



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**MSc in Oil and Gas Process Systems Engineering**

**Dissertation**

<b>Τίτλος Εργασίας</b>	Αξιολόγηση και βελτιστοποίηση PID ελεγκτών με μεθόδους μηχανικής μάθησης
<b>Όνοματεπώνυμο Φοιτητή</b>	Πατεράκης Α. Εμμανουήλ
<b>Αριθμός Φοιτητή</b>	20190013
<b>Επιβλέπων</b>	Μπόνης Ιωάννης, Δρ. Χημικός Μηχανικός
<b>Ημερομηνία</b>	Οκτώβριος, 2021

## Επιτροπή αξιολόγησης και βαθμολόγησης διπλωματικής

**Δρ Ιωάννης Μπόνης, Χημικός Μηχανικός**

(Όνομα)

(Υπογραφή)

**Δρ Αιμιλία Κονδύλη, Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

(Όνομα)

(Υπογραφή)

**Δρ Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, Καθηγητής, Πρόεδρος Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών**

(Όνομα)

(Υπογραφή)

## Δήλωση συγγραφής

Εγώ, ο Πατεράκης Εμμανουήλ επιβεβαιώνω ότι η εργασία με τίτλο Αξιολόγηση και βελτιστοποίηση PID ελεγκτών με μεθόδους μηχανικής μάθησης είναι δική μου δουλειά. Δεν έχω αντιγράψει κατά λέξη άλλο υλικό, εκτός από ρητά εισαγωγικά, και έχω προσδιορίσει με σαφήνεια τις πηγές του υλικού.

Υπογραφή

Αίγαλεω, Οκτώβριος 2021



Πατεράκης Εμμανουήλ

## Δήλωση συγγραφέα μεταπτυχιακής εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Πατεράκης Εμμανουήλ του Αντωνίου, με αριθμό μητρώου 20190013 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Πατεράκης Εμμανουήλ



## Περίληψη

Ένα από τα πλέον στοιχειώδη εξαρτήματα στην επιστήμη του αυτομάτου ελέγχου είναι ο PID ελεγκτής. Πρόκειται για έναν γενικό μηχανισμό βρόχου ανάδρασης που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Ο ελεγκτής προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα προσαρμόζοντας τις εισόδους της διαδικασίας ελέγχου. Ο PID ελεγκτής ακολουθεί έναν αλγόριθμο που αφορά τρεις ξεχωριστές παραμέτρους και γι' αυτό πολλές φορές καλείται ελεγκτής τριών όρων: αναλογικό (P), ολοκληρωτικό (I) και διαφορικό (D).

Η εργασία αυτή ασχολείται με την αξιολόγηση των ελεγκτών, χρησιμοποιώντας δεδομένα εισόδου/εξόδου. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται από κάποια βιομηχανική διεργασία, στα πλαίσια της εργασίας αυτής όμως προέρχονται από σύστημα που δημιουργήθηκε από εμάς σε περιβάλλον Matlab. Παρόλο που οι PID ελεγκτές αποτελούν ένα πολύ διαδεδομένο είδος ελεγκτών με ευρεία χρήση σε βιομηχανικές, και όχι μόνο, εφαρμογές η ρύθμισή τους (tuning) συνήθως γίνεται εμπειρικά, απαιτεί εμπειρία από το χειριστή και συνήθως αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δημιουργήθηκε ένας κώδικας ο οποίος θα αξιολογεί τον ελεγκτή χρησιμοποιώντας δεδομένα εισόδου/εξόδου και θα καθοδηγεί τον μηχανικό στην ρύθμισή του ελεγκτή αν αυτό απαιτείται. Η καθοδήγηση αυτή γίνεται με τον προσδιορισμό του όρου του PID που δεν είναι βέλτιστος, καθώς και με την κατεύθυνση της προτεινόμενης κίνησης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό χρησιμοποιήσαμε μηχανική μάθηση, ορίζοντας ένα πρόβλημα ταξινόμησης (classification) και διάφορες τεχνικές πάνω σ' αυτή την εφαρμογή πριν καταλήξουμε στην καλύτερη τεχνική για την εργασία αυτή.

Η εργασία αυτή έχει δύο μέρη: τον κλασικό έλεγχο και τη μηχανική μάθηση. Βάση αποτελεί το MATLAB, το οποίο χρησιμοποιείται αφενός για την προσομοίωση της βιομηχανικής διεργασίας με τον PID, αφετέρου για την κατασκευή του πλαισίου απόκτησης δεδομένων (data acquisition), χρήση τους για τον υπολογισμό κάποιων βασικών δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators, KPI) και την εξαγωγή ενός μοντέλου προσέγγισης της διεργασίας με τεχνικές αναγνώρισης μοντέλου (system

identification). Το προσεγγιστικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του PID ελεγκτή. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, η προσέγγιση των αρχικών διεργασιών με προσεγγιστικά μοντέλα ήταν πολύ καλή, με ακρίβεια >90% σε όλες τις περιπτώσεις.

Χρησιμοποιώντας μια βιβλιοθήκη από δεδομένα εισόδου/εξόδου και τους αντίστοιχους KPIs, ορίστηκε ένα πρόβλημα ταξινόμησης (classification), το οποίο λύθηκε με τεχνικές Μηχανικής Μάθησης. Σκοπός είναι να κατασκευαστεί ένα αυτόνομο σύστημα μηχανικής μάθησης, που λαμβάνει δεδομένα εισόδου/εξόδου χωρίς να γνωρίζει το σύστημα από το οποίο αυτά προέρχονται και να προσδιορίζει εάν ο PID ελεγκτής λειτουργεί καλά, ή χρειάζεται επιτάχυνση/επιβράδυνση κάποιος ή κάποιοι από τους όρους τους. Το σύστημα αυτό μπορεί να αναπτυχθεί αυτόνομα σε κάποια βιομηχανική διεργασία και να επιτηρεί συνεχώς τους PID ελεγκτές προτείνοντας αλλαγές όταν χρειάζεται. Από τις τεχνικές που εξετάστηκαν, τα καλύτερα αποτελέσματα έδωσε το Bootstrap Aggregation (Bagging) of Classification Trees με ακρίβεια 99.7%.

Οι βιομηχανικές μονάδες έχουν υπερβολικά πολλούς PID ελεγκτές για να μπορεί να γίνει η επιτήρησή τους από άνθρωπο αποτελεσματικά. Είναι αναγκαίο να εγκαθίστανται συστήματα επιτήρησης που να κατευθύνουν τις προσπάθειες του μηχανικού στις προβληματικές καταστάσεις (bad actors). Εκτός της επισήμανσης των καταστάσεων αυτών, είναι καλό τα συστήματα αυτά να δίνουν και μια πρώτη εικόνα του προβλήματος, εν προκειμένω του συγκεκριμένου όρου του PID που δεν είναι βέλτιστος. Ο μηχανικός δεν υλοποιεί άκριτα τις προτάσεις ενός τέτοιου συστήματος, αλλά τις συνεξετάζει σε συνδυασμό με τη δυναμική της μονάδας και τις γνώσεις/πληροφορίες του για την τρέχουσα λειτουργία. Για το λόγο αυτό, μια ποιοτική διάγνωση από κάποιο σύστημα μηχανικής μάθησης είναι πιο σημαντική από τον αριθμητικό προσδιορισμό των βέλτιστων PID παραμέτρων για την περίοδο αναφοράς. Οι τιμές αυτές των παραμέτρων δεν είναι σταθερές, καθώς οι αλλαγές στην τροφοδοσία, στις περιβαλλοντικές συνθήκες και σε περιορισμούς του εξοπλισμού οδηγούν τα βιομηχανικά συστήματα σε διαφορετικά λειτουργικά παράθυρα (operating windows).

## Λέξεις - Κλειδιά

Ελεκτής PID, τεχνικές μηχανικής μάθησης, βασικοί δείκτες απόδοσης, αξιολόγηση PID ελεγκτών, βελτιστοποίηση παραμέτρων PID ελεγκτών, προβλήματα κακής ρύθμισης.



## Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της εργασίας με την οποία ολοκληρώνεται ένας κύκλος σπουδών στο ΠΑ.Δ.Α, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μπόνη Ιωάννη για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος αλλά και την συνεχή υποστήριξή του καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους ανθρώπους που αποτελούν φάρους στην πορεία της ζωής μου. Την σύζυγό μου Έφη, που είναι πάντα δίπλα μου και δεν σταμάτησε ποτέ να πιστεύει σε μένα, τον αδερφό μου Αριστείδη και τους γονείς μου για όλες τις θυσίες που έκαναν για να φτάσω ως εδώ.

## Πίνακας περιεχομένων

Επιτροπή αξιολόγησης και βαθμολόγησης διπλωματικής .....	2
Δήλωση συγγραφής.....	3
Δήλωση συγγραφέα μεταπτυχιακής εργασίας.....	4
Περίληψη.....	6
Λέξεις – Κλειδιά.....	8
Ευχαριστίες.....	9
Λίστα σχημάτων.....	12
Λίστα πινάκων.....	13
Γλωσσάριο ορών και ακρωνυμίων .....	13
1 PID Ελεγκτές.....	14
1.1 Εισαγωγή στους PID ελεγκτές .....	14
1.1.1 ιστορική αναδρομή.....	15
1.1.2 Χρησιμότητα PID ελεγκτών.....	18
1.2 Αρχές Λειτουργίας .....	19
1.2.1 Η Ανάδραση .....	20
1.2.2 Αναλογικός Όρος .....	21
1.2.3 Ολοκληρωτικός Όρος.....	22
1.2.4 Διαφορικός Όρος.....	23
1.3 Βελτιστοποίηση παραμέτρων του PID ελεγκτή .....	25
1.3.1 Χειροκίνητη ρύθμιση (tuning).....	26
1.3.2 Μέθοδος Ziegler – Nichols.....	27
1.3.3 Μέθοδος Cohen – Coon .....	27
1.3.4 Μέθοδος Lamda .....	28
1.4 Περιορισμοί και προβλήματα κακής ρύθμισης (tuning) .....	28
1.4.1 Γραμμικότητα.....	29
1.4.2 Θόρυβος στον Διαφορικό Όρο .....	30
1.4.3 Ταλαντώσεις.....	31
1.4.4 Χρόνος Ανύψωσης (time constant) και Υπερακόντιση (Overshoot) .....	32
1.4.5 Ευρωστία .....	33
1.4.6 Θόρυβος.....	34
1.5 Ο Αυτο-Ρυθμιζόμενος PID Ελεγκτής.....	34
2 Αξιολόγηση της απόδοσης των PID.....	37
2.1 KPI.....	37
2.1.1 Ταλαντώσεις.....	38

2.1.2 Κορεσμός (Saturation).....	39
2.1.3 Δείκτης κίνησης βαλβίδων (Valve travel index) .....	40
2.2 Παραδείγματα απόκρισης.....	40
2.3 Μοντελοποίηση της διεργασίας βάσει προσεγγιστικού μοντέλου .....	45
2.3.1 Σύστημα και κώδικας που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.....	45
2.3.2 Αποτελέσματα .....	47
2.4 Ευρωστία, ανάλυση ευαισθησίας (πρακτικά παραδείγματα) .....	50
3 Μηχανική Μάθηση.....	53
3.1 Εισαγωγή .....	53
3.1.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης.....	55
3.1.3 Βασικές εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης .....	57
3.1.4 Πίνακας σύγχυσης.....	58
3.1.5 Καμπύλη χαρακτηριστικών λειτουργίας δέκτη .....	59
3.2 Πρόβλημα προς επίλυση της εργασίας.....	60
3.3 Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία .....	60
3.3.1 Δένδρα απόφασης (decision Trees).....	61
3.3.2 Μάθηση κατά Bayes (Naïve Bayes).....	63
3.3.3 Μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης.....	66
3.3.4 Συλλογική μάθηση (Ensemble Learning).....	68
3.3.5 Κ κοντινότεροι γείτονες .....	70
3.4 Αποτελέσματα Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης .....	72
4 Συμπέρασμα - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	73
5 Βιβλιογραφία.....	75
Παράρτημα.....	78
A.1 Matlab κώδικας αναφερόμενος στα κεφάλαια 3 και 4 .....	78

## Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα βαθμίδων μιας διεργασίας με αρνητική ανάδραση (Åström, Hägglund, 1995).....	21
Σχήμα 2: Επίδραση του αναλογικού όρου σε μια διεργασία.....	22
Σχήμα 3: Εφαρμογή του ολοκληρωτικού όρου στην προηγούμενη απόκριση κρατώντας το αναλογικό κέρδος σταθερό.....	23
Σχήμα 4: Εφαρμογή του όρου διαφορικού στην προηγούμενη απόκριση κρατώντας τα άλλα κέρδη σταθερά.....	25
Σχήμα 5: Σύστημα χωρίς PID.....	41
Σχήμα 6: Βηματική απόκριση .....	41
Σχήμα 7: Σύστημα με αναλογικό ελεγκτή.....	42
Σχήμα 8: Βηματική απόκριση με αναλογικό ελεγκτή. ....	42
Σχήμα 9: Βηματική απόκριση με αναλογικό-διαφορικό ελεγκτή. ....	43
Σχήμα 10: Βηματική απόκριση με αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή. ....	44
Σχήμα 11: Βηματική απόκριση με αναλογικό-διαφορικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή.....	45
Σχήμα 12: Σύστημα με PID ελεγκτή προσεγγιστικού μοντέλου.....	45
Σχήμα 13: απόκριση του συστήματος με τον PI ελεγκτή να έχει $K_p=50$ και $K_i=10$ . ....	48
Σχήμα 14: Απόκριση του συστήματος με τον PI ελεγκτή να παίρνει τις τιμές που βρήκαμε με το ρύθμιση δηλαδή $K_p=1.45$ και $K_i=0,05$ .....	49
Σχήμα 15: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς $1150s + 1$ . ....	51
Σχήμα 16: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς $1150s + 10$ . ....	51
Σχήμα 17: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς $1150s^2 + 1s + 1$ .....	52
Σχήμα 18: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς $1150s^2 + 1s + 10$ .....	52
Σχήμα 19: Παράδειγμα καμπύλης χαρακτηριστικών λειτουργίας δέκτη. ....	60
Σχήμα 20: Καμπύλη ROC. ....	62
Σχήμα 21: Καμπύλη ROC. ....	63
Σχήμα 22: Καμπύλη ROC. ....	64
Σχήμα 23: Καμπύλη ROC Kernel naïve bayes features 3/7 accuracy 81,8%. ....	65
Σχήμα 24: Καμπύλη ROC Kernel naïve bayes features 3/7 accuracy 91,7%. ....	66
Σχήμα 25: Καμπύλη ROC. ....	67
Σχήμα 26: Καμπύλη ROC Quadratic SVM features3/7 accuracy 99.3%.....	68
Σχήμα 27: Καμπύλη ROC. ....	69
Σχήμα 28: Καμπύλη ROC Ensemble bagged trees features 3/7 accuracy 99.8%. ....	70
Σχήμα 29: Καμπύλη ROC. ....	71
Σχήμα 30: Καμπύλη ROC coarse KNN features 3/7 accuracy 85.9%. ....	72

## Λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Επίδραση στο σύστημα, της αύξησης κάθε παραμέτρου ανεξάρτητα από τις άλλες (Åström, Hägglund, 1995).....	27
Πίνακας 2: KPIs του παραπάνω συστήματος.....	48
Πίνακας 3: KPIs του παραπάνω συστήματος.....	49
Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας επιβλεπόμενης, μη επιβλεπόμενης και ενισχυτικής μάθησης (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek 2010).....	57
Πίνακας 5: Παράδειγμα πίνακα σύγχυσης. ....	59
Πίνακας 6: classification matrix Fine Tree features 7/7 accuracy 99.6%. ....	62
Πίνακας 7: Classification matrix Fine Tree features 3/7 accuracy 99.6%. ....	63
Πίνακας 8: classification matrix Kernel naïve bayes features7/7 accuracy 88.5%. ....	65
Πίνακας 9: classification matrix Quadratic SVM features7/7 accuracy 99.4%. ....	67
Πίνακας 10: Classification matrix Ensemble bagged trees features 7/7 accuracy 99.7%. ....	69
Πίνακας 11: Classification matrix coarse KNN features 7/7 accuracy 86.8%. ....	71

## Γλωσσάριο ορών και ακρωνυμίων

TF	Transfer Function
KPI	Key Performance Indicator
SP	Set Point
PV	Process Value
MV	Manipulated Variable
P	Proportional
I	Integral
D	Derivative
Kp	Proportional Gain
Ki	Integral Gain
Kd	Derivative Gain

## 1 PID Ελεγκτές

### 1.1 Εισαγωγή στους PID ελεγκτές

Ένας αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός ελεγκτής (proportional-Integral – derivative controller) ή όπως είναι πιο γνωστός PID controller, είναι ένας μηχανισμός ανάδρασης (feedback) βρόχου ελέγχου (control loop) που χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου καθώς και σε μια ποικιλία άλλων εφαρμογών που απαιτούν συνεχή έλεγχο (Tim Wescott 2000). Στο πλαίσιο της βιομηχανίας διεργασιών, το PID παραμένει η κυρίαρχη τεχνική για τον έλεγχο ανατροφοδότησης. Έτσι, υπάρχει συνεχές ενδιαφέρον από την ακαδημαϊκή κοινότητα και τους κατασκευαστές συστημάτων ελέγχου σε τροποποιήσεις PID που μπορούν να βελτιώσουν τις επιδόσεις ελέγχου και σε εργαλεία που διευκολύνουν τον έλεγχο και την παρακολούθηση των επιδόσεών του (Åström, Hägglund, 2006).

Η διαδικασία λειτουργίας είναι κοινή για όλους τους ελεγκτές αυτού του είδους. Ένας PID ελεγκτής υπολογίζει συνεχώς μια τιμή σφάλματος  $e(t)$  ως διαφορά μεταξύ μιας επιθυμητής τιμής ρύθμισης (setpoint ή SP) και μεταξύ μιας μεταβλητής της διαδικασίας υπό έλεγχο (process value ή PV) και εφαρμόζει μια διόρθωση βασισμένη στον αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό όρο του (P, I, D αντίστοιχα) οι οποίοι δίνουν και στον ελεγκτή το όνομά του (Åström, Hägglund, 1995).

Η αυτοματοποίηση της παραγωγής αποτελεί σήμερα την σπουδαιότερη μέθοδο με την βοήθεια της οποίας οι βιομηχανικές επιχειρήσεις βελτιώνουν την παραγωγικότητα τους, στα πλαίσια ενός εντεινόμενου διεθνούς ανταγωνισμού. Παράλληλα οι βιομηχανικές επιχειρήσεις ενδιαφέρονται, εξίσου με την μείωση του κόστους για την διεύρυνση της ευελιξίας της παραγωγής με σκοπό την ταχύτερη και οικονομικότερη παραγωγή εναλλακτικών τύπων προϊόντων (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Η ευελιξία αυτή επιβάλλεται λόγω του εντεινόμενου ανταγωνισμού και των συνεχώς μεταβαλλόμενων απαιτήσεων της αγοράς για νέου είδους προϊόντα ή προδιαγραφές. Σήμερα η αποτελεσματική διαχείριση των βιομηχανικών συστημάτων πληροφορικής καθώς και η εισαγωγή εξελιγμένων συστημάτων αυτοματοποίησης, αποτελούν στρατηγικό όπλο πολλών βιομηχανικών επιχειρήσεων για την απόκτηση ενός συγκριτικού πλεονεκτήματος σε μία παγκόσμια οικονομία (Wescott, 2000).

Ένα καθημερινό παράδειγμα είναι ο αυτόματος πιλότος (cruise control) σε ένα αυτοκίνητο, όπου η άνοδος ενός λόφου μειώνει την ταχύτητα εάν εφαρμοζόταν μόνο σταθερή ισχύς κινητήρα. Ο PID ελεγκτής επαναφέρει τη μετρούμενη ταχύτητα στην επιθυμητή ταχύτητα με ελάχιστη καθυστέρηση και υπέρβαση αυξάνοντας την ισχύ του κινητήρα. Η πρώτη θεωρητική ανάλυση και πρακτική εφαρμογή ήταν στον τομέα των αυτόματων συστημάτων διεύθυνσης για πλοία, που αναπτύχθηκαν από τις αρχές της δεκαετίας του 1920 και μετά. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για αυτόματο έλεγχο διεργασιών στη μεταποιητική βιομηχανία, όπου εφαρμόστηκε ευρέως σε πνευματικούς, και μετά ηλεκτρονικούς, ελεγκτές. Σήμερα οι ελεγκτές PID χρησιμοποιούνται καθολικά σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή και βελτιστοποιημένο αυτόματο έλεγχο (Åström, Hägglund, 1995).

### 1.1.1 ιστορική αναδρομή

Ο συνεχής έλεγχος έχει μία από τις πηγές του στον φυγοκεντρικό ρυθμιστή ο οποίος χρησιμοποιεί περιστρεφόμενα βάρη για να ελέγξει μια διαδικασία. Αυτό είχε εφευρεθεί από τον Christian Huygens τον 17ο αιώνα για να ρυθμίσει το χάσμα μεταξύ των μυλόπετρων στους ανεμόμυλους ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής και έτσι να αντισταθμίσει την μεταβλητή ταχύτητα της τροφοδότησης των σιτηρών. Με την εφεύρεση της σταθερής ατμομηχανής υψηλής πίεσης, υπήρχε ανάγκη για αυτόματο έλεγχο ταχύτητας και ο αυτοδιαμορφωμένος ρυθμιστής “κωνικού εκκρεμούς” του James Watt, ένα σύνολο περιστρεφόμενων χαλύβδινων σφαιρών προσαρτημένων σε κάθετο άξονα με βραχίονες σύνδεσης, έγινε πρότυπο της βιομηχανίας. Ωστόσο, ο περιστρεφόμενος έλεγχος ταχύτητας του ρυθμιστή εξακολουθούσε να είναι μεταβλητός υπό συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου, και έτσι το μειονέκτημα του ελέγχου που πλέον είναι γνωστός ως αναλογικός έλεγχος έγινε προφανές. Το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής ταχύτητας και της πραγματικής ταχύτητας αυξανόταν με την αύξηση του φορτίου (Bennett, 1996).

Τον 19ο αιώνα, η θεωρητική βάση για τη λειτουργία των ρυθμιστών περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον James Clerk Maxwell το 1868. Αυτός εξερεύνησε τη μαθηματική βάση για τη σταθερότητα του ελέγχου και προχώρησε σε έναν καλό δρόμο προς μια λύση, αλλά έκανε μια έκκληση σε μαθηματικούς να εξετάσουν το πρόβλημα. Το πρόβλημα εξετάστηκε περαιτέρω από τον Edward Routh το 1874, τον

Charles Sturm και το 1895 από τον Adolf Hurwitz, που όλοι συνέβαλαν στην καθιέρωση κριτηρίων σταθερότητας ελέγχου. Στην πράξη, οι ρυθμιστές ταχύτητας βελτιώθηκαν περαιτέρω, κυρίως από τον αμερικανικό επιστήμονα Willard Gibbs, ο οποίος το 1872 ανέλυσε θεωρητικά τον κωνικό κυβερνήτη εκκρεμούς του Watt. Περίπου εκείνη την εποχή, η εφεύρεση της τορπίλης Whitehead έθεσε ένα πρόβλημα ελέγχου το οποίο απαιτούσε ακριβή έλεγχο του βάθους λειτουργίας (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Η χρήση μόνο ενός αισθητήρα πίεσης βάθους αποδείχθηκε ανεπαρκής και έτσι ένα εκκρεμές που μετρούσε το εμπρόσθιο και οπίσθιο βήμα της τορπίλης συνδυάστηκε με τη μέτρηση βάθους για να γίνει ο έλεγχος εκκρεμούς και υδροστάτη (*pendulum-and-hydrostat control*). Ο έλεγχος πίεσης παρείχε μόνο αναλογικό έλεγχο, ο οποίος, αν το κέρδος ελέγχου ήταν πολύ υψηλό, θα καθιστούσε το σύστημα ασταθές και θα οδηγούσε σε υπερακόντιση, με σημαντική αστάθεια στη διατήρηση βάθους. Το εκκρεμές προσέθεσε αυτό που είναι τώρα γνωστό ως διαφορικός έλεγχος (*derivative control*), το οποίο εξασθένισε τις ταλαντώσεις ανιχνεύοντας τη γωνία κατάδυσης / ανόδου της τορπίλης και επομένως τον ρυθμό μεταβολής του βάθους. Αυτή η εξέλιξη (που ονομάστηκε από το Whitehead ως “*Το Μυστικό*” για να μην δώσει καμιά ένδειξη για τη δράση της) ήταν περίπου το 1868 (Bellman, 2015).

Ένα άλλο πρώιμο παράδειγμα ελεγκτή τύπου PID αναπτύχθηκε από τον Elmer Sperry το 1911 για την πλοήγηση πλοίων, αν και το έργο του ήταν διαισθητικό και όχι μαθηματικό. Η πρώτη θεωρητική ανάλυση και πρακτική εφαρμογή αφορούσε το αυτόματο σύστημα πλοήγησης πλοίων, το οποίο αναπτύχθηκε από τις αρχές της δεκαετίας του 1920 και μετά από τον μηχανικό Nicolas Minorsky. Ο Minorsky ερευνούσε και σχεδίαζε την αυτόματη καθοδήγηση πλοίων για το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ και βάσισε την ανάλυσή του στις παρατηρήσεις ενός πηδαλιούχου. Σημείωσε ότι ο πηδαλιούχος κατεύθυνε το πλοίο με βάση όχι μόνο το τρέχον σφάλμα πορείας, αλλά και το λάθος του παρελθόντος, καθώς και τον τρέχοντα ρυθμό αλλαγής. Αυτό μοντελοποιήθηκε μαθηματικά από τον Minorsky. Ο στόχος του ήταν η σταθερότητα, όχι ο γενικός έλεγχος, ο οποίος απλοποίησε σημαντικά το πρόβλημα. Ενώ ο αναλογικός έλεγχος παρείχε σταθερότητα έναντι μικρών διαταραχών, ήταν ανεπαρκής για να αντιμετωπίσει μια σταθερή διαταραχή (λόγω σφάλματος μόνιμης κατάστασης), η οποία απαιτούσε την προσθήκη του ολοκληρωτικού όρου (Bennett, 1986).



Τέλος, ο διαφορικός όρος προστέθηκε για να βελτιώσει τη σταθερότητα και τον έλεγχο. Διεξήχθησαν δοκιμές στο USS New Mexico, με τον ελεγκτή να ελέγχει τη γωνιακή ταχύτητα (όχι τη γωνία) του πηδαλιού. Ο έλεγχος PI απέδωσε σταθερή στροφή (γωνιακό σφάλμα)  $\pm 2$ . Η προσθήκη του διαφορικού όρου οδήγησε σε σφάλμα εκτροπής  $\pm 1/6$ , καλύτερα από ότι θα μπορούσαν να επιτύχουν οι περισσότεροι πηδαλιούχοι. Το Πολεμικό Ναυτικό τελικά δεν υιοθέτησε το σύστημα, λόγω της αντίστασης του προσωπικού. Παρόμοια εργασία πραγματοποιήθηκε και δημοσιεύθηκε από αρκετούς άλλους τη δεκαετία του 1930 (Bennett, 1996).

### **Βιομηχανικός έλεγχος**

Η ευρεία χρήση των ελεγκτών ανάδρασης δεν κατέστη εφικτή μέχρις ότου αναπτύχθηκαν ενισχυτές υψηλού κέρδους και μεγάλης ζώνης (*wideband high-gain amplifiers*) για να χρησιμοποιηθεί η έννοια της αρνητικής ανάδρασης. Αυτοί είχαν αναπτυχθεί στην ηλεκτρονική τηλεφωνική μηχανική από τον Harold Black στα τέλη της δεκαετίας του 1920, αλλά δεν δημοσιεύθηκαν μέχρι το 1934. Ανεξάρτητα, ο Clesson E Mason της εταιρείας Foxboro, το 1930, εφηύρε έναν ευρείας ζώνης πνευματικό ελεγκτή, συνδυάζοντας τον πνευματικό ενισχυτή με ακροφύσιο και πτερύγιο υψηλού κέρδους, που είχε εφευρεθεί το 1914, με αρνητική ανάδραση από την έξοδο του ελεγκτή. Αυτό αύξησε δραματικά το γραμμικό εύρος λειτουργίας του ακροφυσίου και του ενισχυτή πτερυγίου και ο ολοκληρωμένος έλεγχος μπορούσε επίσης να προστεθεί με τη χρήση μιας βαλβίδας εξαέρωσης ακριβείας και ενός φυσητήρα (Bellman, 2015).

