

Μοντελοποίηση-Σχεδίαση Μετρητή Ροής Μάζας και Πολυμεταβλητού (ΠΕΠΕ) Ελεγκτή Διφασικής Ροής Ρευστοποιημένων Κλινών Πυκνής Σκόνης

Δ.Ε. BENTZΑΣ

Δρ. Μηχ. - Ηλ. Μηχ. - Καθηγητής ΤΕΙ Λαμίας

Περίληψη

Μοντελοποιείται ένα σύστημα τροφοδοσίας σκόνης αποτελούμενο από ρευστοποιημένη κλίνη και ακροφύσιο. Σχεδιάζεται ένας διφασικός μετρητής ροής μάζας. Συνάγονται η συνάρτηση μεταφοράς και η απόκριση ΠΕΠΕ ελέγχου κλειστού βρόχου με πολυμεταβλητό ελεγκτή. Η θεωρητική μοντελοποίηση ελέγχεται με προσομοίωση και πειραματικά αποτελέσματα, ώστε να περιγραφεί η συμπεριφορά της ρευστοποιημένης κλίνης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρευστοποιημένη κλίνη είναι ένα πνευματικό σύστημα που μετασχηματίζει τις κοινές σκόνες από τη στερεά τους φάση σε ρευστή φάση [11, 18, 19]. Η ρευστοποιημένη κλίνη χρησιμοποιείται [17] για:

1. μεταφορά, συσκευασία σκόνης,
2. εφαρμογές επικάλυψης με εκτόξευση (spray),
3. σκλήρυνση υλικών,
4. μεταφορά θερμότητας, επεξεργασία επιφανειών.

Οι εφαρμογές της ρευστοποιημένης κλίνης [5] βρίσκονται στην περιοχή της τεχνολογίας σκόνης, δηλαδή:

1. φαρμακευτική βιομηχανία,
2. βιομηχανία γυαλιού, αλουμίνιας, τσιμέντου,
3. καυστήρες κάρβουνου κ.λπ.

Μια βασική απαίτηση της σύγχρονης βιομηχανίας είναι αξιόπιστες, ακριβείς μετρήσεις και έλεγχος των ρευστοποιημένων κλινών [4, 7, 21]. Η εργασία μελετά με τεχνικές προσομοίωσης και πειραματικά:

1. την τροφοδοσία και τη μεταφορά σκόνης της κλίνης,
2. έναν πρωτότυπο τύπο ηλεκτροστατικού αισθητήρα ροής-μάζας σκόνης,
3. μοντελοποιεί τον αισθητήρα και τα στοιχεία ελέγχου,
4. και σχεδιάζει Μίας Εισόδου - Μίας Εξόδου (MEME, SISO) και Πολλών Εισόδων - Πολλών Εξόδων (ΠΕΠΕ, MIMO) ελεγκτές για το σύστημα.

Υποβλήθηκε: 11.8.1995

Έγινε δεκτό: 2.12.1996

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

\dot{m}	= Mass Flow Rate = Ροή Μάζας
rms	= Root Mean Square = Μέση Τετραγωνική Τιμή
SISO	= Single Input - Single Output
MEME	= Μία Είσοδος - Μία Έξοδος
MIMO	= Multiple Input - Multiple Output
ΠΕΠΕ	= Πολλοί Είσοδοι - Πολλοί Έξοδοι
SP	= Set Point (SV=Set Value) = Επιθυμητή Τιμή
PV	= Process Variable = Μετρούμενη Τιμή
MV	= Manipulated Variable = Έξοδος Ελεγκτή

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ρευστοποιημένη κλίνη (βλ. σχ. 1) αποτελείται από:

1. δεξαμενή αποθήκευσης - ρευστοποίησης σκόνης,
2. φίλτρο χαρτιού αποφυγής ανάστροφης ροής της σκόνης και μεταλλικό πλέγμα διέγερσης της σκόνης,
3. ακροφύσιο, σωλήνα μεταφοράς που παρέχει ακριβείς ποσότητες ροής στερεών σε ρεύμα αέρα.

Επειδή η ρευστή σκόνη καταρρέει και οι σωληνώσεις αποφράσσονται λόγω ανομοιογενειών στη ρευστοποίηση και το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού, η γεωμετρία, οι σωλήνες και το ακροφύσιο είναι τα πιο ευαίσθητα τμήματα της σχεδίασης της κλίνης. Σαν σκόνη χρησιμοποιείται σκόνη αλουμίνιας ή πυριτίου.

Οι λειτουργικές συνθήκες [23] της κλίνης υπαγορεύουν τις σημαντικότερες παραμέτρους (δηλαδή εισόδους, εξόδους και ελέγχουσες παραμέτρους) που επιδρούν στην επάρκεια ρευστοποίησης της σκόνης [2], δηλαδή:

h = στάθμη ρευστοποιημένης κλίνης,
 V_1 = ταχύτητα σκόνης στο ακροφύσιο,
 V_2 = ταχύτητα σκόνης στο σωλήνα μεταφοράς στερεών
 A_1 = ογκομετρική παροχή αέρα που διαπερνά το πλέγμα στο χώρο αποθήκευσης,

- A_2 = ογκομετρική παροχή αέρα στο σωλήνα μεταφοράς,
 ΔP_1 = πτώση πίεσης φίλτρου/πλέγματος,
 ΔP_2 = πτώση πίεσης στο ακροφύσιο,
 W = φόρτωση (συνολική μάζα σκόνης).

Σε μια ρευστοποιημένη κλίνη (σχ. 1) η ροή του αέρα προκαλεί μια πτώση πίεσης ΔP_1 , κατά μήκος του φίλτρου και του διάτρητου πλέγματος, που επαρκεί να στηρίζει το βάρος της ρευστοποιημένης σκόνης. Αύξηση της παροχής A_1 προκαλεί αύξηση του όγκου της κλίνης, έτσι το υδροστατικό ύψος της κλίνης είναι κρίσιμη παράμετρος. Παρατηρείται μια υστέρηση (σχ. 2), που εξαρτάται από το βαθμό συσσωμάτωσης και την αδράνεια διέγερσης (άρα αποτελεί και μέτρο αυτής). Μειώνοντας τη ροή του αέρα, η συσσωμάτωση των σωματιδίων είναι πιο χαλαρή και συνεπώς το ύψος της κλίνης είναι υψηλότερο και η ΔP_1 είναι μικρότερη [24].

Η πτώση πίεσης κατά μήκος της κλίνης (που αναγκάζει τη σκόνη να περάσει μέσω του ακροφυσίου) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πτώση πίεσης κατά μήκος του ακροφυσίου στην είσοδο του σωλήνα μεταφοράς, δηλαδή:

$$\Delta P_1 > \Delta P_2 \quad (3.1)$$

αλλιώς η ροή μέσω του ακροφυσίου θα σταματήσει. Η ΔP_2 , ως συνάρτηση της ροής μάζας στην κλίνη, δίνεται στο σχ. 3. Μείωση της πίεσης στο σωλήνα μεταφοράς επιτυγχάνεται με:

1. σωλήνα μεγαλύτερης διαμέτρου,
2. εκτοξευτήρα τύπου venturi,
3. χαμηλότερες παροχές αέρα,
4. ακροφύσιο στην έξοδο μεταφοράς.

Πίν. 1. Τεχνικές προδιαγραφές ρευστοποιημένης κλίνης.

Table 1. Fluidized bed technical specifications.

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	
Διάμετροι σωλήνων	4 - 12 mm
Ροή μάζας στο σωλήνα Β-Γ	10 - 100 g / min
Ακρίβεια φόρτωσης	± 5 %
Ροή ρευστής σκόνης	4 - 7 l/min
Ταχύτητες στο σωλήνα Α-Γ	4.5 - 9.0 m/s
Λόγος φόρτωσης στερεών-αέρα	22 : 1
ΔP_1	0 - 600 mm H ₂ O
A_1, A_2	0 - 17.464 l/min, 3.776 - 7.08 l/min
Είδος σκόνης	αλουμίνα ή πυρίτιο
W, φόρτωση	30 - 70 kg
φάσεις	2 (αέρας, σκόνη)
μέγεθος σωματιδίων σκόνης	60 μm
σχήμα σωματιδίων	σφαιρικό
ενδογενής ασφάλεια (αντικρηκτικότητα)	OXI

Αύξηση της πίεσης στο ακροφύσιο αποφεύγει την ανάστροφη πίεση, αλλά μικρές διαμέτροι ακροφυσίων ενδίδουν σε αποφάξεις. Η μηχανική και αεροδυναμική σχεδίαση ή η επιλογή του ακροφυσίου είναι κρίσιμες [18]. Το φίλτρο σκόνης, στη βάση της ρευστοποιημένης κλίνης, κατασκευάζεται από χαρτί ή ύφασμα, ανάλογα με την κυκλοφορούσα σκόνη και τις ταχύτητες μεταφοράς της. Στο άλλο άκρο του σωλήνα

μεταφοράς υπάρχει ασκός συλλογής της σκόνης ή κυκλώνας [10].

