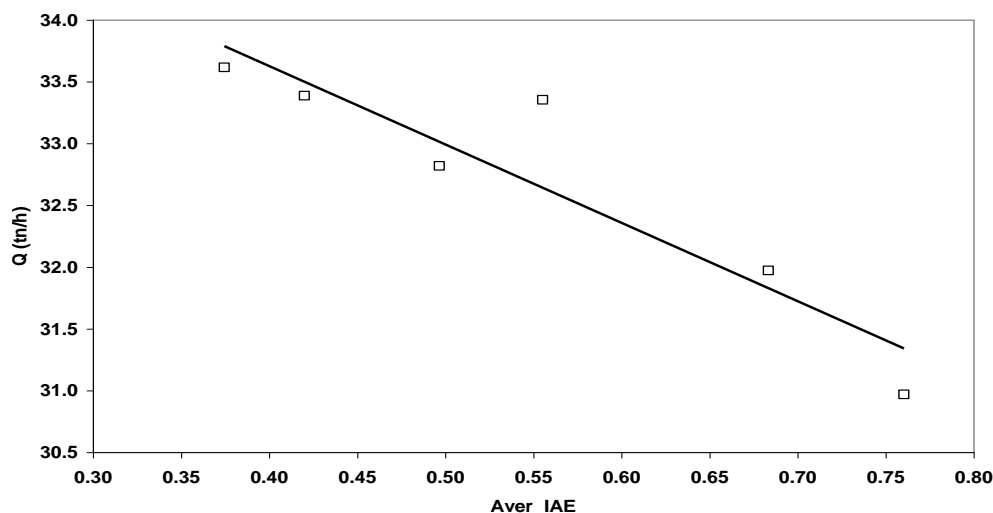
Από τα Σχήματα 8-10 καθίσταται προφανής η θετική επίδραση της μείωσης του σφάλματος από το set point και στους ιρεις δείκτες. Δηλ. τους βασικούς παράγοντες μέτρησης της ποιότητας και της παραγωγής, πέρα από τις τρέχουσες ρυθμίσεις του MT και την αλεσικότητα του κλίνκερ, επηρεάζει ισχυρά η ομοιογένεια της λειτουργίας του αυτομάτου γύρω από το στόχο.



Σχήμα 8. Μέσες μηνιαίες αντοχές τσιμέντου στον ΜΤ7



Σχήμα 9. Μηνιαίες τυπικές αποκλίσεις αντοχών τσιμέντου στον ΜΤ7



Σχήμα 10. Μέσα μηνιαία επίπεδα παραγωγής στον ΜΤ7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η παραμετροποίηση ρυθμιστών PID που είναι εγκατεστημένοι σε κλειστά κυκλώματα άλησης τσιμέντου ακολουθώντας τη μεθοδολογία του ελέγχου εσωτερικού μοντέλου (IMC), μεθοδολογία που απαιτεί την ύπαρξη ενός μαθηματικού προτύπου περιγραφής της δυναμικής συμπεριφοράς του ΜΤ. Με ένα ελάχιστο αριθμό πειραμάτων προσδιορίζεται αρχικά η μορφή του μαθηματικού προτύπου. Ο προσδιορισμός των δυναμικών παραμέτρων και η αβεβαιότητά τους επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας αποκλεισικά τρέχοντα βιομηχανικά στοιχεία της μεταβλητής χειρισμού – παροχή τροφοδοσίας του ΜΤ – και της μεταβλητής της διεργασίας – ισχύς αναβατορίου ανακυκλοφορίας, αξιοποιώντας το θεώρημα της συνέλιξης. Αποδεικνύεται ότι η δυναμική συμπεριφορά ενός κυκλώματος άλησης αλλάζει διαρκώς, λόγω της ύπαρξης ποικιλίας διαταραχών όπως π.χ., η αλεσικότητα του κλίνκερ, οι διαφορετικές συνθέσεις ισιμέντου και η μετάβαση από τη μία σύνθεση στην άλλη, μεταβολές στην παροχή των αερίων και στις θερμοκρασίες. Αυτός είναι ο λόγος που επιδιώκεται ο σχεδιασμός ενός «εύρωστου» (robust) ρυθμιστή PID, ώστε να αποσβένει τις διαταραχές.

Μετά την παραμετροποίηση των PID σε δύο ΜΤ και για να αξιολογηθεί η επίδοσή τους, γίνεται σύγκριση της αυτόματης λειτουργίας των ΜΤ με τις τρέχουσες ιμέδες, με προηγούμενο διάστημα που οι ιμέδες των PID είχαν ευρεθεί με δοκιμή και σφάλμα χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το ολοκλήρωμα του

απόλυτου σφάλματος από το στόχο - ΙΑΕ Τα σφάλματα από τη μέση υμή είναι ~50% - 70% μικρότερα με την εφαρμοζόμενη παραμετροποίηση σε σχέση με την προηγούμενη. Η σταθερή αυτόματη λειτουργία των ΜΤ γύρω από ένα set point έχει σοβαρή θετική επίδραση, τόσο στο επίπεδο παραγωγικότητας όσο και στο επίπεδο αντοχών και σταθερότητάς τους. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι όσες πιο λίγες στάσεις έχει ένας ΜΤ και όσο λιγότερες είναι οι αλλαγές τύπου ισιμέντου σε ημερήσια ή και πολυήμερη βάση, τόσο οι παραπάνω δείκτες βελιστοποιούνται.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Argogast, J., Cooper, D. "Extension of IMC tuning correlations for non-self regulating (integrating) processes, ISA Transactions", Vol. 46 (2007) 303-311

Ender, D. "Process Control Performance: Not as good as you think", Control Engineering, Vol. 40 (1993) 180-190

Rivera, D.E., Morari, M. & Skogestad, S. "Internal model control 4: PID controller design", Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 25 (1986) 252-265

Βιβλία

Astrom, K., Hagglund, T., "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", Research Triangle Park: 2nd Ed. Instrumentation, Systems and Automatic Society (1995)

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

Cooper, D., "Practical Process Control Using Control Station 3.7", Control Station LLC (2004)

Duda, W.H., "Cement data book", Berlin, 3rd Ed., Bauverlag GmbH, Vol. 2 (1984)

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια (δημοσιευμένα σε πρακτικά)

Clemens, P. "Effective automation of closed circuit bucket elevator mills for cement", VDZ Congress, Process Technology of Cement Manufacturing, Verlag Bau Technik GmbH, Dusseldorf (2002), 116-122.

Espig, D., Reinch, V. "Advantages of computer - based mill audits and simulation using selected cement grinding plants", VDZ Congress, Process Technology of Cement Manufacturing, Verlag Bau Technik GmbH, Dusseldorf (2002), 123-134.

Gao, Z., "Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning", Proceedings of the American Control Conference, Vol. 6 (2003) 4989-4996.

Τσαματσούλης, Δ., Φωτόπουλος, Α, Μαρίνος, Ι. & Παπαγιαννάκος, Ν. "Προσομοίωση άλησης ισιμέντου σε βιομηχανική κλίμακα με μοντέλο αξονικής διασποράς", 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Αθήνα (2001)