Το αποτέλεσμα ήταν ο ελεγκτής “Stabilog” ο οποίος έδωσε αναλογικές και ολοκληρωμένες λειτουργίες χρησιμοποιώντας ανατροφοδοτούμενους φυσητήρες. Αργότερα ο διαφορικός όρος προστέθηκε από ένα άλλο φυσητήρα και ρυθμιζόμενο στόμιο. Από το 1932 και μετά, η χρήση ευρυζωνικών ελεγκτών αυξήθηκε ραγδαία σε ποικίλες εφαρμογές ελέγχου. Ο πεπιεσμένος αέρας χρησιμοποιήθηκε τόσο για την παραγωγή της εξόδου του ελεγκτή όσο και για την τροφοδοσία της συσκευής διαμόρφωσης της διαδικασίας, όπως μια βαλβίδα ελέγχου που λειτουργεί με διαφράγματα. Ήταν απλές συσκευές χαμηλής συντήρησης που λειτουργούσαν καλά σε σκληρό βιομηχανικό περιβάλλον και δεν παρουσίαζαν κίνδυνο έκρηξης σε επικίνδυνες τοποθεσίες (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Ήταν το βιομηχανικό

πρότυπο για πολλές δεκαετίες μέχρι την εμφάνιση διακριτών ηλεκτρονικών ελεγκτών και κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου. Στη δεκαετία του 1950, όταν οι ηλεκτρονικοί ενισχυτές υψηλού κέρδους έγιναν φτηνοί και αξιόπιστοι, οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές PID έγιναν δημοφιλείς και χρησιμοποιήθηκαν σήματα ρεύματος βρόχου 4-20 mA τα οποία εξομοίωναν το πνευματικό πρότυπο. Ωστόσο, οι ενεργοποιητές πεδίου (field actuators) εξακολουθούν να χρησιμοποιούν ευρέως το πνευματικό πρότυπο λόγω των πλεονεκτημάτων της πνευματικής κινητήριας δύναμης για τις βαλβίδες ελέγχου στα περιβάλλοντα των μονάδων επεξεργασίας (Bellman, 2015).

### 1.1.2 Χρησιμότητα PID ελεγκτών

Ο PID ελεγκτής έχει διάφορα σημαντικά χαρακτηριστικά: παρέχει ανατροφοδότηση ελέγχου, έχει την ικανότητα να εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (steady – state error) μέσω του ολοκληρωτικού του όρου, μπορεί να προβλέπει το μελλοντικό σφάλμα μέσω του διαφορικού του όρου. Οι PID ελεγκτές παρέχουν ικανοποιητικό έλεγχο σε πολλά προβλήματα ελέγχου, ειδικά όταν οι δυναμικές που διέπουν τη διεργασία είναι ήπιες και οι απαιτήσεις ελέγχου μέτριες. Οι ελεγκτές αυτού του είδους έρχονται σε αρκετές διαφορετικές μορφές όπως για παράδειγμα αυτόνομα συστήματα μέσα σε κουτιά για έναν ή περισσότερους βρόχους και παράγονται εκατοντάδες χιλιάδες PID ελεγκτές κάθε χρόνο. Ο PID έλεγχος είναι σημαντικό στοιχείο ενός κατανεμημένου συστήματος ελέγχου. Οι ελεγκτές είναι επίσης ενσωματωμένοι σε πολλά, ειδικού σκοπού, συστήματα ελέγχου. Στον έλεγχο διεργασιών (process control), η συντριπτική πλειοψηφία των βρόχων ελέγχου είναι PID τύπου (οι περισσότεροι βρόχοι είναι στην πραγματικότητα PI ελέγχου) (Douglas, 2014).

Η δημοτικότητα του PID οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ευκολία εφαρμογής και την αποτελεσματικότητά του. Το κίνητρο για τη χρήση του PID προέρχεται από την αποδοτικότητα του κόστους υλοποίησής του: ο ελεγκτής PID σπάνια αποτελεί ένα βέλτιστο ελεγκτή αλλά είναι αρκετά καλός στις περισσότερες περιπτώσεις και έτσι το πρόσθετο κόστος και η πολυπλοκότητα ενός βέλτιστου ελεγκτή δεν αξίζουν την οριακή αύξηση στην απόδοση. Επιπλέον, ο έλεγχος PID δεν απαιτεί τη μοντελοποίηση των υποκείμενων λειτουργιών μιας διαδικασίας. Το μόνο που έχει

σημασία είναι ότι μερικές μετρούμενες μεταβλητές της διαδικασίας να μπορούν να επηρεαστούν έντονα από ορισμένες ελεγχόμενες μεταβλητές. Επίσης ένας PID ελεγκτής μπορεί εύκολα να μεταφερθεί από διεργασία σε διεργασία. Το μόνο που χρειάζεται είναι να προσαρμοστούν τα κέρδη των όρων του και τα όρια της εξόδου του έτσι ώστε να ταιριάζουν στην καινούρια διεργασία. Είναι, συνεπώς, ένα σημαντικό στοιχείο στην εργαλειοθήκη κάθε μηχανικού ελέγχου (Åström, Hägglund, 1995).

Οι PID ελεγκτές έχουν επιβιώσει πολλές αλλαγές στην τεχνολογία πηγαίνοντας από τη χρήση πνευματικών συστημάτων στη χρήση μικροεπεξεργαστών μέσω ηλεκτρονικών σωλήνων, τρανζίστορ, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι μικροεπεξεργαστές είχαν μεγάλη επίδραση στους PID ελεγκτές (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Βασικά όλοι οι PID ελεγκτές σήμερα κατασκευάζονται με τη χρήση μικροεπεξεργαστών. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να συμπεριληφθούν επιπλέον χαρακτηριστικά στους PID ελεγκτές, όπως η αυτόματη ρύθμισή τους που υλοποιείται σε αυτή την εργασία (Douglas, 2014).

## 1.2 Αρχές Λειτουργίας

Ο PID ελεγκτής είναι, κατά πολύ, ο πιο κοινός αλγόριθμος ελέγχου. Οι περισσότεροι βρόχοι ανάδρασης ελέγχονται από αυτόν τον αλγόριθμο ή από διαφοροποιήσεις του. Είναι τα κύρια στοιχεία ελέγχου, τα οποία καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος και συντονίζουν τα διάφορα ενεργειακά συστήματα, ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων ελέγχου, έτσι ώστε να διατηρείται η ελεγχόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Κάθε ελεγκτής έχει σαν στόχο τη συνεχή ταύτιση της πραγματικής τιμής της εξόδου της διαδικασίας με την επιθυμητή τιμή, ανεξαρτήτως των όποιων διαταραχών προκύψουν κατά την διαδικασία (έγκαιρος μηδενισμός σφάλματος). Ο στόχος αυτός είναι δύσκολο εφικτός, αλλά με την ανατροφοδότηση της εξόδου της διαδικασίας στην είσοδο του συστήματος τείνει να επιτευχθεί (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Από τους διάφορους ελεγκτές που διαθέτει σήμερα η παραγωγική διαδικασία, θα ξετασθούν στις επόμενες ενότητες μόνο οι ελεγκτές τριών όρων (Proportional,

Integral, Derivative) και οι συνδυασμοί τους, οι οποίοι είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ελεγκτών και αποτελούν το βασικότερο στοιχείο στον Αυτόματο Έλεγχο. Οι λόγοι που οι ελεγκτές αυτοί έχουν καθιερωθεί, είναι ότι δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με ιδιαίτερη ευκολία στη σχεδίαση, επειδή διαθέτουν μικρό αριθμό παραμέτρων στις οποίες δίνοντας τις κατάλληλες τιμές προκύπτει το βέλτιστο αποτέλεσμα (Åström, Hägglund, 1995).

Ο αναλογικός όρος P βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τόσο στην μεταβατική όσο και στην μόνιμη κατάσταση. Όμως δεν μπορεί να ανταπεξέλθει σε όλους τους τύπους των συστημάτων και των εξωτερικών διαταραχών ικανοποιητικά, γι' αυτό και όπου απαιτείται, συνδυάζεται μαζί με τους υπόλοιπους όρους (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Ο ολοκληρωτικός όρος I χρησιμοποιείται σε συστήματα που παρουσιάζουν σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση, αφού για όσο χρόνο υπάρχει σφάλμα, η έξοδος του ελεγκτή, λόγω του ολοκληρώματος, αυξάνεται με αποτέλεσμα την εξάλειψη του σφάλματος (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

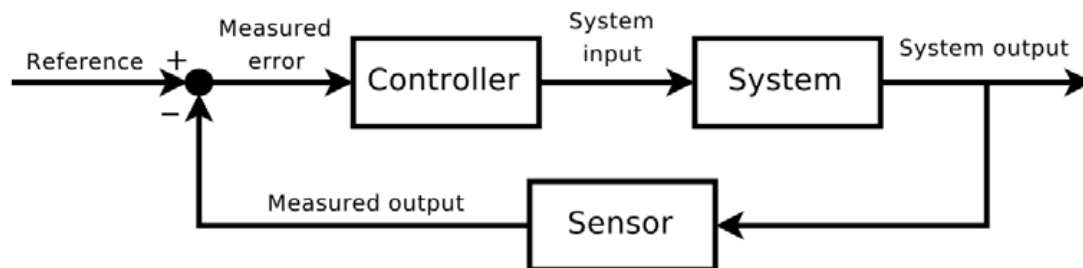
Τέλος ο διαφορικός όρος D αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος και βελτιώνει την συμπεριφορά του κατά τη μεταβατική κατάσταση. Η επιλογή του τύπου του ελεγκτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος ενώ δεν είναι πάντα απαραίτητη η χρήση και των τριών όρων. Συνήθως χρησιμοποιούνται μορφές ενός ή δύο όρων (P, PI και PD) και όπου απαιτείται αυστηρότερος έλεγχος, χρησιμοποιείται η μορφή PID (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

### 1.2.1 Η Ανάδραση

Όπως οι περισσότεροι ελεγκτές, έτσι και ο PID, βασίζεται στην έννοια της ανατροφοδότησης ή ανάδρασης. Η ανάδραση είχε μεγάλη επιρροή στην εξέλιξη της τεχνολογίας σε διάφορα πεδία, μεταξύ αυτών και ο αυτόματος έλεγχος. Χάριν απλότητας, ας υποθέσουμε ότι σε μία διαδικασία, αν αυξηθεί η έξοδος του ελεγκτή (σήμα ελέγχου) τότε θα αυξηθεί και η τιμή της μεταβλητής της διαδικασίας που μας ενδιαφέρει (ελεγχόμενη μεταβλητή) (Bellman 2015).

Με αυτό το σκεπτικό, η ανάδραση μπορεί να περιγραφεί ως: Αύξησε το σήμα ελέγχου όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή τιμή και

μείωσε το σήμα ελέγχου όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή τιμή (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Αυτού του είδους η ανάδραση ονομάζεται αρνητική (negative feedback) γιατί το σήμα ελέγχου κινείται αντίθετα από την ελεγχόμενη μεταβλητή. Το Σχήμα 1 δείχνει ένα τυπικό παράδειγμα αρνητικής ανάδρασης. Ο λόγος που η αρνητική ανάδραση είναι τόσο σημαντική είναι επειδή κάνει την ελεγχόμενη μεταβλητή να πλησιάζει την επιθυμητή τιμή, παρά την ύπαρξη διαταραχών και διακυμάνσεων στα χαρακτηριστικά της διεργασίας (Åström, Hägglund, 1995).



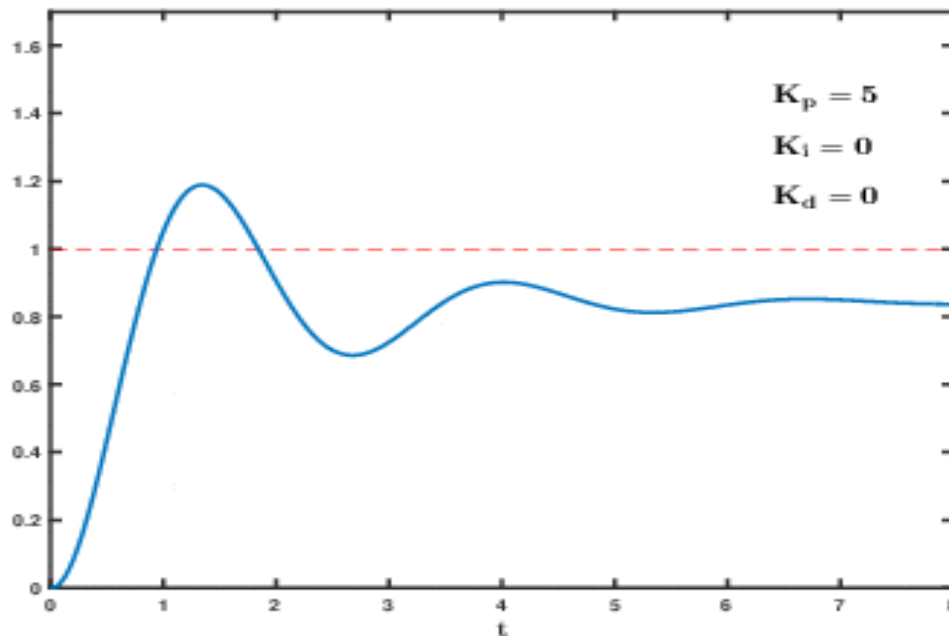
**Σχήμα 1: Διάγραμμα βαθμίδων μιας διεργασίας με αρνητική ανάδραση (Åström, Hägglund, 1995).**

### 1.2.2 Αναλογικός Όρος

Ο αναλογικός όρος παράγει ένα σήμα εξόδου το οποίο είναι ανάλογο στην τρέχουσα τιμή του σφάλματος. Ένα υψηλό αναλογικό κέρδος έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη αλλαγή στην έξοδο για μια δεδομένη αλλαγή στο σφάλμα. Εάν το αναλογικό κέρδος είναι πολύ υψηλό, το σύστημα μπορεί να γίνει ασταθές. Αντιθέτως, ένα μικρό κέρδος έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή απόκριση εξόδου σε ένα μεγάλο σφάλμα εισόδου και έναν λιγότερο ανταποκρίσιμο ή λιγότερο ευαίσθητο ελεγκτή. Αν το αναλογικό κέρδος είναι πολύ χαμηλό, η ενέργεια ελέγχου μπορεί να είναι πολύ μικρή όταν οφείλεται σε διαταραχές του συστήματος. Στις περισσότερες εφαρμογές ελέγχου, ο αναλογικός όρος είναι αυτός που συνεισφέρει το μεγαλύτερο μέρος στην έξοδο του ελεγκτή (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Επειδή ο αναλογικός όρος επιδρά στην τρέχουσα τιμή του σφάλματος, ένας αναλογικός ελεγκτής πάντα παρουσιάζει ένα σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση που η επιθυμητή τιμή είναι η τιμή στην οποία ο αναλογικός

όρος ισούται με το μηδέν. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η επίδραση μόνο του αναλογικού όρου σε μια διεργασία. Για την εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιούμε τον όρο που αναφέρεται στη συνέχεια (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).