Οι τεχνικές προδιαγραφές του πνευματικού συστήματος μεταφοράς σκόνης δίνονται στον Πίν. 1.

4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

Ένας 8-bit μικροϋπολογιστής πραγματοποιεί τη μέτρηση ροής, την επεξεργασία σήματος και τον έλεγχο (σχ. 4). Χρησιμοποιείται τεχνική έμμεσης μέτρησης της ροής μάζας. Το interface είναι ένα ADC δύο καναλιών, με κυκλώματα προσαρμογής, χρονισμού και περιφερειακών. Οι λειτουργίες του μικροεπεξεργαστή συμπεριλαμβάνουν:

1. συλλογή, απεικόνιση δεδομένων,
2. επεξεργασία σήματος (φίλτρα, μέγιστο, συσχέτιση),
3. έξοδο μοντέλου του συστήματος,
4. μέτρηση ταχύτητας ροής, μάζας,
5. έλεγχο της διεργασίας,
6. τις γενικής φύσεως εργασίες του συστήματος,

δηλαδή είναι ένας αυτοδύναμος, ευφυής βιομηχανικός αισθητήρας-ελεγκτής.

Η αρχή της μέτρησης ροής με αλληλοσυσχέτιση σημάτων ροής συνοπτικά είναι η εξής: Για δύο (στην υπό μελέτη περίπτωση ηλεκτροστατικά) σήματα ροής $x(t)$, $y(t)$ παραγόμενα σε απόσταση L και ανιχνευόμενα από δύο (ηλεκτροστατικούς) αισθητήρες υπολογίζεται η συνάρτηση αλληλοσυσχέτισης:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^T x(t) * y(t + \tau) \cdot dt \quad (4.1)$$

Η $R_{xy}(\tau)$ μεγιστοποιείται για χρονική καθυστέρηση τ^* ,

$$\text{όπου } \tau^* \propto L/v \quad (4.2)$$

και v η ταχύτητα του ρευστού [9].

Για την περίπτωση Μίας Εισόδου - Μίας Εξόδου (MEME, SISO) χρειάζεται ένα ροόμετρο, ενώ για την περίπτωση Πολλών Εισόδων-Πολλών Εξόδων (ΠΕΠΕ, MIMO) χρησιμοποιούνται δύο ροόμετρα.

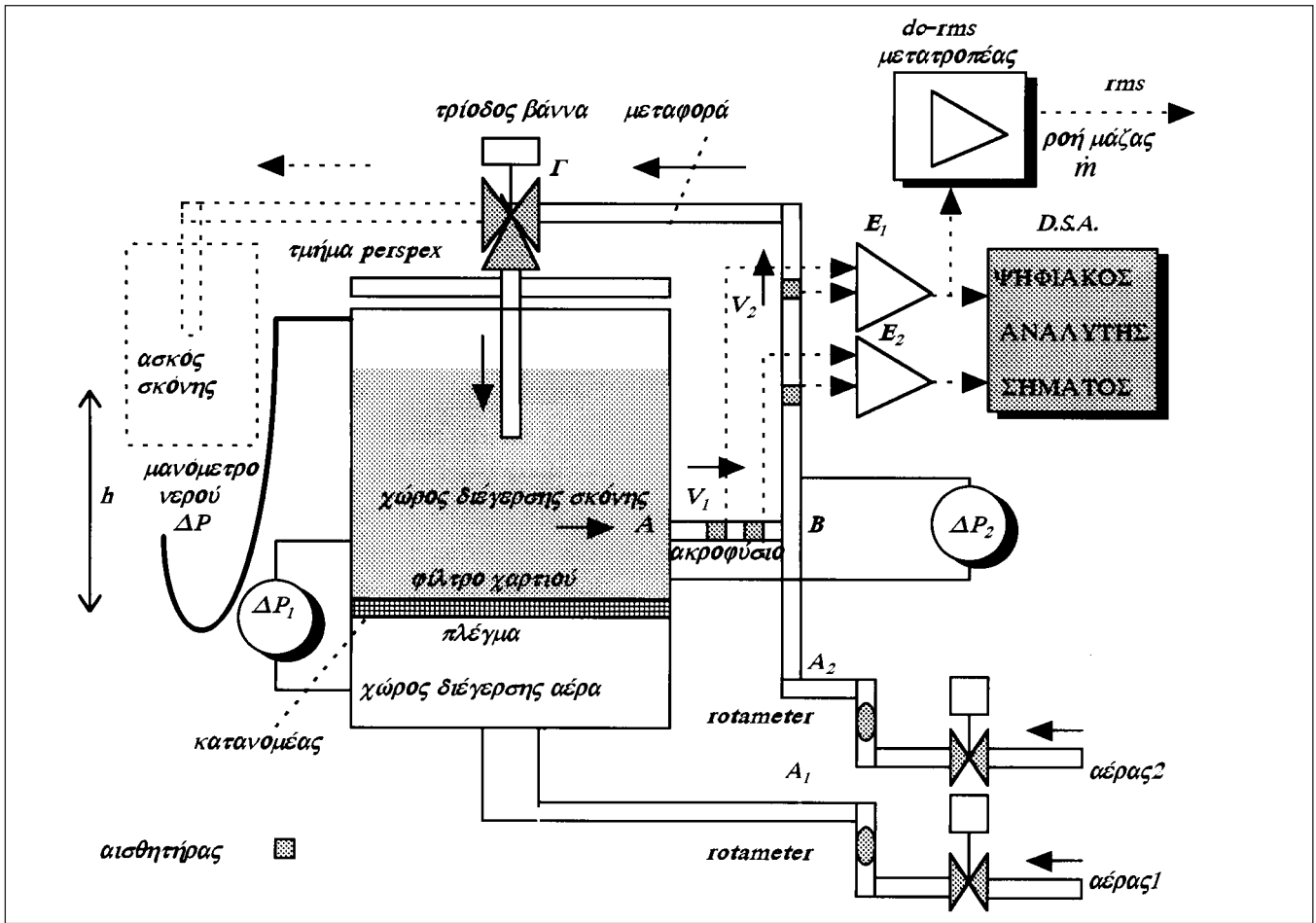
Ο συγγραφέας [26, 27] ανέπτυξε έναν 4-κάναλο x 1 bit αλληλοσυσχετιστή και έναν 2-κάναλο x 4 bit αλληλοσυσχετιστή κατάλληλο για μετρήσεις βιομηχανικών ροών.

Το ηλεκτρονικό μέρος του συστήματος μέτρησης αποτελείται από ενισχυτές (FET και τελεστικούς ενισχυτές OP11) υψηλής αντίστασης εισόδου και CMRR, PIA και ADC/DAC interface, ενδεικτικό ροής μάζας και δίνει χρόνο απόκρισης των ενισχυτών 10^{-6} sec, δηλαδή πολύ ταχύτερο από τη δυναμική της διεργασίας. Έτσι, ο

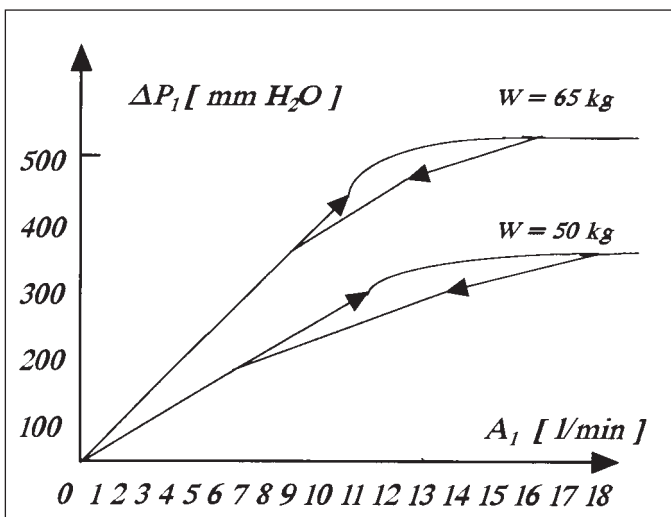
$$\text{Συνολικός Χρόνος Μέτρησης} =$$

$$= \text{Χρόνος [Απόκτησης + Επεξεργασίας] Δεδομένων}$$

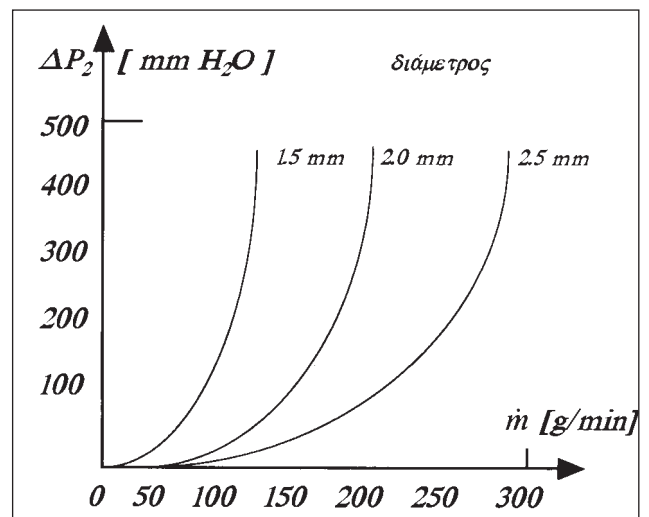
παρουσιάζεται στη μέτρηση και στον έλεγχο ως καθαρή χρονική καθυστέρηση, εξαρτάται δε από:



Σχ. 1. Πειραματική διάταξη ρευστοποιημένης κλίνης.
 Fig. 1. Fluidized bed experimental set-up.



Σχ. 2. Χαρακτηριστική ρευστοποιημένης κλίνης.
 Fig. 2. Fluidized bed operating characteristic.



Σχ. 3. Πτώση πίεσης ακροφυσίου, ΔP_2 , με εκροή μάζας του ακροφυσίου (ακροφύσια χάλυβα 25mm x διάμετρος).
 Fig. 3. ΔP_2 , Nozzle pressure drop v.s. nozzle mass flow rate (steel nozzle 25 mm x D)

- το φάσμα ηλεκτροστατικού σήματος,
- την περίοδο του ρολογιού CPU, ADC/DAC,
- το χρόνο ολοκλήρωσης (μέτρησης) και
- το ρυθμό (mode) λειτουργίας του επεξεργαστή.

Τυπικός μεταβατικός χρόνος των ροομέτρων αλληλοσυσχέτισης είναι 0.665 sec.

Το μοντέλο των μετρητών ροής για τη ρευστοποιημένη κλίνη αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ροόμετρα με πειραματικά οριζόμενη συνάρτηση μεταφοράς (σχ. 5).

5. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ-ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ

Οι αισθητήρες ηλεκτροστατικού σήματος ροής αποτελούνται από δύο μεταλλικές πλάκες, ηλεκτρικά απομονωμένες από ένα τέλει γειωμένο τοίχωμα σωλήνα μεταφοράς και θωρακισμένες για τις ηλεκτρικές παρεμβολές. Ανιχνεύουν επαγωγικά, ηλεκτροστατικά φορτία από τα πνευματικά μεταφερόμενα και ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια της ρευστοποιημένης σκόνης [6].

Συγκρίθηκαν διαφορετικές γεωμετρίες, εγκαταστάσεις αισθητήρων. Προτιμήθηκαν εξωτερικά εγκατεστημένοι δακτυλιοειδείς αισθητήρες 1 cm² (σχ. 6). Οι ηλεκτροστατικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι ταχείς, αξιόπιστοι, συνεχώς μετρούντες, μη παρεμβαίνοντες, μη εξαρτώμενοι από την κατάσταση του αερίου, μη καταναλώνοντες ενέργεια, ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν έχουν ανάγκη συντήρησης. Σε συνδεσμολογία σειράς (array) επιτηρούν διδιάστατα μέτωπα ροών.

Οι αισθητήρες ανιχνεύουν ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια και δίπολα με μηχανισμούς ηλεκτροδυναμικής επαγωγής [9, 22]. Η πολικότητα των φορτίων εξαρτάται από τη σκόνη και το υλικό του σωλήνα μεταφοράς, ανάλογα με τη θέση των υλικών στην τριβηλεκτρική σειρά και το νόμο του Lenz [20]. Για παράδειγμα, η σκόνη αλουμίνιας φορτίζεται θετικά [14]. Σκόνη, που ανακυκλώνεται, τείνει να φορτίσει ηλεκτρικά την καθαρή ουδέτερη σκόνη, οδηγώντας έτσι τους ηλεκτροστατικούς αισθητήρες στον κόρο και σε αναισθησία [3, 13]. Φορτία συνεχούς ρεύματος οφείλονται σε συσσωρεύσεις φορτίων και υφίστανται διολίσθηση, ενώ στη μέτρηση ενδιαφερόμαστε για ac συστατικά, που αντιστοιχούν σε πραγματικές ιδιότητες της ροής, υπό την προϋπόθεση ότι τα ηλεκτροστατικά φορτία είναι συζευγμένα με τη ροή. Τα ac φορτία ενισχύονται από τους μηχανισμούς φόρτισης (ενώ εξασθενούνται από δίπολα, συσσωρευση και εκκενώσεις φορτίων) δίνοντας ένα τυχαίο ή ψευδοτυχαίο σήμα.

Το σύστημα μέτρησης εξαρτάται από τη φυσική κατάσταση της ρευστοποιημένης κλίνης, δηλαδή:

1. μέγεθος-σχήμα σωματιδίων,
2. φύση και κατάσταση σκόνης,
3. επιφάνεια τοιχωμάτων σωλήνα.

Μελετήθηκαν μηχανισμοί δημιουργίας και ανίχνευσης

ηλεκτρικών φορτίων [16], καθεστώτα ροής (πολύ πυκνές, πυκνές, αραιές ροές), λειτουργικές συνθήκες της κλίνης (ταχύτητες, συγκέντρωση, υγρασία, θερμοκρασία κ.λπ.) [29], φύση και ηλεκτρικές ιδιότητες της σκόνης [1].

Αύξηση της ροής μάζας της μεταφερόμενης σκόνης αυξάνει τη μέση τετραγωνική απόκλιση (rms) της στάθμης του ηλεκτροστατικού σήματος (σχ. 7). Αύξηση της επιφάνειας του αισθητήρα, από 0.5 ÷ 8.0 cm² για ροή μάζας σκόνης από 20g/min ÷ 200 g/min και σωλήνα 10 mm, επενεργεί στο σήμα σαν χαμηλοπερατό φίλτρο, δίνοντας συχνότητα σήματος 0 ÷ 500 Hz. Η ευαισθησία του αισθητήρα, συναρτήσει της επιφάνειας, δίνεται στο σχ. 8.

Πειραματική μελέτη της επαναληπτικότητας, ακριβείας και ευαισθησίας της μέτρησης της ροής με τη μέθοδο της αλληλοσυσχέτισης δίνει ελάχιστες αποστάσεις (1 cm) των αισθητήρων. Τα (σχετικά) υψηλής συχνότητας επαγόμενα ηλεκτροστατικά σήματα θορύβου ροής δίνουν οξύτατες αλληλοσυσχετίσεις, που ορίζουν ακριβείς χρονικές καθυστερήσεις με υψηλή διακριτική ικανότητα. Ο υψηλής συχνότητας επαγόμενος θόρυβος ροής εξασθενεί και φιλτράρεται δραστικά κατά την κατεύθυνση της ροής, οδηγώντας σε μη συσχετιζόμενα συστατικά σήματος, δηλαδή το σήμα χαμηλής συχνότητας υπερισχύει, παράγοντας αμβλείες αλληλοσυσχετίσεις με ανακριβείς μετρήσεις χρόνων και ροών. Το κάτω όριο της συχνότητας αποκοπής των hardware φίλτρων είναι στα 61 Hz και απορρίπτει την ηλεκτροστατική συσσωρευση φορτίων στη σκόνη, τους σωλήνες, καθώς και παρεμβολές άλλων ηλεκτρικών πηγών [6].

Συμπερασματικά έχουμε:

1. Η ευαίσθητη περιοχή ανίχνευσης του αισθητήρα είναι:
 - (α) αντίστροφα ανάλογη του φάσματος θορύβου ροής,
 - (β) ανάλογη της rms στάθμης του θορύβου ροής.
2. Η rms στάθμη του θορύβου ροής εξαρτάται από τη ροή μάζας για σταθερή ταχύτητα σκόνης.
3. Το φάσμα του θορύβου ροής είναι ανεξάρτητο από τη ροή μάζας για σταθερή ταχύτητα σκόνης.