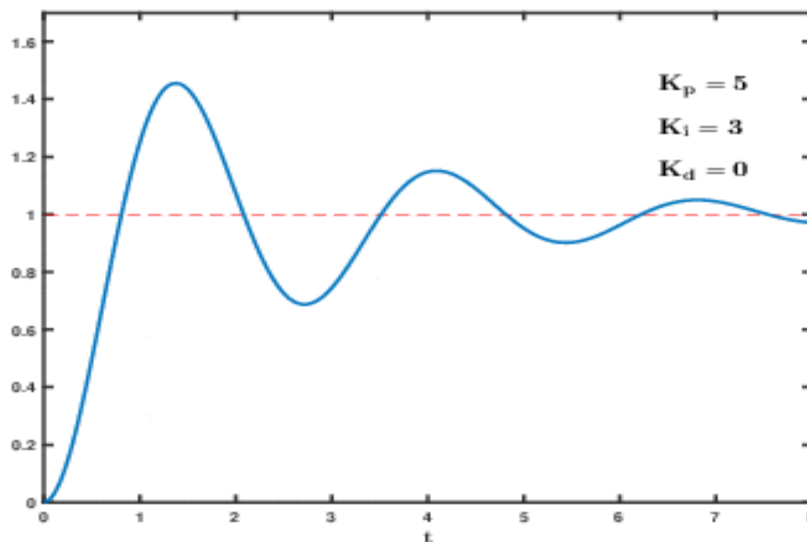
Σχήμα 2: Επίδραση του αναλογικού όρου σε μια διεργασία

### 1.2.3 Ολοκληρωτικός Όρος

Η συμβολή του ολοκληρωτικού όρου είναι ανάλογη τόσο με το μέγεθος του σφάλματος όσο και με τη διάρκεια του. Το ολοκλήρωμα στον τύπο ενός ελεγκτή PID είναι το άθροισμα του στιγμιαίου σφάλματος με την πάροδο του χρόνου και δίνει τη συσσωρευμένη μετατόπιση που θα έπρεπε να είχε διορθωθεί προηγουμένως. Το συσσωρευμένο σφάλμα στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το ολοκληρωτικό κέρδος  $K_i$  και προστίθεται στην έξοδο του ελεγκτή. Επίσης ο ολοκληρωτικός όρος επιταχύνει την κίνηση της ελεγχόμενης μεταβλητής προς την επιθυμητή τιμή. Ένας καθαρά ολοκληρωτικός ελεγκτής “I” θα μπορούσε να φέρει το σφάλμα στο μηδέν, ωστόσο θα είχε πολύ αργή αντίδραση στην αρχή (επειδή η δράση θα ήταν μικρή, και θα χρειαζόταν χρόνο για να γίνει σημαντική), βίαιη (η δράση αυξάνεται όσο το

σφάλμα είναι θετικό, ακόμη και αν το σφάλμα έχει αρχίσει να πλησιάζει το μηδέν) και αργή να τελειώσει (όταν το σφάλμα αλλάζει πρόσημο, αυτό για κάποιο χρονικό διάστημα μόνο θα μειώνει τη δύναμη της δράσης του ελεγκτή και δε θα το κάνει να αλλάξει και αυτή πρόσημο), προκαλώντας υπερακόντιση και ταλαντώσεις (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Επιπλέον, θα μπορούσε να προκαλέσει το σύστημα να αποκριθεί ακόμα και αν υπάρχει ήδη μηδενικό σφάλμα καθώς θυμάται ότι το σύστημα είχε σφάλμα και έτσι θα μπορούσε να προκαλέσει μια ενέργεια όταν αυτή δεν είναι απαραίτητη. Το Σχήμα 3 δείχνει πώς η προσθήκη ενός ολοκληρωτικού όρου εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης που δεν κατάφερε να εξαλείψει ο αναλογικός όρος αλλά ταυτόχρονα εισάγει ταλαντώσεις στο σύστημα (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).



**Σχήμα 3:** Εφαρμογή του ολοκληρωτικού όρου στην προηγούμενη απόκριση κρατώντας το αναλογικό κέρδος σταθερό

#### 1.2.4 Διαφορικός Όρος

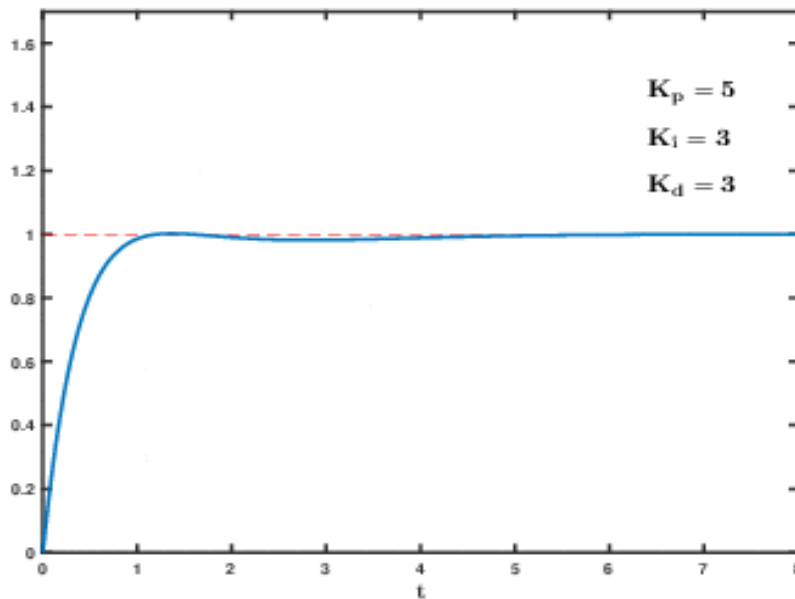
Η παράγωγος του σφάλματος της διαδικασίας υπολογίζεται καθορίζοντας την κλίση του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Το μέγεθος της συμβολής του διαφορικού όρου στη συνολική δράση ελέγχου ονομάζεται διαφορικό κέρδος (derivative gain),  $K_d$ . Ένας διαφορικός όρος δεν λαμβάνει υπόψη του το σφάλμα (αυτό σημαίνει ότι

δεν μπορεί να το φτάσει στο μηδέν: ένας καθαρά διαφορικός ελεγκτής “D” δεν μπορεί να φέρει το σύστημα στην επιθυμητή τιμή του), αλλά το ρυθμό αλλαγής του σφάλματος, προσπαθώντας να φέρει αυτόν τον ρυθμό στο μηδέν. Στόχος του είναι η τροχιά του σφάλματος να γίνει μια οριζόντια γραμμή, αποσβένοντας την εφαρμοζόμενη δύναμη και μειώνοντας έτσι την υπερακόντιση (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Η εφαρμογή υπερβολικής ώθησης όταν το σφάλμα είναι μικρό και συνεχίζει να μειώνεται θα οδηγήσει σε υπερακόντιση. Μετά την υπερακόντιση, αν ο ελεγκτής εφαρμόσει μια μεγάλη διόρθωση στην αντίθετη κατεύθυνση και επανειλημμένα υπερβεί την επιθυμητή θέση, η έξοδος θα ταλαντώνεται γύρω από την επιθυμητή τιμή (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Εάν το πλάτος των ταλαντώσεων αυξάνεται με το χρόνο, το σύστημα είναι ασταθές. Εάν μειώνεται, το σύστημα είναι ευσταθές. Εάν οι ταλαντώσεις διατηρούν σταθερό πλάτος, το σύστημα είναι οριακά ευσταθές. Ο διαφορικός όρος προβλέπει τη συμπεριφορά του συστήματος και επομένως βελτιώνει τον χρόνο που απαιτείται για να ηρεμήσει το σύστημα (settling time) καθώς και τη σταθερότητα του συστήματος. Ένα ιδανικός διαφορικός ελεγκτής δεν είναι αιτιατός, και έτσι οι εφαρμογές των PID ελεγκτών περιλαμβάνουν ένα πρόσθετο φίλτρο χαμηλής διέλευσης (low pass filter) για τον διαφορικό όρο για να περιορίσουν το κέρδος και το θόρυβο υψηλής συχνότητας (Soltész, 2012).

Ο διαφορικός όρος χρησιμοποιείται πολύ πιο σπάνια στην πράξη από τους άλλους δύο όρους (P και I), λόγω της μεταβλητής επίδρασής του στη σταθερότητα του συστήματος σε πραγματικές εφαρμογές. Το Σχήμα 4 δείχνει πώς βελτιώθηκε η συνολική απόκριση του συστήματος και εξαλείφθηκαν οι ταλαντώσεις που είχε εισάγει ο ολοκληρωτικός όρος με την προσθήκη του όρου διαφορικού (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).





**Σχήμα 4:** Εφαρμογή του όρου διαφορικού στην προηγούμενη απόκριση κρατώντας τα άλλα κέρδη σταθερά.

### 1.3 Βελτιστοποίηση παραμέτρων του PID ελεγκτή

Η ρύθμιση (tuning) του PID ελεγκτή έχει να κάνει με την απόδοση τιμών στο συντελεστή κάθε όρου, έτσι ώστε καθένας από αυτούς να επηρεάσει θετικά την απόκριση του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα να μετριαστούν όσο γίνεται περισσότερο τα αρνητικά του κάθε όρου. Ο τύπος της διεργασίας επηρεάζει το τι είναι επιθυμητό από τον έλεγχο της. Για παράδειγμα, κάποιες διεργασίες μπορεί να μην ανέχονται υπερακόντιση (overshoot) της απόκρισης τους και αυτό να θέτει και περιορισμούς στο χρόνο ανύψωσης (rise time) (Åström, Hägglund, 1995).

Αντιθέτως, άλλες διεργασίες μπορεί να παρουσιάζουν ανοχή σε ένα ποσοστό υπερακόντισης και έτσι να επιτρέπουν να αυξηθεί ο χρόνος ανύψωσης. Παρόλο που η υλοποίηση του PID ελεγκτή είναι σχετικά ευθύς και απλή διαδικασία, η σωστή ρύθμισή του είναι πιο περίπλοκο ζήτημα. Αυτό συμβαίνει επειδή απαιτεί κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κάθε ένας από τους όρους του PID επηρεάζει τη συνολική απόκριση. Ένας κακώς ρυθμισμένος PID ελεγκτής θα εμφανίσει αρκετά προβλήματα απόδοσης όπως: ταλαντώσεις, μη επαρκής απόσβεση, υπερακόντιση, αργούς χρόνους ανύψωσης ή ηρεμίας και άλλα (Soltesz, 2012).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια περιγραφή κάποιων διαδεδομένων τεχνικών ρύθμισης που συναντάει κανείς στη βιβλιογραφία καθώς και των προβλημάτων που οφείλονται σε κακή ρύθμιση (tuning) του PID ελεγκτή.

### 1.3.1 Χειροκίνητη ρύθμιση (tuning)

Η πρώτη και πιο φυσική μέθοδος είναι η χειροκίνητη ρύθμιση (tuning) του ελεγκτή από έναν χειριστή. Σε αυτή τη μέθοδο τα κέρδη  $K_i$  και  $K_d$  αρχικά ισούνται με το μηδέν. Στη συνέχεια, αυξάνουμε το αναλογικό κέρδος  $K_p$  μέχρι το σύστημα να αρχίσει να ταλαντώνεται ελαφρώς και ο χρόνος ανύψωσης να είναι ικανοποιητικός (Huberty, Jordan, Brandt, 2005). Έπειτα, αυξάνουμε το ολοκληρωτικό κέρδος  $K_i$  έως ότου να εξαλειφθεί το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, σε λογικό χρόνο για τη συγκεκριμένη διεργασία. Σε αυτό το σημείο πρέπει να έχουμε στο μυαλό μας ότι μεγαλύτερο ολοκληρωτικό κέρδος σημαίνει και μεγαλύτερη αστάθεια του συστήματος (Li, Yun, Ang, Heong, Chong, Gregory, 2006).

Τέλος, αν χρειάζεται, αυξάνουμε το διαφορικό κέρδος  $K_d$  για να βελτιώσουμε τη σταθερότητα του συστήματος καθώς και την απόκρισή του σε αλλαγή φορτίου ή σε κάποια διαταραχή. Εδώ πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι μεγάλο διαφορικό κέρδος θα προκαλέσει υπερβολική ανταπόκριση σε μεταβολές και θόρυβο. Ένας βρόχος PID που έχει ρυθμιστεί για να επιτύχει μια γρήγορη απόκριση συνήθως θα υπερβεί ελαφρώς την επιθυμητή τιμή ως συνέπεια της γρήγορης “ρύθμισης” του. Εντούτοις, μερικά συστήματα δεν μπορούν να ανεχθούν οποιαδήποτε υπερακόντιση, οπότε στην περίπτωση αυτή απαιτείται σύστημα κλειστού βρόχου, το οποίο θα πρέπει να έχει μικρότερο αναλογικό κέρδος  $K_p$  από αυτό ενός συστήματος που μπορεί να ανεχτεί κάποιο ποσοστό υπερακόντισης (Åström, Hägglund, 1995).

Στον Πίνακα 1 φαίνεται πώς ο κάθε όρος του ελεγκτή επηρεάζει την απόκριση του συστήματος υπό έλεγχο.

Παράμετρος	Χρόνος ανύψωσης	Υπερακόντιση	Μόνιμο σφάλμα	Χρόνος ηρεμίας	Ευστάθεια
$K_p$	Μείωση	Αύξηση	Μείωση	Μικρή αλλαγή	Χειροτέρευση

Ki	Μείωση	Αύξηση	Εξάλειψη	Αύξηση	Χειροτέρευση
Kd	Μικρή αλλαγή	Μείωση	Καμία αλλαγή	Μείωση	Βελτίωση

**Πίνακας 1: Επίδραση στο σύστημα, της αύξησης κάθε παραμέτρου ανεξάρτητα από τις άλλες (Åström, Hägglund, 1995).**

### 1.3.2 Μέθοδος Ziegler – Nichols

Ίσως η πιο γνωστή μέθοδος ρύθμιση (tuning) ενός PID ελεγκτή είναι η Ziegler – Nichols. Η μέθοδος αυτή έχει πάρει το όνομά της από τους John G. Ziegler και Nathaniel B. Nichols που την παρουσίασαν το 1942 και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, στην αρχή τα κέρδη  $K_i$  και  $K_d$  τίθενται ίσα με το μηδέν. Στη συνέχεια το κέρδος  $K_p$  αυξάνεται μέχρι την τιμή που θα οδηγήσει το σύστημα να εκτελεί ταλαντώσεις σταθερού πλάτους και σταθερής περιόδου. Η τιμή αυτή του κέρδους ονομάζεται απόλυτο κέρδος,  $K_u$ , και η περίοδος των ταλαντώσεων ονομάζεται απόλυτη περίοδος,  $T_u$ . Οι κανόνες ρύθμισης Ziegler – Nichols, συνήθως οδηγούν σε συστήματα με ιδιαίτερα υψηλή υπερακόντιση και “επιθετική” (“aggressive”) απόκριση. Δεν παρέχουν δηλαδή μια έτοιμη λύση ρύθμισης αλλά τις περισσότερες φορές προσφέρουν ένα αρκετά ικανοποιητικό σημείο εκκίνησης από το οποίο ο χειριστής μπορεί να ξεκινήσει να τροποποιεί τα κέρδη έτσι ώστε να έχει την επιθυμητή απόκριση (VanDoren, 2009).

### 1.3.3 Μέθοδος Cohen – Coon

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε το 1953 και βασίζεται σε ένα μοντέλο συστήματος πρώτης τάξης με μία χρονοκαθυστέρηση. Παρόμοια με τη μέθοδο Ziegler – Nichols, η μέθοδος αυτή προτείνει ένα σύνολο παραμέτρων συντονισμού για να δώσει μια απόκριση κλειστού βρόχου με λόγο απόσβεσης  $1/4$ . Σε αντίθεση όμως με την προηγούμενη μέθοδο που χρησιμοποιεί στοιχεία της απόκρισης συχνότητας του συστήματος για να υπολογίσει τα κέρδη του ελεγκτή, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί στοιχεία από τη βηματική απόκριση (step response) του συστήματος (Bennett, 1996).