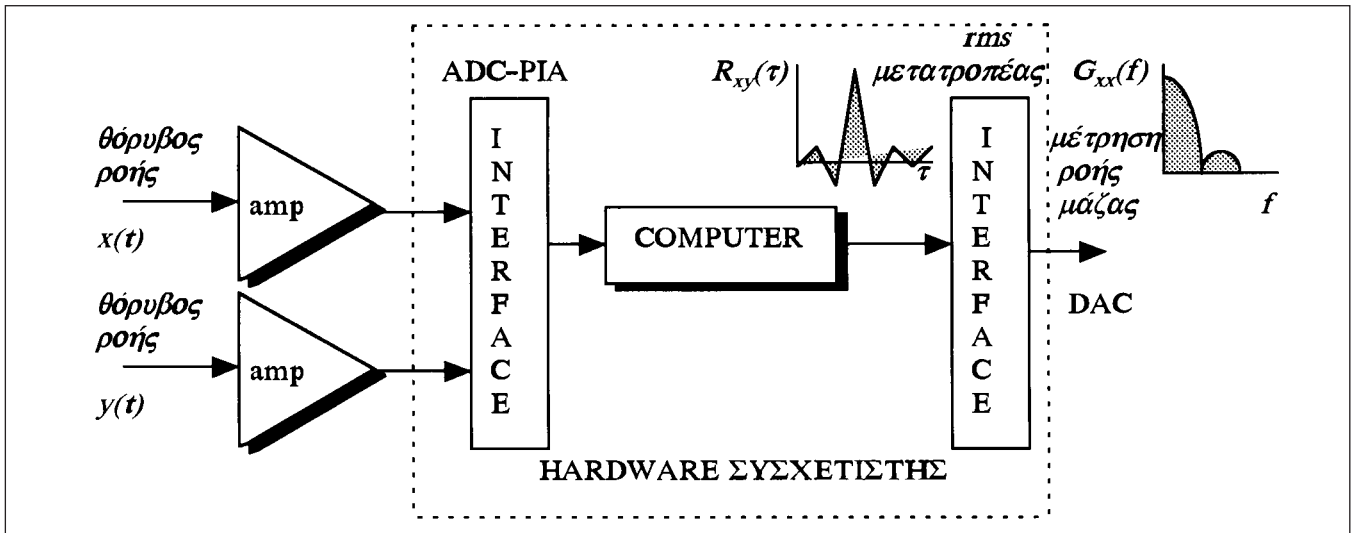
Η εργασία προτείνει έμμεση μέτρηση ροής μάζας, με διακρίβωση του ακροφυσίου (σχ. 9), με συσχέτιση rms στάθμης / ροής μάζας (σχ. 10). Οι rms τιμές του ηλεκτροστατικού σήματος οδηγούν σε τυχαία σφάλματα ± 5 % της μετρούμενης ροής μάζας σκόνης, ένα θεωρητικό όριο και για τα περισσότερα ροόμετρα αλληλοσυσχέτισης.

Η rms τιμή του ac θορύβου ροής, $x(t)$, είναι:

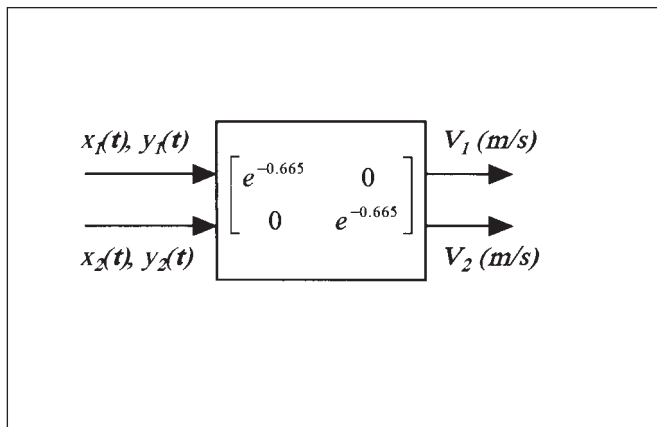
$$x_{rms}(t) = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) \cdot dt} \quad (5.1)$$

Για μια εργοδική διεργασία [8]:

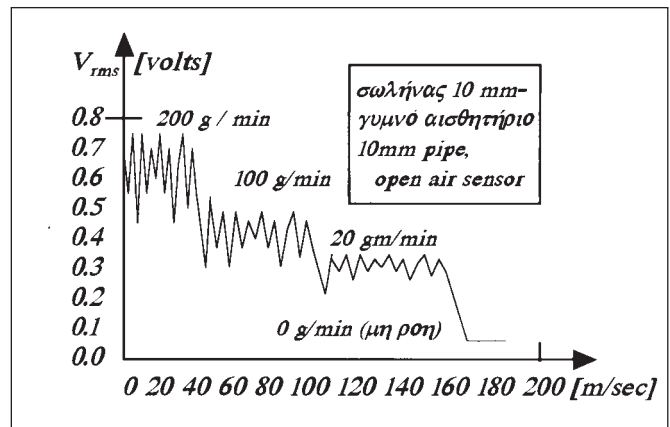
$$x_{rms}(t) = \lim_{f \rightarrow \infty} \int_0^f G_x(f) \cdot df = \lim_{f \rightarrow \infty} \sigma^2 = R_x(0) \quad (5.2)$$



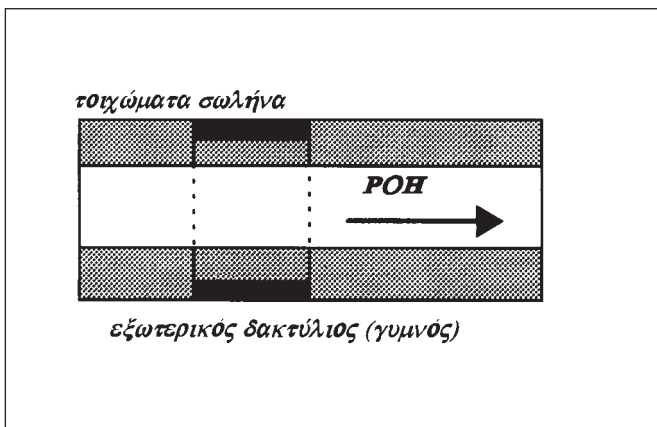
Σχ. 4. Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος μέτρησης.
Fig. 4. Measuring system block diagram.



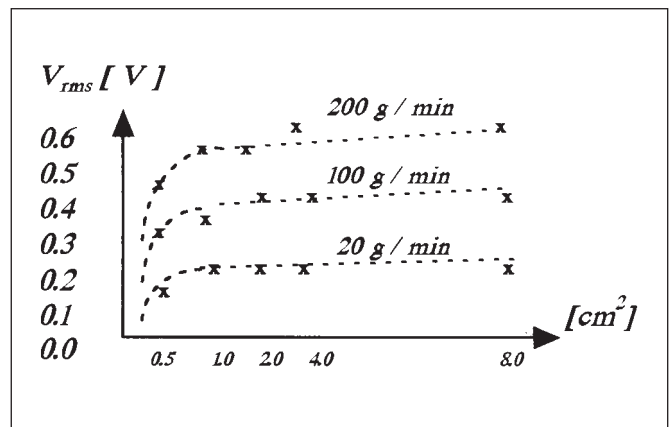
Σχ. 5. Συνάρτηση μεταφοράς συστήματος μέτρησης.
Fig. 5. Measuring system transfer function.



Σχ. 7. Rms καταγραφές ηλεκτροστατικού θορύβου.
Fig. 7. Sensor flow noise rms value recordings.



Σχ. 6. Γεωμετρία - εγκατάσταση αισθητήρων.
Fig. 6. Flow sensor geometry-installation.



Σχ. 8. Ευαισθησία αισθητήρα-επιφανείας του.
Fig. 8. Sensor sensitivity v.s. sensor sensing area.

όπου $R_x(0)$ = η αλληλοσυσχέτιση της $x(t)$ σε $\tau = 0$, δηλαδή μηδενική χρονική καθυστέρηση,

$G_x(f)$ = φάσμα ισχύος της $x(t)$,

σ = συνολική ισχύς θορύβου σήματος ροής.

Ο μετρητής ροής μάζας διακριβώνεται με τη μέθοδο ελεύθερης ροής απο ανοικτό στόμιο σωλήνα, με ταχύτητα εκτοξευόμενης σκόνης χωρίς σωλήνα = $\sqrt{g \cdot x^2 / 2 \cdot y}$ (5.3)

(όπου x, y : οι συντεταγμένες τροχιάς του ελεύθερου ρεύματος σκόνης) ή εναλλακτικά με ζύγιση.

6. ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ως ακροφύσιο (τροφοδότης σκόνης) χρησιμοποιείται αυτό του αναστροφου κώνου [15] λόγω της απλότητάς του (σχ. 11). Ο τροφοδότης σκόνης είναι το πιο ευαίσθητο εξάρτημα του συστήματος της ρευστοποιημένης κλίνης. Αναμιγνύει το αέριο με τη σκόνη σε συγκεκριμένο λόγο και το μεταφέρει (υπό έλεγχο πίεσης) κατά μήκος του σωλήνα τροφοδοσίας. Εμπορικά διαθέσιμα ακροφύσια συμπεριλαμβάνουν μια χοάνη-αποθήκη σκόνης [12]. Είναι γενικά προτιμότερο να μεταβληθεί η τροφοδοσία σκόνης για δεδομένη ροή αέρα, χωρίς να μεταβληθούν άλλες ρυθμίσεις. Ο τροφοδότης σκόνης της ρευστοποιημένης κλίνης είναι μία συσκευή 2 εισόδων / 2 εξόδων, με μεταβλητές εισόδου / ελέγχου της διεργασίας, τις:

A_1 = ροή αέρα διέγερσης της κλίνης,

A_2 = ροή αέρα μεταφοράς σκόνης.

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ εισόδων-εξόδων (συζεύξεις) δίνονται στο σχ. 12. Κατά τη μοντελοποίηση της κλίνης εκτελείται ανοικτού βρόχου ανάλυση για κάθε υποσύστημα, χρησιμοποιώντας τεχνικές αναγνώρισης συστημάτων. Μια βηματική παρενόχληση σε κάθε είσοδο (διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες σταθερές) αποκαλύπτει το σύστημα, παράγοντας σε όλες τις εξόδους της διεργασίας μια βηματική απόκριση.

Η διεργασία μελετάται στις τυπικές λειτουργικές συνθήκες 0-100 g/min σε 9.44±15.104 l/min. Οι ανοικτού βρόχου βηματικές αποκρίσεις του τροφοδότη σκόνης δίνουν:

$$G_{11}(s) = \frac{10.5 * e^{-2*s}}{13 * s + 1} \quad G_{21}(s) = 9.8 * e^{-5*s} \quad (6.2)$$

$$G_{12}(s) = 8.2 \quad m / l \quad G_{22}(s) = 100.9 \quad m / l$$

Η βηματική απόκριση της πνευματικής βάννας ελέγχου ροής, στις συνθήκες της ρευστοποιημένης κλίνης (σχ. 13), δίνει συναρτήσεις μεταφοράς ανοικτού βρόχου των βαννών ελέγχου της ροής αέρα A_1 και A_2 :

$$G(s)_{V_1} = \frac{0.0150}{3.5 * s + 1} \quad \text{και} \quad G(s)_{V_2} = \frac{0.0075}{3.5 * s + 1} \quad (6.3)$$

Οι χρονικές σταθερές συνάγονται από τις καμπύλες βηματικής απόκρισης. Το κέρδος της βάννας υπολογίζεται από τον τύπο διαστολόγησης της βάννας.

7. MEME (SISO) ΣΧΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Το σύστημα ελέγχου με ανάδραση και με Μία Είσοδο-Μία Έξοδο (MEME) οδηγεί στο μοντέλο του διαγράμματος βαθμίδων των συναρτήσεων μεταφοράς του σχ. 14.

Μόνον η ροή V_1 μελετάται εδώ, αφού η σημαντικότητα της V_2 είναι δευτερεύουσα στην προσπάθεια να διατηρηθεί σταθερή ροή μάζας. Βηματική μεταβολή στην έξοδο του ελεγκτή δίνει τη V_1 στο χρόνο. Η συναγόμενη συνάρτηση μεταφοράς του τροφοδότη σκόνης έχει τη μορφή:

$$G_p(s) = \frac{K_p \cdot e^{-T_d * s}}{\tau * s + 1} \quad (7.1)$$

όπου K_p = το κέρδος της διεργασίας = 10.5

T_d = η χρονική καθυστέρηση = 2 s

τ = σημαντικότερη χρονική σταθερά = 13 s

Η ρύθμιση των ελεγκτών γίνεται [28] με τις κλασικές μεθόδους (δηλαδή ελάχιστο offset, ταχύτερη απόκριση με ελάχιστη ανεκτή υπερακόντιση). Η χρονική καθυστέρηση της βάννας ελέγχου συγκρινόμενη με τη χρονική σταθερά της διεργασίας είναι:

$$\tau_{βάννας} = 3.5 \text{ s} < \tau = 13 \text{ s} \quad (7.2)$$

Ρύθμιση του PID ελεγκτή, για αναλογική, ολοκληρωτική και διαφορική (PID) δράση ελέγχου [28] δίνει:

αναλογικό κέρδος = $K_c = 65.3$

χρόνο ολοκλήρωσης = $i = 4.6 \text{ s}$

χρόνο διαφόρισης = $D = 0.7 \text{ s}$

Οι αποκρίσεις κλειστού βρόχου (σχ. 15) για:

(i) βηματική μεταβολή στη V_1 διατηρώντας το φορτίο A_2 σταθερό,

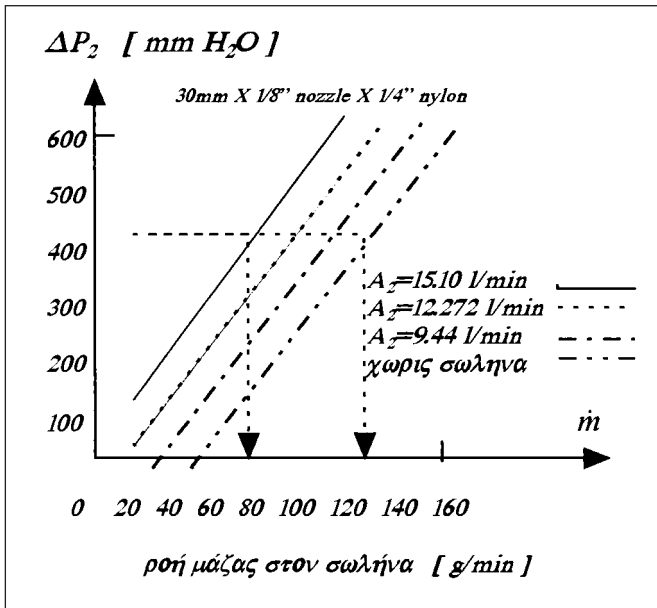
(ii) βηματική μεταβολή στο φορτίο A_2 .

Στο MEME σχήμα ελέγχου απαιτούνται μόνον ένα ροόμετρο και ένας ελεγκτής, άρα είναι απλούστερο και χαμηλότερου κόστους από το ΠΕΠΕ σχήμα ελέγχου.

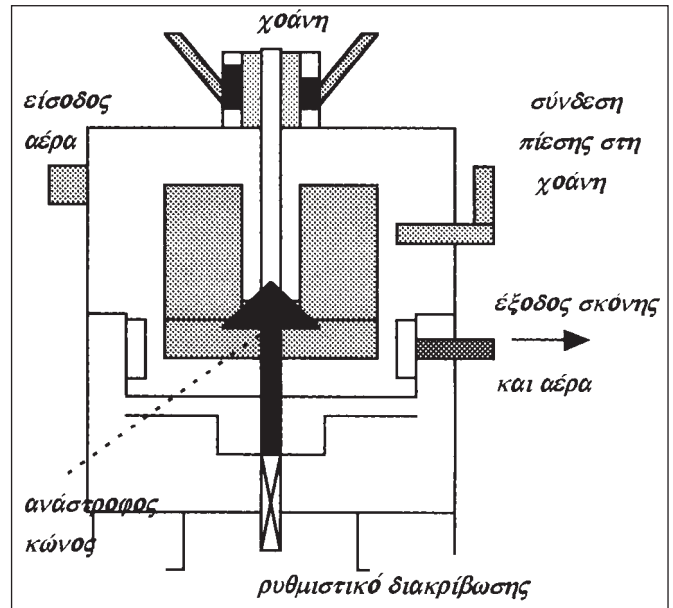
8. ΠΕΠΕ ΣΧΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Στο σχήμα ελέγχου Πολλών Εισόδων-Πολλών Εξόδων (ΠΕΠΕ, ΜΙΜΟ) η ρευστοποιημένη κλίνη αυτοματοποιείται με δύο βάννες ελέγχου ροής στο κύριο (A_1) και δευτερεύον (A_2) ρεύμα αέρα, με σκοπό να ελεγχθούν η ροή μάζας στο ακροφύσιο και η ταχύτητά της αντίστοιχα στο σωλήνα μεταφοράς.

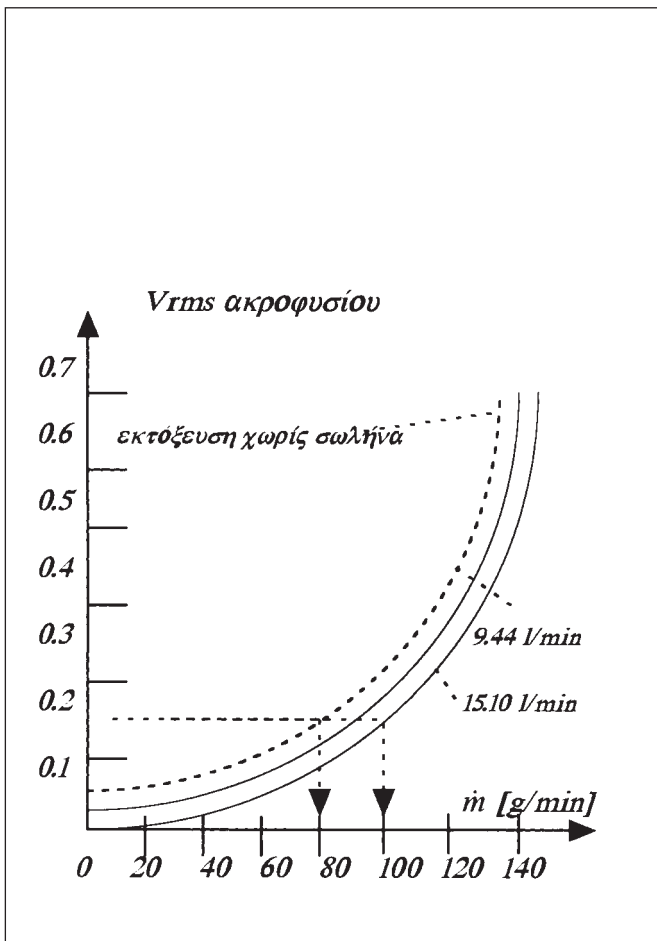
Το διάγραμμα βαθμίδων του σχήματος ελέγχου κλειστού