### 1.3.4 Μέθοδος Lambda

Ο κανόνας κουρδίσματος (tuning) Lambda παρουσιάστηκε για πρώτη φορά (Dahlin, 1968) και (Higham, 1968). Βασίζεται στο πείραμα απόκρισης βημάτων 63%. Έχει γίνει πολύ δημοφιλής στη βιομηχανία ελέγχου των διαδικασιών. Οι κανόνες βαθμονόμησης Lambda προσφέρουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Η μεταβλητή της διαδικασίας δεν θα υπερβεί το καθορισμένο σημείο της μετά από διαταραχή ή αλλαγή.
- Ο συντονισμός είναι πολύ ισχυρός, που σημαίνει ότι ο βρόχος ελέγχου θα παραμείνει σταθερός ακόμα και αν τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αλλάξουν δραματικά από αυτά που χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό.
- Ένας βρόχος ελέγχου Lambda απορροφά μια διαταραχή. Αυτό είναι ένα πολύ ελκυστικό χαρακτηριστικό για τη χρήση του συντονισμού Lambda σε εξαιρετικά διαδραστικές διαδικασίες.
- Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον επιθυμητό χρόνο απόκρισης (στην πραγματικότητα τη χρονική σταθερά κλειστού βρόχου) για τον βρόχο ελέγχου. Αυτό παρέχει έναν παράγοντα συντονισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιταχύνει και να επιβραδύνει την απόκριση του βρόχου.

Δυστυχώς, οι κανόνες συντονισμού Lambda έχουν επίσης ένα μειονέκτημα. Ρυθμίζουν τον ενσωματωμένο χρόνο του ελεγκτή ίσο με τη χρονική σταθερά της διαδικασίας. Εάν μια διαδικασία έχει πολύ μεγάλη χρονική σταθερά, ο ελεγκτής θα έχει συνεπώς πολύ μακρύ ολοκληρωμένο χρόνο. Συγκριτικά με τα πλεονεκτήματα της μεθόδου για την συγκεκριμένη διεργασία το μειονέκτημα αυτό δεν είναι μεγάλης σημασίας (VanDoren, 2009).

## 1.4 Περιορισμοί και προβλήματα κακής ρύθμισης (tuning)

Παρόλο που οι ελεγκτές PID είναι εφαρμόσιμοι σε πολλά προβλήματα ελέγχου και συχνά παρέχουν ικανοποιητικό έλεγχο χωρίς βελτιώσεις ακόμα και όταν έχουν ρυθμιστεί “στο περίπου”, μπορούν να έχουν χαμηλή απόδοση σε ορισμένες εφαρμογές και σχεδόν ποτέ δεν παρέχουν βέλτιστο έλεγχο. Η βασική δυσκολία με τον έλεγχο PID είναι ότι είναι ένα σύστημα ελέγχου ανατροφοδότησης, με σταθερές

παραμέτρους και χωρίς άμεση γνώση της διαδικασίας και έτσι η συνολική απόδοση είναι αντιδραστική και συμβιβαστική (Ender, 1993).

Οι ελεγκτές PID, όταν χρησιμοποιούνται μόνοι τους, μπορεί να έχουν χαμηλή απόδοση αν τα κέρδη τους πρέπει να μειωθούν, έτσι ώστε το σύστημα ελέγχου να μην παρουσιάζει υπερακόντιση, να μην ταλαντώνεται ή να μην κυνηγάει την τιμή ρύθμισης του ελέγχου. Παρουσιάζουν επίσης προβλήματα όταν εμφανίζονται μη γραμμικότητες, μπορεί να ανταλλάσουν την πιο ομαλή απόκριση έναντι του χρόνου ανύψωσης, να μην αντιδρούν στην αλλαγή της συμπεριφοράς της διαδικασίας (ας πούμε, κάποια χαρακτηριστικά της διαδικασίας έχουν αλλάξει λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας) και να έχουν καθυστέρηση στην αντιμετώπιση μεγάλων διαταραχών (Ender, 1993).

#### 1.4.1 Γραμμικότητα

Είναι πολύ γνωστό ότι γραμμικοί ελεγκτές PI, εάν είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι, παρέχουν ικανοποιητικές λύσεις σε πολλές πρακτικές εφαρμογές χωρίς να απαιτείται λεπτομερής περιγραφή της δυναμικής του συστήματος. Ωστόσο, με την παρουσία ισχυρών μη γραμμικών παραγόντων, η απόδοσή τους είναι κατώτερη του ισοδυνάμου και είναι απαραίτητο να «επαναρρυθμιστεί» ο ελεγκτής (N. Gershenfeld 1999). Ο σχεδιασμός αυτών των διαδικασιών συντονισμού είναι περίπλοκος όταν διατίθεται μόνο μια πολύ χονδροειδής περιγραφή των αβέβαιων μη γραμμικοτήτων - μερικά πρωτότυπα παραδείγματα είναι η παρουσία τριβής και εκκεντρότητας σε μηχανικά συστήματα και η έλλειψη γνώσεων σχετικά με τις λειτουργίες αντίδρασης σε χημικές και βιολογικές διεργασίες. Στην προσέγγιση προσαρμοστικού ελέγχου υποτίθεται ότι μπορούμε να χωρέσουμε ένα μοντέλο - π.χ. μια πειραματική καμπύλη προσαρμογής δεδομένων ή ένα νευρωνικό δίκτυο - στην αβέβαιη λειτουργία. Η λειτουργική προσέγγιση με μη γραμμικά παραμετροποιημένα μοντέλα είναι, φυσικά, ένα βασικά δύσκολο πρόβλημα στο οποίο έχει αφιερωθεί τεράστιος αριθμός έρευνας (Ortega 1996).

Τα γραμμικά συστήματα έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Η δυναμική τους συμπεριφορά περιγράφεται με τη βοήθεια γραμμικών διαφορικών εξισώσεων (Δ.Ε).

• Ισχύει η αρχή της μη διαταρασσόμενης επαλληλίας (superposition), δηλαδή περισσότερα σήματα που δρουν σε ένα σύστημα είναι δυνατόν αλληλοκαλύπτονται χωρίς να δέχονται καμία αλληλεπίδραση.

Οι δύο προαναφερόμενες ιδιότητες επιτρέπουν τον διαχωρισμό του σήματος εξόδου, δηλαδή της ρυθμιζόμενης μεταβλητής ενός συστήματος  $x_a$  σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$x_a(t) = x_b(t) + \sum_i x_{bi}(t) + x_\varepsilon(t)$$

Όπου:

$x_b(t)$ , το σήμα της μεταβλητής οδήγησης στη μόνιμη κατάσταση  
 $x_{bi}(t)$ , το σήμα της μεταβλητής διαταραχής  $z_i$ , στη μόνιμη κατάσταση  
 $x_\varepsilon(t)$ , η ελεύθερη μεταβλητή του σήματος η οποία προσδιορίζει τη μεταβατική συμπεριφορά (κατάσταση). Επομένως η ακρίβεια ρύθμισης της ρυθμιζόμενης μεταβλητής ενός συστήματος μπορεί να διερευνηθεί μόνο από την εξέταση των δύο μεταβλητών  $x_b(t)$  και  $x_{bi}(t)$ , ενώ τελείως ανεξάρτητα από τις δύο προαναφερόμενες μεταβλητές το μέρος του σήματος που περιγράφεται από την ελεύθερη μεταβλητή  $x_\varepsilon(t)$  περιγράφει το μεταβατικό φαινόμενο του συστήματος (Åström, Hägglund, 1995).

#### 1.4.2 Θόρυβος στον Διαφορικό Όρο

Ένα πρόβλημα με τον διαφορικό όρο είναι ότι ενισχύει τη μέτρηση υψηλής συχνότητας ή το θόρυβο της διαδικασίας, με αποτέλεσμα να προκαλούνται μεγάλες αλλαγές στην έξοδο. Συχνά, είναι χρήσιμο να φιλτράρονται οι μετρήσεις με φίλτρο χαμηλής διέλευσης (low pass filter) για να αφαιρείται ο θόρυβος υψηλής συχνότητας. Καθώς το φιλτράρισμα χαμηλής διέλευσης και ο διαφορικός έλεγχος μπορεί να ακυρώνουν ο ένας τη δράση του άλλου, η ποσότητα φιλτραρίσματος είναι περιορισμένη. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένα μη γραμμικό διάμεσο φίλτρο, το οποίο βελτιώνει την αποδοτικότητα φιλτραρίσματος και την πρακτική απόδοση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο διαφορικός όρος μπορεί να απενεργοποιηθεί με μικρή επίδραση στη συνολική απόδοση (Bennett, 1996).

### 1.4.3 Ταλαντώσεις

Η ταλάντωση είναι ένα από τα πιο περίπλοκα ζητήματα επίδοσης στους PID ελεγκτές και μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων. Η πιο συνηθισμένη αιτία είναι το πολύ μεγάλο αναλογικό κέρδος. Μια δεύτερη αιτία είναι ένας ελεγκτής που βασίζεται κυρίως στον ολοκληρωτικό του όρο επειδή το σφάλμα που έχει συσσωρευτεί ενώ η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι κάτω από το επιθυμητό σημείο χρειάζεται χρόνο για να διορθωθεί, χρόνο κατά τον οποίο η ελεγχόμενη μεταβλητή θα είναι πλέον πάνω από το επιθυμητό σημείο. Ο ολοκληρωτικός όρος στη συνέχεια αρχίζει να συσσωρεύει σφάλμα στην αντίθετη κατεύθυνση, το οποίο δεν θα διορθωθεί μέχρις ότου η ελεγχόμενη μεταβλητή να διασχίσει ξανά το επιθυμητό σημείο. Σε αυτή την περίπτωση ο αναλογικός όρος ενεργεί ως αποσβεστήρας. Τρίτον, κάτι που εύκολα παραβλέπεται πολλές φορές, είναι ότι το φυσικό σύστημα που ελέγχεται θα μπορούσε να έχει από μόνο του ταλαντευόμενο χαρακτήρα και συνεπώς η ύπαρξη ταλαντώσεων στο σύστημα ίσως είναι αποδεκτή. Αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα κακή ρύθμιση του PID ελεγκτή (Ender, 1993).

Η συχνότητα του ελεγκτή είναι ο ρυθμός με τον οποίο ο βρόχος ελέγχου λειτουργεί και η έξοδος τροφοδοσίας ενημερώνεται μία φορά ανά κύκλο. Αυτή η συμπεριφορά απλής ενημέρωσης μπορεί να είναι προβληματική αν το αναλογικό κέρδος είναι υπερβολικά υψηλό. Ένα μικρό σφάλμα παράγει μια μεγάλη έξοδο, η οποία προκαλεί μεγάλη μεταβολή στην ελεγχόμενη μεταβλητή, ακόμη και σε έναν κύκλο. Εάν η αλλαγή αυτή μεταβάλλει την ελεγχόμενη μεταβλητή πέρα από το επιθυμητό σημείο, τότε η έξοδος αντιστρέφει την πολικότητα για τον επόμενο κύκλο. Αν αυτό το φαινόμενο επαναλαμβάνεται για πολλούς κύκλους, τότε ο ελεγκτής ταλαντώνεται. Αν το κέρδος είναι αρκετά υψηλό και προκαλεί την μεταπήδηση της ελεγχόμενης μεταβλητής με αυξανόμενο μέγεθος σφάλματος, τότε ο ελεγκτής θεωρείται ασταθής (Ender, 1993).

Η πιο γρήγορη λύση είναι η μείωση του αναλογικού κέρδους. Ωστόσο, η αύξηση της συχνότητας του ελεγκτή, αν αυτό είναι δυνατόν, θα βοηθήσει επίσης. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί έναν εγγενή περιορισμό ενός ψηφιακού ελεγκτή. Θα υπάρχει πάντα ταλάντωση σε κάποιο βαθμό. Εκτός από το ζήτημα συχνότητας βρόχου που έχει ήδη περιγραφεί, η έξοδος της τροφοδοσίας μπορεί να μειωθεί μόνο σε κάποια πεπερασμένη τιμή και τίποτα μικρότερο. Το πρόβλημα τότε γίνεται ζήτημα πόσο μπορεί να μειωθεί η ταλάντωση. Ένας απόλυτα συνεχής ελεγκτής δεν έχει αυτό

το πρόβλημα επειδή η έξοδος συνεχώς ενημερώνεται μαζί με το μεταβαλλόμενο σφάλμα.

Ωστόσο, η ταλάντωση από τους περιορισμούς συχνότητας εξακολουθεί να συμβαίνει στον συνεχή έλεγχο PID. Αυτοί οι ελεγκτές είναι αναλογικά κυκλώματα και εξακολουθούν να έχουν μια αποτελεσματική συχνότητα λειτουργίας που προκύπτει από αντιδραστικά στοιχεία που προκαλούν χρονική υστέρηση μεταξύ της εξόδου και της εισόδου (Ender, 1993).

Η ταλάντωση λόγω ενός υψηλού ολοκληρωτικού κέρδους μπορεί να μειωθεί είτε μειώνοντας το ολοκληρωτικό κέρδος (προφανής λύση) είτε αυξάνοντας το αναλογικό κέρδος (όχι άμεσα προφανές). Η αναλογική δράση θα επιβραδύνει τις ταλαντώσεις που προκαλούνται από την ολοκληρωτική δράση. Αυτό το παράδειγμα παρουσιάζει τη δυσκολία συντονισμού του PID ελεγκτή. Ο χρήστης πρέπει να αποφασίσει ποια χαρακτηριστικά των αποκρίσεων του ελεγκτή είναι απαραίτητα, ποια είναι επιθυμητά και ποια είναι μη αποδεκτά. Κάθε όρος έχει υπέρ και κατά και πρέπει να καθοριστεί η προτεραιότητα των χαρακτηριστικών του ελεγκτή πριν από την προσπάθεια ρύθμισης (tuning) του συστήματος (Torres, Carvalho, Fonseca, Filho, 2006).

#### **1.4.4 Χρόνος Ανύψωσης (time constant) και Υπερακόντιση (Overshoot)**

Ο χρόνος ανύψωσης τυπικά ορίζεται ως ο χρόνος για την αύξηση της ελεγχόμενης μεταβλητής από το 10% της τελικής τιμής στο 90% της τελικής τιμής. Ένας γρήγορος χρόνος ανύψωσης είναι επιθυμητός για προφανείς λόγους, αλλά ένας πολύ μικρός χρόνος ανύψωσης θα προκαλέσει υπερακόντιση της ελεγχόμενης μεταβλητής από το επιθυμητό σημείο. Η υπερακόντιση μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε αποσβενούμενες ταλαντώσεις για όσο χρονικό διάστημα η ελεγχόμενη μεταβλητή προσπαθεί να ισορροπήσει στο επιθυμητό σημείο. Για κάποιες εφαρμογές, μια μικρή υπερακόντιση είναι αποδεκτή παραχώρηση έτσι ώστε να επιτευχθεί ένας μικρός χρόνος ανύψωσης. Για άλλες διεργασίες, καμία υπερακόντιση δεν είναι ανεκτή και η προσεκτική επιλογή των κερδών του PID ελεγκτή πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα τον ταχύτερο χρόνο ανύψωσης χωρίς υπερακόντιση. Ο χρόνος ανύψωσης επηρεάζεται κυρίως από το αναλογικό και το διαφορικό κέρδος. Η δράση του διαφορικού όρου αντιδρά έντονα σε μία απότομη αλλαγή αλλά επιβραδύνει την προσέγγιση στο επιθυμητό σημείο. Η ολοκληρωτική συνιστώσα δεν επηρεάζει αισθητά τον χρόνο



ανύψωσης λόγω της φύσης της που αφορά τη συσσώρευση σφάλματος, αλλά μπορεί να προκαλέσει υπερακόντιση (Ender, 1993).

#### 1.4.5 Ευρωστία

Μια διαταραχή εμφανίζεται όταν οι ανωμαλίες σε οποιαδήποτε από τις μεταβλητές της διεργασίας προκαλούν μια απότομη ή ασυνήθιστη αλλαγή στην ελεγχόμενη μεταβλητή. Τέτοια διαταραχή μπορεί για παράδειγμα να είναι μια έκρηξη σωλήνα σε μια πρώτη ύλη η οποία προκαλεί μια δραματική πτώση της πίεσης του δοχείου (η ελεγχόμενη μεταβλητή). Μια άλλη μορφή διαταραχής είναι μια δυσλειτουργία στη διαδικασία προθέρμανσης ενός συστήματος, η οποία προκαλεί τη θερμοκρασία του συστήματος να πέσει σε χαμηλότερη τιμή από την κανονική λειτουργία (Ettaleb, 1999).

Η ανοχή σε διαταραχές (disturbance robustness) είναι τότε μια ιδιότητα ενός PID ελεγκτή για να χειριστεί αποτελεσματικά αυτές τις αλλαγές. Οι διαταραχές μπορούν, ή όχι, να ληφθούν υπόψη στη σχεδίαση ενός συστήματος ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι ένας ελεγκτής που προσπαθεί να ελέγξει μια διαδικασία χωρίς βρόχο ανατροφοδότησης, ασφαλώς δεν θα αντιληφθεί μια διαταραχή επειδή είναι δύσκολο να εξεταστεί κάθε πιθανή πηγή δημιουργίας μιας διαταραχής. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα ενός ελεγκτή PID είναι ότι μπορεί να ρυθμιστεί για να απορρίψει τις διαταραχές, ακόμα και αν προέρχονται από κάτι που δεν φαίνεται να σχετίζεται με τη διαδικασία (Ettaleb, 1999).

Μια απότομη μεταβολή της ελεγχόμενης μεταβλητής μπορεί να θεωρηθεί ως λειτουργικά ισοδύναμη με μια αλλαγή του επιθυμητού σημείου. Επομένως, η ρύθμιση του ελεγκτή που εκτελείται για να εξασφαλιστεί η καλύτερη απόκριση σε μια βαθμιαία μεταβολή του καθορισμένου σημείου θα κάνει το ίδιο και για την απόρριψη της διαταραχής. Όμως, αυτό δε συμβαίνει αν η διαταραχή επηρεάζει την ικανότητα του ελεγκτή PID να ελέγχει την ελεγχόμενη μεταβλητή, είτε επειδή ο ενεργοποιητής τίθεται σε κίνδυνο είτε επειδή η διαταραχή φέρνει την ελεγχόμενη μεταβλητή κοντά ή εκτός των ορίων δράσης του ενεργοποιητή. Η έκρηξη στο σωλήνα που αναφέρθηκε προηγουμένως θα ήταν ένα παράδειγμα εκτεθειμένου ενεργοποιητή διότι ο έλεγχος της πίεσης μέσα σε ένα παραμορφωμένο σωλήνα σίγουρα θα επιβαρύνει υπερβολικά την αντλία (Ettaleb, 1999).

### 1.4.6 Θόρυβος

Ένα πρόβλημα των PID ελεγκτών, που σχετίζεται κυρίως με τον διαφορικό όρο, είναι ο θόρυβος στις μετρήσεις που προκαλείται κυρίως από τους αισθητήρες και συνήθως περιέχει υψηλές συχνότητες και συνεπώς επιβάλλεται η μείωσή του. Μικρές, γρήγορες αλλαγές στη ελεγχόμενη μεταβλητή μπορεί να μεγεθύνονται σε μεγάλες αποκρίσεις του ελεγκτή ως αποτέλεσμα της διαφορικής δράσης. Το πρόβλημα είναι ότι το διαφορικό κέρδος πρέπει να είναι σχετικά μεγάλο για να έχει επιρροή στην απόδοση του συστήματος, αλλά όσο μεγαλύτερο είναι τόσο περισσότερο ενισχύει τον θόρυβο. Η πιο εύκολη λύση σε αυτό είναι να συμπεριληφθεί στη σχεδίαση του ελεγκτή μια νεκρή ζώνη (dead-band) για την αλλαγή του σφάλματος. Όταν η μεταβολή του σφάλματος θα είναι μέσα στα όρια της νεκρής ζώνης η έξοδος του διαφορικού όρου θα είναι μηδενική (Desborough, Miller, 2002).

### 1.5 Ο Αυτο-Ρυθμιζόμενος PID Ελεγκτής

Όταν στους βιομηχανικούς ελεγκτές η ρύθμιση τους (επιλογή των P, I, D παραμέτρων) δεν γίνεται χειροκίνητα (από τον μηχανικό αυτόματου ελέγχου ή τον χειριστή μέσω πληκτρολογίου) αλλά από τον ίδιο τον ελεγκτή ή τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με κάποια ευφυΐα τότε έχουμε προσαρμοστικό αυτόματο έλεγχο. Αν και οι αυτορυθμιζόμενοι (αυτο-επιλέγουν τις τιμές PID) ελεγκτές αντιμετωπίζονται με σκεπτικισμό στη βιομηχανία, λόγω κόστους και πολυπλοκότητας, όλο και περισσότερο κερδίζουν αξιοπιστία στην αγορά ελεγκτών. Η ρύθμιση ενός ελεγκτή εξαρτάται από:

- την δυναμική της διεργασίας
- την δυναμική του ελεγκτή
- την δυναμική του στοιχείου ελέγχου
- την αντίληψη του τεχνίτη ρύθμισης για τα παραπάνω

Πάνω από 50 εταιρίες έχουν κυκλοφορήσει αυτορυθμιζόμενους ελεγκτές. Μερικές από αυτές είναι η Yokogawa, Toshcon, Honeywell, Masibus κ.α. Μερικοί από αυτούς τους ελεγκτές, συνεχώς αυτορυθμίζονται. Όλοι τους αξιοποιούν δεδομένα εισόδου/εξόδου του συστήματος. Οι πιο γνωστές τεχνικές είναι:

- μαθηματικά μοντέλα

- αυτοματοποιημένοι έλεγχοι βηματικής απόκρισης
- οριακούς κύκλους (ιδιο-ταλαντώσεις) του συστήματος
- ευρηματικές (έμπειρες, heuristics) τεχνικές

### **Μαθηματικά μοντέλα**

Χρησιμοποιούν αλγορίθμους ταιριάσματος καμπύλης (curve fitting) για να προσδιορίσουν παραμέτρους των μοντέλων των δεδομένων εισόδων/εξόδων του συστήματος υπό έλεγχο. Η τεχνική της αυτορρύθμισης βασισμένη σε προβλέψεις μαθηματικών μοντέλων είναι περισσότερο ακαδημαϊκή και ερευνητική τεχνική. Οι εταιρίες Bailey και Eurotherm χρησιμοποιούν τέτοιες τεχνικές. Ο Smith predictor χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει μια διεργασία χωρίς νεκρό χρόνο (dead time) ώστε να ρυθμίζεται ο PID ελεγκτής σαν να μην υπήρχε νεκρός χρόνος. Αυτοί οι ελεγκτές δεν χρειάζονται να εφαρμόσουν τεχνικές βηματικής απόκρισης των συστημάτων. Ο XL-100 ελεγκτής της εταιρίας Johnson-Yokogawa χρησιμοποιεί και αυτός μαθηματικά μοντέλα της διεργασίας, με την διαφορά ότι ανανεώνει την αυτορρύθμιση μόνον αν συμβούν σημαντικές παρενοχλήσεις στο σύστημα (συμπεριλαμβανομένης της αλλαγής SP) (Astrom, 1984).

### **Αυτοματοποιημένοι έλεγχοι βηματικής απόκρισης**

Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε διεργασίες που επιδέχονται βηματικές παρενοχλήσεις. Για να αποφευχθεί διαταραχή στο σύστημα, μερικοί ελεγκτές αυτής της ομάδας εκτελούν βηματικές παρενοχλήσεις ανοικτού βρόχου, ενώ ο χειριστής πραγματοποιεί αλλαγή του set point (SP), δηλαδή σε χρόνο που έτσι ή αλλιώς θα γίνουν μεταβολές στο σύστημα. Όταν ο χειριστής ή ο υπολογιστής πραγματοποιήσει μεταβολή στην επιθυμητή τιμή (SP) του ελεγκτή τότε εφαρμόζεται ένα σήμα ελέγχου MV (control effort) 100 % (μέγιστο) και πριν η υπό μελέτη παράμετρος εξόδου της διεργασίας φτάσει το SP σβήνουμε το MV (και το MV περνά σε κατάσταση AUTO. Έτσι εφαρμόζουμε μια αρνητική βηματική παρενόχληση και παρακολουθώντας την απόκριση της κρίσιμης (υπό έλεγχο) μεταβλητής συνάγουμε τα P, I, D με τους κανόνες Ziegler-Nicjols και ανάλογα τις προτιμήσεις του χειριστή για αργή ή γρήγορη απόκριση. Μετά την ρύθμιση ο ελεγκτής ανακτά την κανονική του λειτουργία και φέρει το σύστημα στην νέα επιθυμητή τιμή (Åström, Hägglund, 1995).

### **Οριακοί κύκλοι (ιδιο-ταλάντωσης) του συστήματος**

Η μέθοδος των οριακών κύκλων για τον προσδιορισμό της δυναμικής της συμπεριφοράς του συστήματος, είναι ουσιαστικά μια σειρά ελέγχων ανοικτού βρόχου, προτάθηκε από τον Astrom (1984). Ο ελεγκτής εφαρμόζει μια σειρά on-off παλμών έτσι ώστε η διεργασία να ταλαντώσει ανάμεσα σε ανώτατα και κατώτατα όρια για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Για σύστημα που ανέχεται τέτοιες διαταραχές, οι δυναμικές του ιδιότητες προσδιορίζονται μετρώντας παραμέτρους των ταλαντώσεων, όπως πλάτος και περίοδο. Αδράνεια στην ταλάντωση, δείχνει μεγάλη χρονική σταθερά που επιδρά στην επιλογή P και I παραμέτρων. Οποιαδήποτε μεταβολή στη συχνότητα της ταλάντωσης βοηθά την επιλογή της διαφορικής δράσης D (Astrom, 1984).

### **Ευρεστικές (έμπειρες, heuristics) τεχνικές**

Όλες οι τεχνικές αυτορρύθμισης ελεγκτών χρησιμοποιούν αναλυτικές ή εμπειρικές τεχνικές για τον προσδιορισμό μοντέλων διεργασιών, δηλαδή τον υπολογισμό κέρδους, νεκράς ζώνης και χρονικής σταθεράς. Οι αλγεβρικοί αλγόριθμοι υπολογισμού των PID υπολογίζουν τα P, I, D. Οι ευρηματικές τεχνικές, αγνοούν την πρώτη φάση της μοντελοποίησης και ασχολούνται απ' ευθείας με την εκτίμηση των P, I, D παραμέτρων, βασιζόμενες σε παρατηρήσεις της απόκρισης κλειστού βρόχου. Οι ευρηματικές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν πρώτα σε βιομηχανικούς αυτορυθμιζόμενους ελεγκτές (Åström, Hägglund, 1995).

## 2 Αξιολόγηση της απόδοσης των PID

### 2.1 KPI

Ο έλεγχος απόδοσης βρόχου ελέγχου (CLPM) παρέχει μια λύση για την παρακολούθηση της απόδοσης ενός επιχειρησιακού στόλου βρόχων ελέγχου βιομηχανικής διαδικασίας, για τον εντοπισμό και τον εντοπισμό βρόχων ελέγχου με χαμηλή απόδοση και για τη διάγνωση προβλημάτων βρόχου ελέγχου. Τα εργοστάσια βιομηχανικών διεργασιών έχουν συνήθως διαμορφωμένες εκατοντάδες ή χιλιάδες βρόχους ελέγχου μέσα σε συστήματα PLC (Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής), DCS (Κατανεμημένο Σύστημα Ελέγχου) και SCADA (Εποπτικός Έλεγχος και Απόκτηση Δεδομένων) για αυτοματοποίηση και έλεγχο των λειτουργιών της εγκατάστασης (Holst, 1977).

Η σταθερότητα, η αξιοπιστία και η βέλτιστη απόδοση μιας βιομηχανικής διαδικασίας εξαρτάται από τη σταθερότητα και την απόδοση του στόλου των βρόχων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία και τον έλεγχο αυτής της διαδικασίας. Οι βέλτιστοι βρόχοι ελέγχου μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την αξιοπιστία του εξοπλισμού, τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και την απόδοση λειτουργίας (Holst, 1977).

Το τυπικό σύστημα DCS αποτελείται από μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική συστήματος των ενοτήτων εφαρμογών που διανέμουν την ευφυΐα ελέγχου διεργασίας σε όλο το δίκτυο επικοινωνιών, μέσω ενός κεντρικού χώρου ελέγχου με κοινόχρηστη διεπαφή χειριστή (κονσόλες) και διαμορφώσιμα στοιχεία λειτουργίας ελέγχου. Αυτή η αρθρωτή αρχιτεκτονική μειώνει το συνολικό κόστος και την πολυπλοκότητα καλωδίωσης και προάγει την επεκτασιμότητα για επέκταση του συστήματος ελέγχου. Σημαντικά οφέλη ρυθμιστικού ελέγχου επιτυγχάνονται μέσω της καλύτερης απόδοσης ελέγχου κλειστού βρόχου, της δυνατότητας εφαρμογής πιο εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου και της παροχής ολοκληρωμένης υποστήριξης αποφάσεων χειριστή (Wittenmarkt, 1973).