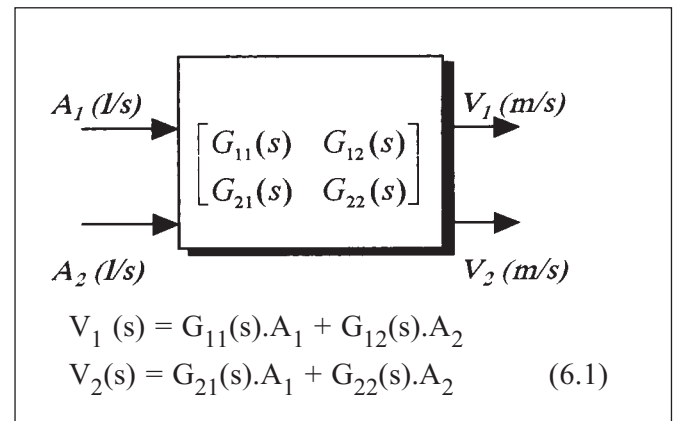
Σχ. 9. Καμπύλες διακρίβωσης ροής μάζας ψεκασμού σκόνης.
Fig. 9. Calibration characteristics of mass-flow.



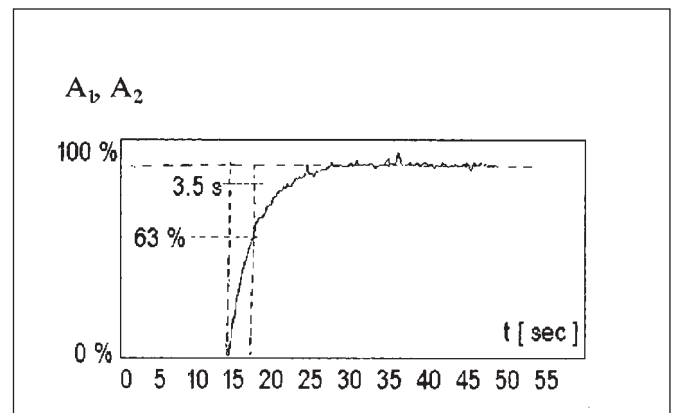
Σχ. 11. Τροφοδότης σκόνης ανάστροφου κώνου.
Fig. 11. Inverted cone powder feeder [12].



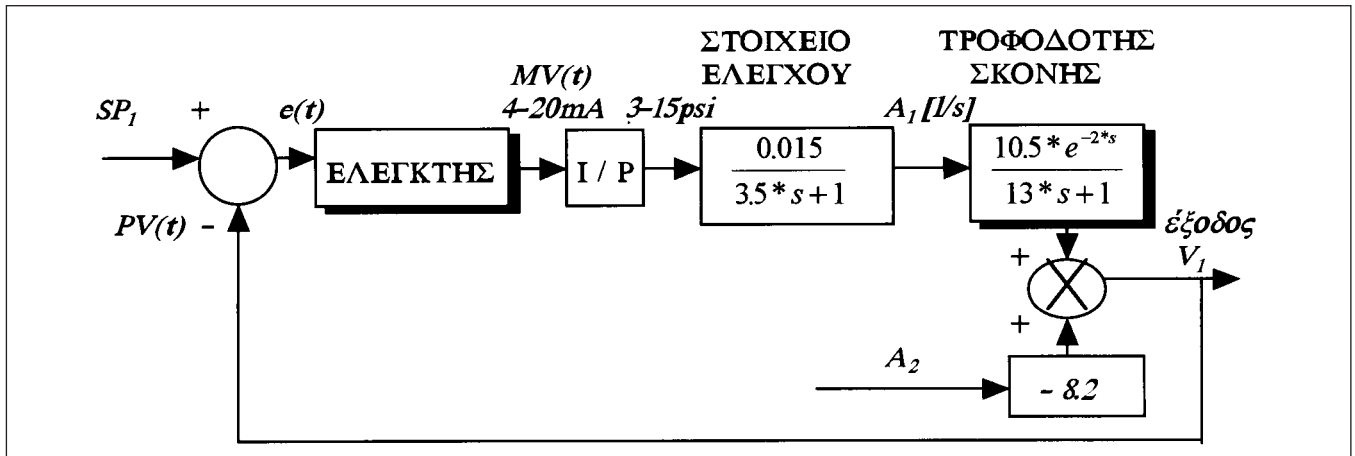
Σχ. 10. Απόκριση αισθητήρα ακροφυσίου ως rms ροομέτρου μάζας.
Fig. 10. Nozzle-sensor response as rms mass flowmeter.



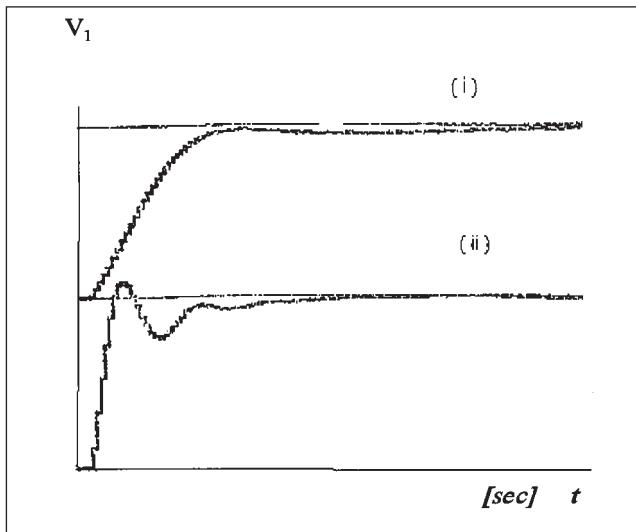
Σχ. 12. Συνάρτηση μεταφοράς συστήματος.
Fig. 12 Open loop system transfer function.



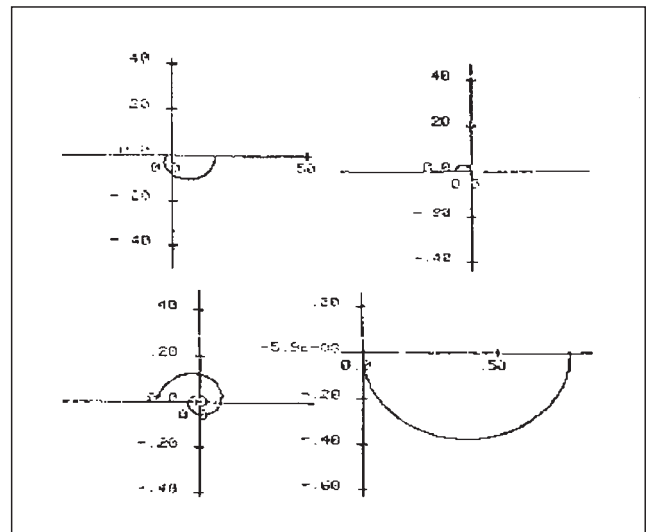
Σχ. 13. Βηματική απόκριση βάννας ελέγχου ροής αέρα.
Fig. 13. Step response of pneumatic valve air flow control.



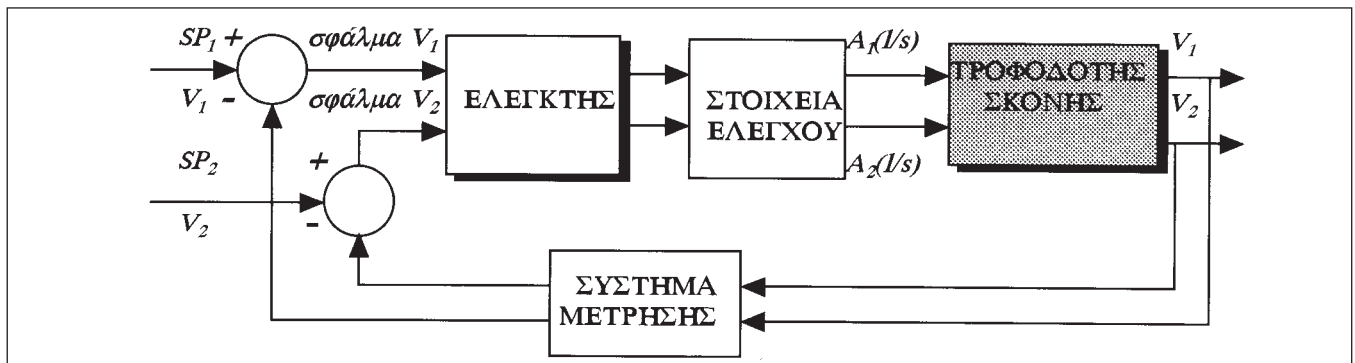
Σχ. 14. MEME Μοντελοποίηση Συστήματος Ελέγχου.
 Fig. 14. SISO Modelling of Control System.