Οι πρόσφατες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της αξιολόγησης της απόδοσης του βρόχου πρωτογενούς ελέγχου στοχεύουν στη μείωση του φόρτου συντήρησης. Ενώ υπάρχουν πολλές μέθοδοι αξιολόγησης της απόδοσης των

ελεγκτών με βάση γνωστά μοντέλα διεργασιών στο στάδιο του σχεδιασμού, έχουν εισαχθεί νέες τεχνικές για την παρακολούθηση της απόδοσης του βρόχου ελέγχου. Ένας στόχος ελέγχου της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης της διαδικασίας με την πάροδο του χρόνου έχει νόημα από άποψη στατιστικής ανάλυσης. Ως εκ τούτου, ένας ελεγκτής ελάχιστης διακύμανσης χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση της απόδοσης του βρόχου ελέγχου (Astrom, Borisson, Ljung, Wittenmarkt, 1977).

Ο Thomas J. Harris, παρείχε μια μέθοδο για την εκτίμηση της απόδοσης με βάση την ελάχιστη διακύμανση υπό τον έλεγχο ανατροφοδότησης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα λειτουργίας κλειστού βρόχου ρουτίνας. Αυτή η τεχνική έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον και έχει αναπτυχθεί περαιτέρω από πολλούς ερευνητές. Σύμφωνα με την προσέγγιση του Harris, η αξιολόγηση του δείκτη απόδοσης του βρόχου ελέγχου βασίζεται συνήθως σε μια γνωστή διαδικασία νεκρού χρόνου και υποδεικνύει την απόδοση του βρόχου ελέγχου ως απόκριση σε τυχαίες διαταραχές ή την ικανότητα επιστροφής στο σημείο ρύθμισης εντός καθορισμένου διαστήματος. Στην πράξη, όπου η ακριβής εκτίμηση του νεκρού χρόνου της διαδικασίας είναι συχνά άγνωστη, ένας αριθμός τιμών δείκτη απόδοσης "εκτεταμένου ορίζοντα" υπολογίζεται σε ένα εύρος υποτιθέμενων νεκρών χρόνων (Thomas, 1989).

Ενώ ο δείκτης απόδοσης παρέχει μια καλή αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης του ελεγκτή, άλλες αναλύσεις PID μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ερμηνεύσουν εάν η ανεπαρκής απόδοση του ελεγκτή είναι αποτέλεσμα ακατάλληλων παραμέτρων συντονισμού, μηχανικών προβλημάτων, διαταραχών της διαδικασίας κ.λπ. (Thomas, 1989).

### 2.1.1 Ταλαντώσεις

Οι ταλαντώσεις είναι τακτικοί επαναλαμβανόμενοι κύκλοι στη διακύμανση μιας ελεγχόμενης μεταβλητής. Οι ταλαντώσεις πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να εξαλειφθούν.

Οι ταλαντώσεις μετρώνται με τα ακόλουθα:

- Δείκτης ταλάντωσης (Oscillation Index): Ένα μέτρο του βαθμού ταλάντωσης για έναν ελεγκτή.

- Περίοδος ταλάντωσης (Oscillation Period): Η διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ταλάντωσης από κορυφή σε κορυφή.

Ο δείκτης ταλαντώσεων είναι μια τιμή μεταξύ 0 και 1, με το 0 να υποδηλώνει καμία ταλάντωση και 1 να δείχνει μια τέλεια κανονική ταλάντωση. Κάθε Δείκτης ταλάντωσης άνω του 0,5 υποδηλώνει τακτική, παρατεταμένη ταλάντωση.

Ο δείκτης ταλαντώσεων και οι περίοδοι ταλάντωσης είναι πολύτιμα εργαλεία πληροφοριών για να μας βοηθήσουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων των ελεγκτών. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις τιμές για να προσδιορίσουμε εάν ένας ελεγκτής επηρεάζεται ή επηρεάζει άλλους ελεγκτές. Όταν οι ελεγκτές αλληλεπιδρούν, υπάρχει συχνά μια ταλάντωση που μοιράζονται οι ελεγκτές. Όταν οι ελεγκτές μοιράζονται μια ταλάντωση, θα έχουν τις ίδιες, ή παρόμοιες, περιόδους ταλάντωσης. Μπορούμε να συγκρίνουμε τις περιόδους ταλάντωσης για πολλούς ελεγκτές για να δούμε ποιοι ελεγκτές σχηματίζουν ένα σύστημα αλληλεπίδρασης (Karra, Jelali, Karim, Horch, 2010).

### 2.1.2 Κορεσμός (Saturation)

Ο κορεσμός μετρά το κλάσμα του χρόνου που περνά ένας ελεγκτής με την έξοδο του στα όρια εξόδου. Μια τιμή κορεσμού εξόδου 0% θεωρείται συνήθως ιδανική για ελεγκτές που είναι συνήθως ανοιχτοί.

Ο κορεσμός μπορεί να συμβεί για πολλούς λόγους:

- Ένας ελεγκτής πίεσης που είναι κανονικά κλειστός και ανοίγει μόνο για να αποφευχθεί η υπερβολική ή πολύ χαμηλή πίεση.
- Μια βαλβίδα μικρότερου μεγέθους, η οποία οδηγεί σε μια βαλβίδα που είναι ανοιχτή κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου (Breiman, 1984).

Δεν δείχνουν όλα αυτά τα παραδείγματα προβλήματα. Ο κορεσμός μπορεί να είναι φυσιολογικός ή μπορεί να οφείλεται σε προβλήματα με τον ελεγκτή ή άλλο εξοπλισμό στο βρόχο. Ωστόσο, ο κορεσμός είναι συνήθως 0% ή 100%. Οι ενδιάμεσες τιμές υποδηλώνουν συνήθως έναν ελεγκτή που ενεργεί κατά τη διάρκεια μιας αναστάτωσης ή προκαλεί προβλήματα από μόνο του.

Υπάρχουν δύο τύποι ελεγκτών:

- Ελεγκτές που το στοιχείο ελέγχου είναι συνήθως (μερικώς) ανοιχτό.
- Ελεγκτές που το στοιχείο ελέγχου είναι κανονικά κλειστό (ή συνήθως κορεσμένο) (Acioli, 2009).

Οι ελεγκτές που υπάρχουν για να διατηρούν μια ελεγχόμενη μεταβλητή σε μια δεδομένη τιμή είναι συνήθως τα ελεγχόμενα στοιχεία (εν μέρει) ανοιχτά. Για αυτούς τους ελεγκτές, ο κορεσμός είναι ένδειξη προβλήματος. Για παράδειγμα, η βαλβίδα μπορεί να έχει μικρό μέγεθος ή ο συντονισμός μπορεί να είναι λάθος. Στην ιδανική περίπτωση, αυτός ο τύπος ελεγκτή δεν πρέπει να είναι κορεσμένος.

Οι ελεγκτές που το στοιχείο ελέγχου τους είναι συνήθως κορεσμένο συνήθως υπάρχουν για να διατηρήσουν μια ελεγχόμενη μεταβλητή από την υπέρβαση κάποιου ορίου. Ανοίγουν μόνο όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή κινδυνεύει να ξεπεράσει αυτό το όριο. Σε αυτήν την περίπτωση, η πτώση της τιμής κορεσμού είναι ένα σημάδι ότι ο ελεγκτής ανταποκρίθηκε σε ένα πρόβλημα. Για αυτόν τον τύπο ελεγκτή, ο κορεσμός δεν υποδεικνύει πρόβλημα: απλά υποδεικνύει ότι ο ελεγκτής δεν έκανε τίποτα κατά τη διάρκεια της κορεσμένης περιόδου (Acioli, 2009).

### 2.1.3 Δείκτης κίνησης βαλβίδων (Valve travel index)

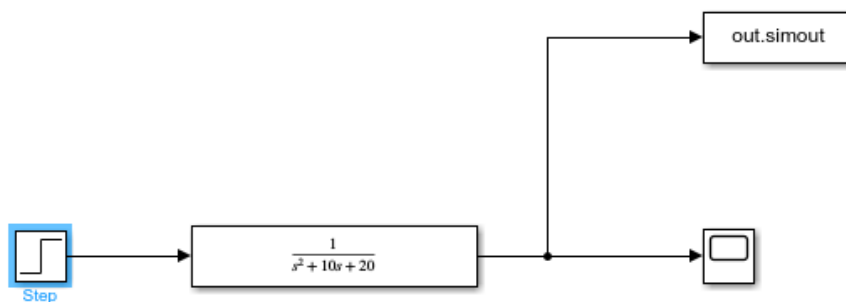
Μια ένδειξη για το πόσο ενεργή είναι η βαλβίδα και για το πόσο κινείται κατά την περίοδο ανάλυσης. Ο τύπος για τον υπολογισμό αυτής της τιμής είναι το άθροισμα της απόλυτης τιμής της διαφοράς του MV, όπου η διαφορά του MV υπολογίζεται ως η τρέχουσα τιμή MV μείον την προηγούμενη τιμή και το άθροισμα πραγματοποιείται από την πρώτη τιμή MV κατά την περίοδο ανάλυσης έως την τελευταία τιμή κατά την περίοδο ανάλυσης.

## 2.2 Παραδείγματα απόκρισης

Στο σημείο αυτό θα δείξουμε ένα παράδειγμα με σκοπό αυτού να δείξει πως οι ελεγκτές  $K_p$ ,  $K_d$ , και  $K_i$  συνεργάζονται για να εξασφαλίσουν γρήγορο χρόνο ανύψωσης, ελάχιστη υπερύψωση και μηδενικό μόνιμο σφάλμα. Αρχικά φτιάξαμε το

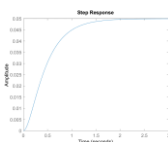


σύστημα ανοιχτού βρόγχου όπως φαίνεται και στο σχήμα 5 χωρίς PID και με βηματική μοναδιαία είσοδο.



**Σχήμα 5: Σύστημα χωρίς PID**

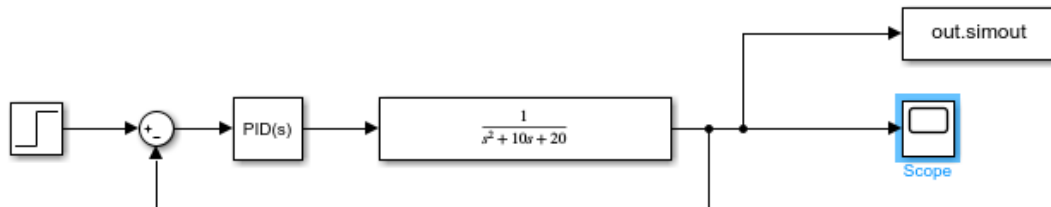
Τρέχοντας το παραπάνω σύστημα στο matlab πήραμε την απόκριση που φαίνεται στο σχήμα 6. Η απόκριση που απεικονίζεται παρακάτω ονομάζεται βηματική απόκριση. Βηματική απόκριση είναι το πώς ένα σύστημα ανταποκρίνεται σε μία βηματική είσοδο (Oliveira, Bhattacharyya 2015). Παρατηρώντας την παρακάτω απόκριση διαπιστώνουμε πως ο χρόνος ανύψωσης είναι περίπου ένα δευτερόλεπτο, ενώ ο χρόνος αποκατάστασης είναι περίπου ενάμιση δευτερόλεπτο. Σκοπός μας είναι αυτά τα δύο να τα μειώσουμε και αυτό επιτυγχάνεται με έναν ελεγκτή.



**Σχήμα 6: Βηματική απόκριση**

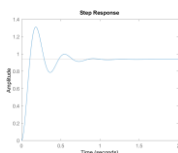
## Αναλογικός έλεγχος

Το πρώτο στάδιο είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν αναλογικό ελεγκτή με τιμή  $K_p=300$  με την ίδια ακριβώς είσοδο και το ίδιο σύστημα όπως φαίνεται και παρακάτω.



**Σχήμα 7: Σύστημα με αναλογικό ελεγκτή**

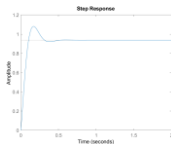
Τρέχοντας λοιπόν το σύστημα στο matlab θα μας δώσει την παρακάτω απόκριση. Παρατηρούμε ότι ο αναλογικός ελεγκτής μειώνει τον χρόνο ανύψωσης όσο και το μόνιμο σφάλμα, αυξάνει όμως την υπερύψωση και μειώνει κατά ένα μικρό ποσοστό τον χρόνο αποκατάστασης.



**Σχήμα 8: Βηματική απόκριση με αναλογικό ελεγκτή.**

### Αναλογικός-Διαφορικός έλεγχος

Από τον πίνακα που απεικονίζεται παραπάνω (πίνακας 1) βλέπουμε ότι ο διαφορικός ελεγκτής ( $K_d$ ) μειώνει τόσο την υπερύψωση όσο και τον χρόνο αποκατάστασης. Έστω ότι η τιμή του αναλογικού κέρδους  $K_p$  ισοδυναμεί με 300 όπως και προηγουμένως και δίνουμε στο διαφορικό κέρδος  $K_d$  την τιμή 10.



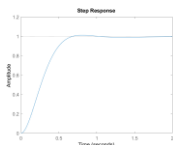
**Σχήμα 9: Βηματική απόκριση με αναλογικό-διαφορικό ελεγκτή.**

Η παραπάνω καμπύλη δείχνει ότι ο διαφορικός ελεγκτής μειώνει τόσο την υπερύψωση όσο και τον χρόνο αποκατάστασης και έχει μικρή επίδραση στον χρόνο ανύψωσης.

### **Αναλογικός-Ολοκληρωτικός έλεγχος**

Από τον παραπάνω πίνακα (πίνακας 1) βλέπουμε ότι ο ολοκληρωτικός ελεγκτής ( $K_i$ ) μειώνει τον χρόνο ανύψωσης, ενώ αυξάνει την υπερύψωση και τον χρόνο αποκατάστασης.

Μειώνουμε την τιμή του  $K_p$  στο 30 και δίνουμε στο ολοκληρωτικό κέρδος  $K_i$  την τιμή 70.

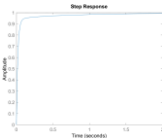


**Σχήμα 10: Βηματική απόκριση με αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή.**

Μειώσαμε την τιμή του αναλογικού κέρδους ( $K_p$ ) γιατί ο ολοκληρωτικός ελεγκτής μειώνει επίσης τον χρόνο ανύψωσης και αυξάνει την υπερύψωση, όπως και ο αναλογικός (διπλή επίδραση). Η παραπάνω απόκριση δείχνει ότι ο ολοκληρωτικός ελεγκτής εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα.

### **Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός έλεγχος**

Τέλος εξετάσαμε τον PID ελεγκτή. Υστερα από πολλές προσπάθειες και δοκιμές που κατέληξαν σε λάθη, καταλήξαμε στα παρακάτω κέρδη, τα οποία μας δίνουν την επιθυμητή απόκριση:  $K_p=350$ ,  $K_i=300$  και  $K_d=50$ .