Σχ. 15. PID έλεγχος ενός MEME (SISO) συστήματος ελέγχου κλίνης
 Fig. 15. SISO PID control of fluidized bed.



Σχ. 17. (2x2) διαγράμματα Nyquist ανοικτού βρόχου ΠΕΠΕ σχήματος ελέγχου κλίνης.
 Fig. 17. MIMO open loop Nyquist diagrams of fluidized bed's multivariable control.

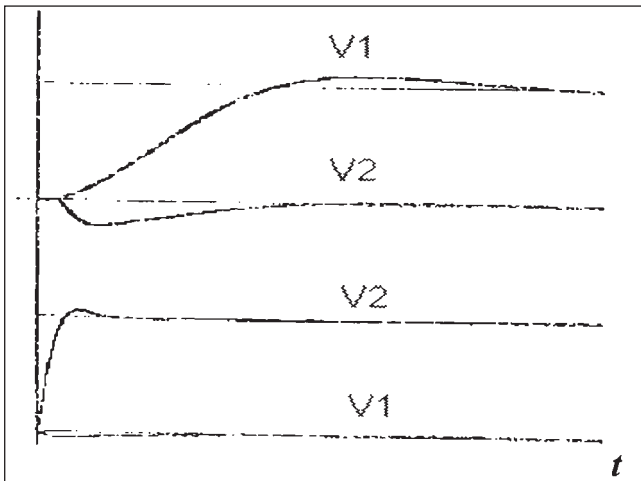


Σχ. 16. Διάγραμμα βαθμίδων ελέγχου κλειστού βρόχου συστήματος κλίνης.
 Fig. 16. Block diagram of fluidized bed's closed loop control.

βρόχου με δύο εισόδους και δύο εξόδους δίνεται στο σχ. 16. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι το MEME (SISO) σχήμα ελέγχου είναι επαρκές για τις λειτουργικές συνθήκες, αλλά ένα πολυμεταβλητό σχήμα δίνει καλύτερη ρύθμιση των V_1, V_2 . Τέτοιο ΠΕΠΕ (MIMO) σχήμα ελέγχου ικανοποιεί τη γενικότερη περίπτωση της ροής ποικίλων σωματιδίων σκόνης σε διαφορετικές διαμέτρους σωλήνων και συνθήκες κλίνης και μεταφοράς.

Χρησιμοποιήθηκαν [25] τεχνικές σχεδίασης και αποτελέσματα πολυμεταβλητού ελέγχου και προσομοίωσης με υπολογιστή. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, σχέση [5.2], έχει ένα σημαντικό όρο $G_{11}(s)$ έντονα δεύτερης τάξης, μια καθαρή χρονική καθυστέρηση $G_{21}(s)$, ενώ οι $G_{12}(s)$ και $G_{22}(s)$ παρουσιάζουν συμπεριφορά πρώτης τάξης. Ο όρος σημαντικής χρονικής καθυστέρησης $G_{21}(s)$ ταλαντώνει περί την αρχή για αύξουσα συχνότητα. Προσομοίωση με το πακέτο λογισμικού του UMIST (25), CAIAD (Computer-Aided Control Design) σε PDP-11 δίνει τα πολυμεταβλητά (2x2) διαγράμματα Nyquist του συνδυασμού βαννών και διεργασίας για ανοικτό βρόχο (σχ. 17). Η σύζευξη εισόδων-εξόδων είναι ασθενής μεταξύ A_1/V_2 και A_2/V_1 και η σχεδίαση του ελεγκτή δεν απαιτεί προαντισταθμιστή (pre-compensator).

Για να έχουμε ικανοποιητική στατική ακρίβεια (steady



Σχ. 18. Απόκριση κλειστού βρόχου σε ΠΕΠΕ έλεγχο κλίνης.
Fig. 18. Closed-loop response in MIMO fluidized bed control scheme.

state accuracy), ένας κλειστού βρόχου ελεγκτής τύπου PI εφαρμόζεται και τα αποτελέσματα δίνονται στο σχ. 18, ενώ το τελικά επιλεγθέν ΠΕΠΕ σχήμα ελέγχου δίνεται στο σχ. 19. Η απόκριση για ΠΕΠΕ PI ελεγκτή δείχνει περαιτέρω βελτίωση σε σχέση με τη MEME απόκριση.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

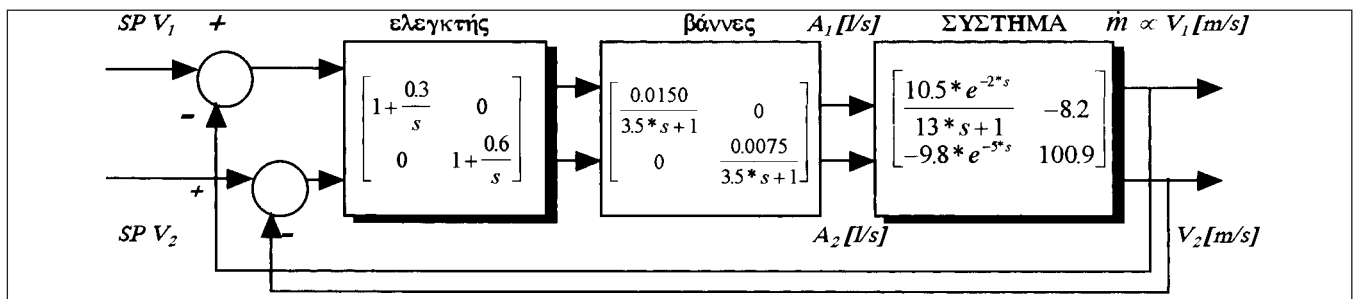
Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν:

1. πρωτότυποι μετρητές διαφασικής ροής και ροής μάζας σκόνης σε ρευστοποιημένη κλίνη,
2. παράμετροι λειτουργίας της κλίνης,
3. πολυμεταβλητοί ελεγκτές για την ΠΕΠΕ (και MEME) περίπτωση για σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης κατάλληλο για τροφοδοσία σκόνης,
4. η ευστάθεια των ελεγκτών σε ανοικτό /κλειστό βρόχο.

Οι ενδογενείς πολυπλοκότητες της διαφασικής ροής, αποτελούμενες από πυκνές και αραιές συγκεντρώσεις σκόνης, καθιστούν τις παραμέτρους του μοντέλου, άρα και το βαθμό ευστάθειας του ελέγχου εξαρτώμενους από την ομογενοποίηση του ρευστού, τη σχεδίαση και την κατασκευή της κλίνης. Προτείνεται περαιτέρω έρευνα στην οικονομία κατανάλωσης ισχύος πεπιεσμένου αέρα στην κλίνη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anderson B, N.A, **Mixture & Mass Flow Measurement of Powdered Granular Materials**, M.Sc Thesis, Bradford University, 1980.
2. Atkins, F. J, The Factors affecting the Plasma Spraying Efficiency of Powders, **2nd Metal Spraying & Plastic Coating Conference**, London, Institute of Welding, 1977.
3. Baum M, Cole B, An Investigation of Electrostatic Charging Effects in High Speed Gas-Solid Pipe Flows, **Proc. Am. Inst. Mech. Eng.**, 1969.
4. Beck, M., Wainwright, Current Industrial Methods of Solids Flow Detection, Measurement, **Int. Conf. of Powder Tech.**, Chicago, 1970.
5. Beck, M. S, Selected Papers, M.Sc. in **Control Eng.**, Bradford, 1980.
6. Beck, M, Hobson, J, **Electrostatic charge Measurement of Particulate Materials being Transported at High Velocities-Explosion Risk Meter for Pneumatic Conveyors**, Bradford, 1980.
7. Beck, M, **Powder & Fluid Flow Measurement using Correlation Techniques**, Ph.D. Thesis, University of Bradford, 1969.



Σχ. 19. Διάγραμμα βαθμίδων ΠΕΠΕ σχήματος ελέγχου κλίνης κλειστού βρόχου.
Fig. 19. Block diagram of MIMO fluidized bed closed loop control scheme.

8. Bendat, J.S, Piersol A.C, **Measurement & Analysis of Random Data**, John Wiley & Sons, 1966.
9. Bright A.W, **Electrostatics**, Eng. Design Guides, Oxford Press, 1980.
10. Center for Professional Advancement, **Baghouse Dust Collecti-on Systems**, Lecture Notes, Amsterdam 1995.
11. Davidson, F, et al, **Fluidised Particles**, Cambridge Univ. Press, 1968.
12. Donaldson Co, **Standard Operating Procedure of Donaldson Dust-Feeder**, Research Division, 1990.
13. Geldhart, D, Studies on the Intermittent Discharge of Coarse Solids from Fluidised Beds, **Trans. Chem. Eng.**, 1983.
14. Harber, W. R, How do Solid Surfaces become Charged, 1967, **Static Electrification Conf. Inst. of Physics**, Ser. 4.
15. Institute Metal Sprayers, **Directory Metal Sprayers**, Walsall, 1990.
16. King, P. W, Mass Flow Measurement of Conveyed Solids, by Monitoring of Intrinsic Electrostatic Noise Levels, **2nd Int. Conf. on Pneumatic Transport of Solids**, Sept. 1973, BHRA.
17. Klinzing, G.E, **Gas-Solid Transport**, McGraw-Hill, 1981.
18. Kunii D, **Fluidization Engineering**, Robert Krieger Pub. Co, 1987.
19. Kwauk, M, **Fluidization**, Science Press-Ellis Horwood, 1992.
20. Moore A, **Electrostatics & Applications**, Wiley Interscience, 1977.
21. Ong, K., Beck, M, **Volume Flow Measurement of Liquid Slurries by Cross-Correlation of Natural Signals**, Bradford, 1978.
22. Shackelton M. E, **Electrodynamic Transducer for Gas-Solids Flow Measurement**, Master Dissertation, 1982, Bradford University.
23. Smart, R. F, Catherall, J. A, **Plasma Spraying**, 1974, Mills & Boon.
24. Stock, D. E, Measurements in Polyphase Flows, **American Soc. of Mech. Eng.**, California, Dec.10-15, 1978.
25. Thiga, R.S.A, Cough, N.E, **CAIAD Users' Guide**, Report R128, June '74, 11th Revision, UMIST, October 1994.
26. Ventzas, D.E, **A Microcomputer-based Cross-Correlator for Fluid Flow Measurement and Control**, MSc Dissertation, P/G School of Control Eng., University of Bradford, October 1980.
27. Ventzas, D.E, An Instrumentation Industrial Correlator, **IATED International Symp. of Applied Informatics**, Innsbruck, Austria, 1986.
28. Βέντζας Δ.Ε, Σ.Α.Ε. **Θεωρία-Τεχνολογία, Τόμοι I-IV**, ΤΕΙ Λαμίας, Τμήμα Ηλεκτρονικής,, 1997.
29. Ventzas, D.E, Mathematical Modeling in Powder Transportation, **Modeling, Simulation & Control**, B, AMSE, Vol. 7, No 1, 1986, pp. 1-11.

Α. Βέντζας,

Δρ. Μηχανολόγος-Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Καθηγητής ΣΑΕ & Μετρήσεων, ΤΕΙ Λαμίας, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Λαμία 351 00.
Αναλήψεως 124, Βόλος 382 21, fax: (0231) 33945, email: dventzas@jason.uthes.ariadne-t.gr

Extended summary

Modeling - Design of Mass Flowmeter and Multivariable (MIMO) Controller of Multi-Phase Flows in Dense Powder Fluidised Beds

D.E. VENTZAS

Professor of TEI Lamia

Abstract

A powder feeder consisting of a fluidized bed rig and transfer nozzle was modeled. A multiphase mass flowmeter was designed and calibrated. The system's transfer function and the MIMO closed loop control response comprised the multivariable controller model. Theoretical modeling was simulated by a computer and experimental rig results were obtained to describe the partial and the overall fluidized bed response.

INTRODUCTION

Fluidized beds are used for transport, packaging, surface treatment and hardening, cooling or heating in the pharmaceutical and aromatics, glass, cement, alumina industries and coal dust burners. This paper studies by simulation and experimental techniques, the following:

- a. powder feed and transport
- b. novel flow and mass flowmeter
- c. sensor, process and actuator modeling
- d. SISO / MIMO flow and mass control
- e. decoupling and states interactions.

A fluidized bed was designed (see fig. 1) and its specifications are given in Table 1. Fluidized bed and nozzle of the inverted cone type, (see fig. 11), characteristics are presented (see fig. 2 and fig. 3).

The main (input/output) states are:

- h = fluidized bed level
- V_1 = nozzle powder velocity
- V_2 = powder velocity at transport pipe
- A_1 = air flow rate at the agitation grid
- A_2 = air flow rate to transport solids
- ΔP_1 = filter-grid pressure drop
- ΔP_2 = nozzle pressure drop
- W = bed loading (total powder mass in bed).

To sustain flow through the nozzle, we should have $\Delta P_1 > \Delta P_2$. The mechanical and aerodynamic design or selection of nozzle is critical.

A cross-correlation measuring scheme (fig. 4) and its transfer function (fig. 5) with electrostatic flow noise sensors (fig. 6) are presented. Rms values of electrostatic sensors flow noise are related to mass flow rate (fig. 7). An increase in mass flow rate increases the rms level of the electrostatic flow signal. The mass flowmeter was calibrated by projectile (free

stream, where the velocity is given as $\sqrt{g \cdot x^2 / 2 \cdot y}$ or absolute weighing methods.

An 8-bit microcomputer performed flow velocity, mass flow and sensor signal processing. Sensor sensitivity and sensing area is related to sensor geometry (fig. 8), while sensor-nozzle calibrating curves are experimentally derived (fig. 9, 10).

The paper presents the methodology for designing two-phase fluid flowmeters and true mass flowmeters, to study further the fluidized bed operation and to design SISO and MIMO mass flow controllers and study their stability.

Flow model inaccuracies, parameter uncertainties and external disturbances lead to the need for better understanding of control and fluidized bed mechanical design and implementation (i.e. nozzle, fluidized bed, transfer pipe-lines, etc). Modern instrumentation and control needs simple and robust sensors for product quality and safety. The electrostatic flow noise sensors give sufficient and correlated flow and mass flow information for both accurate and repeatable flow velocity and mass flow measurement for computer control. Powder that is recycled, tends to be excessively charged, driving the sensing amplifiers to saturation, flow information reduction and poorer repeatability. The sensing mechanism depends on:

- powder particle size and shape
- powder nature and state
- internal surface of pipe walls.

Different flow regimes, operating conditions, bed humidity and temperature were studied. It is concluded that the sensing area of the electrostatic cross-correlation flow sensor was inversely proportional to the flow signal spectrum and proportional to the rms level of the flow signal, while the rms level of the flow signal depends on the powder mass flow rate and the electrostatic flow signal spectrum is independent of the mass flow for constant powder speed and sensor geometry.

The generalized (2x2) transfer function of the open loop system is given in fig. 12, i.e. the dust feeder is a 2 input / 2 output device, with state variables A_1 and A_2 .

By step response tests on the actuators (see fig. 13) and mainly on the process and powder feeder, we identified the system as a multivariable one. The open loop step response for dust feeder gave:

$$G_{11}(s) = \frac{10.5 * e^{-2*s}}{13 * s + 1} \quad G_{21}(s) = 9.8 * e^{-5*s}$$

$$G_{12}(s) = 8.2 \quad m / l \quad G_{22}(s) = 100.9 \quad m / l$$

The fluidized bed process model consists of two first order terms, one second order term and a pure time delay term.

The transfer function of the powder feeding nozzle is:

$$G_p(s) = \frac{K_p \cdot e^{-T_d * s}}{\tau * s + 1}$$

with K_p the process gain, T_d the delay time and τ the dominant time constant.

We attempted SISO fluidized bed process PID control (see fig. 14, 15) and MIMO fluidized bed process PID control (see fig. 16, 18 and 19).

PID tuning optimizes the performance for minimal time response, under slight acceptable overshooting. Step response tests of V_1 and/or A_2 assist the controller tuning process in the closed loop.

In SISO control an electrostatic flow noise cross-correlation is used (and just one controller), while in MIMO control two electrostatic flow noise cross-correlation (and two controllers) are used. A two dimensional array of electrostatic flow noise cross-correlation sensors monitor two dimensional flow profiles, with special cooling applications in the glass industry.

In fig. 17 the process multivariable (2 x2) Nyquist diagram is given with obvious decoupling conclusions on transport air and transported mass interactions.

Multivariable (MIMO) control achieves more effective fluidized bed control, and satisfies even rigs with different (or a mixture of) powders, varying environmental conditions, and transport pipe sizes for circulation. In industrial control environments, variations in the system parameters result in sensitivity of control schemes. Future studies of the fluid bed control scheme robustness and the operational power dissipation need to be made.

D.E. Ventzas,

Professor of Automation and Measurements, TEI Lamia, Dpt. of Electronics, fax: (0030) 231 33945
Analipseos 124, Volos 382 21, GREECE, email : dventzas@jason.uthes.ariadne-t.gr