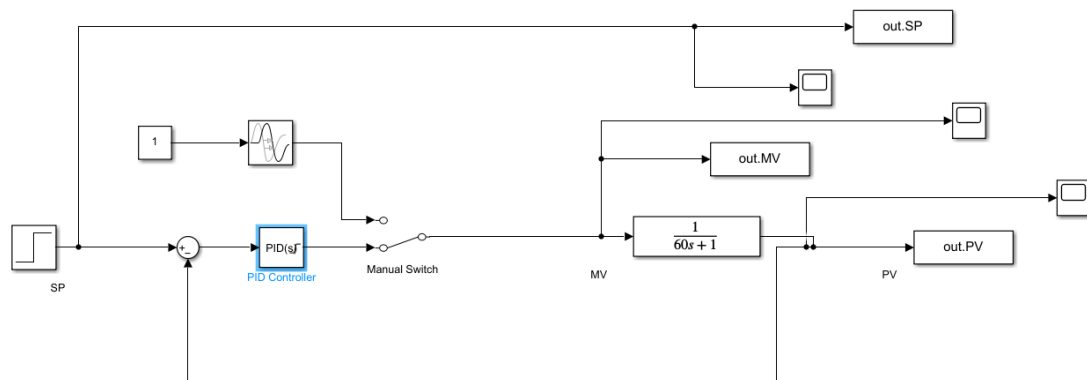


Σχήμα 11: Βηματική απόκριση με αναλογικό-διαφορικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή.

Τελικά, παρατηρούμε ένα σύστημα χωρίς υπέρβαση, με γρήγορο χρόνο ανύψωσης και καθόλου μόνιμο σφάλμα.

## 2.3 Μοντελοποίηση της διεργασίας βάσει προσεγγιστικού μοντέλου

### 2.3.1 Σύστημα και κώδικας που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία



Σχήμα 12: Σύστημα με PID ελεγκτή προσεγγιστικού μοντέλου.

Για την πορεία της εργασίας χρειάστηκε να δημιουργήσουμε κώδικα με τον οποίο να βρίσκουμε τα KPIs που θα χρειαστούμε για την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς αλλά και για την Μηχανική Μάθηση. Αρχικά εξάγουμε τα δεδομένα μας από το σύστημα μας (Σχήμα 12) τα οποία είναι Process Value, Manipulated Variable (MV) και Set Point (SP). Εύρεση των KPIs :

- Standard Deviation PV.

Για έναν τυχαίο μεταβλητό φορέα A που αποτελείται από N κλιμακωτές παρατηρήσεις, η τυπική απόκλιση ορίζεται ως

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |Ai - \mu|^2}$$

Όπου  $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ai$

Η τυπική απόκλιση είναι η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης. Ορισμένοι ορισμοί της τυπικής απόκλισης χρησιμοποιούν έναν συντελεστή κανονικοποίησης του N αντί του N-1, τον οποίο μπορείτε να καθορίσετε ρυθμίζοντας w έως 1.

- Average PV

Για έναν τυχαίο μεταβλητό φορέα A που αποτελείται από παρατηρήσεις N κλιματικών, ο μέσος όρος ορίζεται ως

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Ai$$

- Percent Standard Deviation PV.

$$PerStdDev = StdDev / AVerPV$$

- Standard Deviation OP

Είναι το ίδιο με το Standard Deviation PV μόνο που αφορά το MV

- Average OP (MV)

Μέσος όρος MV

- Valve Travel Index

Άθροισμα όλων των μεταβολών της MV από λεπτό σε λεπτό προς όλες τις ώρες

- Set Point Changes

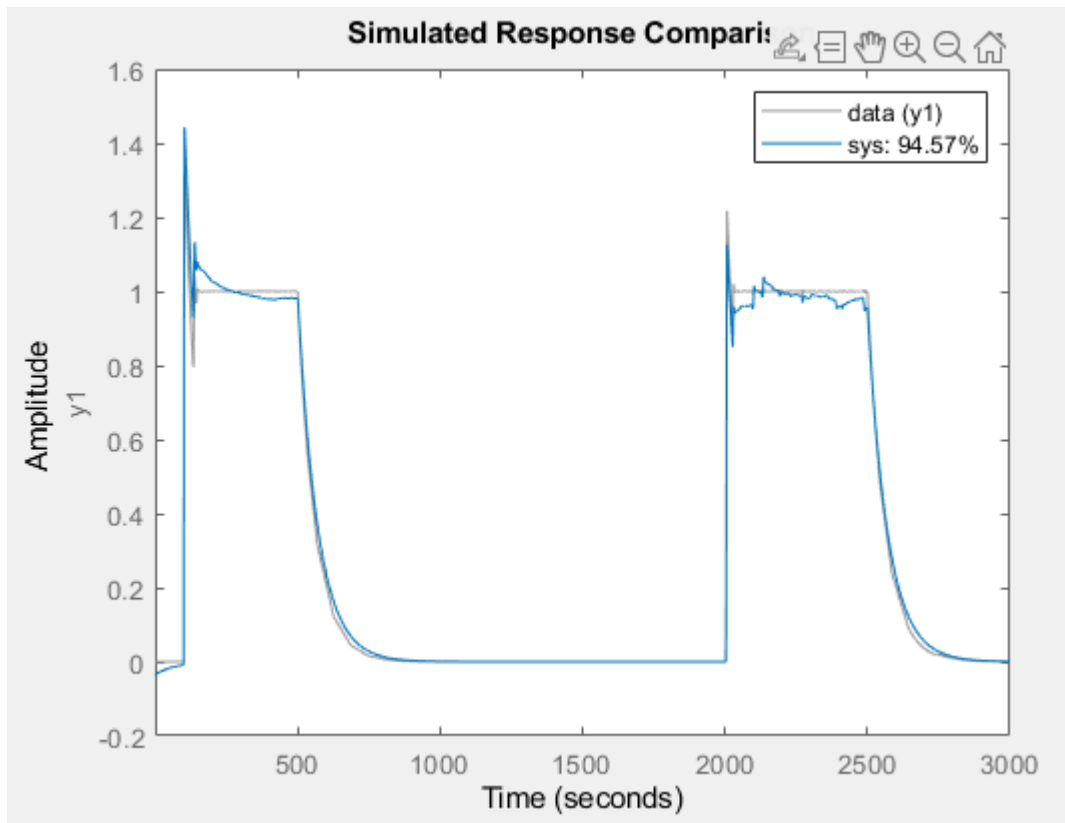
Πόσες φορές αλλάξαμε το SP

- *Percent Saturation*  
Αθροίζει χρόνο κάτω από 3% και πάνω από 97% της MV
- *Oscillation Index*  
Ένα μέτρο του βαθμού ταλάντωσης για έναν ελεγκτή.
- *Oscillation Period*  
Η διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ταλάντωσης από κορυφή σε κορυφή.

Αφού βρήκαμε τα KPIs με τον κώδικα όπως φαίνεται στο παράρτημα 1, στη συνέχεια έπρεπε να βρούμε την συνάρτηση μεταφοράς (Transfer Function (TF)), χρησιμοποιώντας την εντολή του Matlab, `procest`. Στη συνέχεια έχοντας την συνάρτηση μεταφοράς και τα KPIs κάναμε, πάλι με την βοήθεια του Matlab, ρύθμιση (Tuning) του PID ελεγκτή για να βρούμε τα βέλτιστα  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ .

### 2.3.2 Αποτελέσματα

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα αποτελέσματα από τον κώδικα που χρησιμοποιήσαμε. Παρατηρούμε στο σχήμα 13 αρχικά με γκρι χρώμα πως είναι η πραγματική απόκριση και με μπλε χρώμα βλέπουμε την απόκριση που βρήκαμε εμείς με την συνάρτηση μεταφοράς αφού η πρώτη πρόβλεψη της συνάρτησης είναι μόλις 94.57%. Επίσης έχουμε υπερύψωση κάτι το οποίο δεν το θέλουμε και την μείωση αυτή την επιτυγχάνουμε με τη ρύθμιση του ελεγκτή μας που μας λέει τι πρέπει να βάλουμε σαν  $K_p$  και  $K_i$  για να έχουμε το σωστό αποτέλεσμα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 15 η υπερύψωση έχει μειωθεί και έχει μεγαλώσει το ποσοστό που μας δείχνει κατά πόσο έχει προβλέψει σωστά την συνάρτηση μεταφοράς, στην συγκεκριμένη περίπτωση ταιριάζει 98.25% και όπως φαίνεται και στο σχήμα οι δύο αποκρίσεις είναι σχεδόν ίδιες. Στους πίνακες 2 και 3 βλέπουμε τα KPIs όπως περιγράψαμε και παραπάνω.

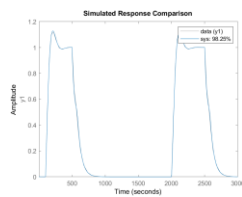


Σχήμα 13: απόκριση του συστήματος με τον PI ελεγκτή να έχει  $K_p=50$  και  $K_i=10$ .

1	'sdPV1'	0.3833
2	'averPV1'	0.3402
3	'persdPV1'	1.1269
4	'averOP'	0.3500
5	'sdOP'	1.5514
6	'sp1ch'	7
7	'MvOverHo...	4.4126
8	'perSat3'	0.9950
9	'perSat97'	0
10	'oscInd'	0.9987
11	'oscPer'	1507
12	'transFuncP...	'P1'
13	'transFuncP...	94.5062

Πίνακας 2: KPIs του παραπάνω συστήματος.





**Σχήμα 14:** Απόκριση του συστήματος με τον PI ελεγκτή να παίρνει τις τιμές που βρήκαμε με το ρύθμιση δηλαδή  $K_p=1.45$  και  $K_i=0,05$ .

1	'sdPV1'	0.4104
2	'averPV1'	0.3388
3	'persdPV1'	1.2115
4	'averOP'	0.3384
5	'sdOP'	0.4978
6	'sp1ch'	6
7	'MvOverHo...	0.1597
8	'perSat3'	1
9	'perSat97'	0
10	'oscInd'	0.9998
11	'oscPer'	1619
12	'transFuncP...	'P1'
13	'transFuncP...	98.2208
14	'Tune'	<i>1x1 pid</i>

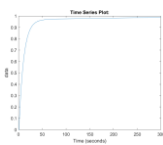
**Πίνακας 3:** KPIs του παραπάνω συστήματος.

## 2.4 Ευρωστία, ανάλυση ευαισθησίας (πρακτικά παραδείγματα)

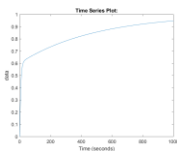
Σ' ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου όλες οι μεταβολές που παρατηρούνται στο περιβάλλον του έχουν ως αποτέλεσμα μία μείωση της ακρίβειας της εξόδου του αντίστοιχου συστήματος. Σ' ένα σύστημα κλειστού βρόχου λόγω της ανίχνευσης των μεταβολών της διεργασίας το σύστημα προβαίνει αυτόματα στη διόρθωση των σφαλμάτων που εμφανίζονται στην έξοδό του. Επομένως η ευαισθησία ενός συστήματος στις διάφορες μεταβολές των παραμέτρων του έχει ιδιαίτερη σημασία. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων ελέγχου κλειστού βρόχου είναι η δυνατότητα μείωσης της ευαισθησίας τους.

Η ευρωστία είναι πολύ σημαντική για όλα τα συστήματα ελέγχου, καθώς σε όλα συνήθως υπάρχει κάποιο είδος διαταραχής. Γενικά, στην καθημερινή ζωή ευρωστία σημαίνει να είσαι υγιής και δυνατός. Όταν, όμως, η έννοια αυτή μεταφέρεται στα συστήματα, αναφέρεται στην ικανότητα ανοχής των διαταραχών που πιθανών θα επηρεάσουν την λειτουργία του συστήματος. Με λίγα λόγια, ευρωστία είναι η ικανότητα του συστήματος να αντιστέκεται σε αλλαγές χωρίς να προσαρμόζει την αρχική του σταθερή διαμόρφωση. Η έννοια της ευρωστίας χαρακτηρίζεται από την ευαισθησία του ελεγχόμενου συστήματος σε σχέση με τα εσωτερικά ή τα εξωτερικά φαινόμενα διαταραχής. Ευρωστία είναι η ικανότητα του ελεγκτή να παραμένει αποτελεσματικός παρά τις απρόσμενες αλλαγές είτε στο ελεγχόμενο σύστημα είτε στο περιβάλλον. Δηλαδή, ευρωστία είναι μια ιδιότητα η οποία επιτρέπει στο σύστημα να διατηρήσει τη λειτουργικότητα του παρά τις εσωτερικές ή εξωτερικές διαταράξεις. Με λίγα λόγια, ένας ελεγκτής είναι εύρωστος όταν διατηρεί την απόδοσή του ανεξάρτητα από τα σφάλματα του μοντέλου. Οι ελεγκτές σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας μεθόδους από τον εύρωστο έλεγχο έτσι ώστε να είναι ικανοί να αντιμετωπίσουν μικρές διαφορές ανάμεσα στο πραγματικό σύστημα και στο ονομαστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό. Η θεωρία του εύρωστου ελέγχου είναι μία μέθοδος που λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές της απόδοσης του ελεγχόμενου συστήματος όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι του συστήματος. Οι μέθοδοι ευρωστίας αποσκοπούν στο να πραγματοποιήσουν εύρωστη απόδοση ή/και σταθερότητα στη παρουσία μικρών σφαλμάτων του μοντέλου. Επίσης, επιθυμούν να φράξουν την αβεβαιότητα από το να την εκφράσουν με κάποια άλλη μορφή. Οι μέθοδοι εύρωστου ελέγχου σχεδιάζονται κυρίως για δύο λόγους:

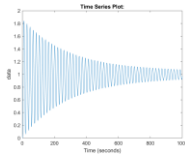
- Για τη σωστή λειτουργία, δεδομένου ότι οι παράμετροι ή οι διαταραχές του συστήματος βρίσκονται σε (συνήθως συμπαγές) σύνολο.
- Για την επίτευξη εύρωστης απόδοσης ή/και σταθερότητας στην παρουσία φραγμένων σφαλμάτων.



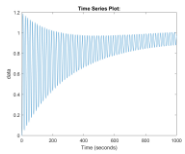
Σχήμα 15: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς  $\frac{1}{150s+1}$ .



Σχήμα 16: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς  $\frac{1}{150s+10}$ .



Σχήμα 17: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς  $\frac{1}{150s^2+1s+1}$ .



Σχήμα 18: Απόκριση με συνάρτηση μεταφοράς  $\frac{1}{150s^2+1s+10}$ .

### 3 Μηχανική Μάθηση

#### 3.1 Εισαγωγή

Η Μάθηση (Learning) είναι μία από τις θεμελιώδεις ιδιότητες της νοήμονος συμπεριφοράς του ανθρώπου. Είναι η διαδικασία κατά την οποία ο υποβαλλόμενος σε αυτήν αποκτά γνώσεις, δεξιότητες, συμπεριφορές και αξίες μέσα από την παρατήρηση του περιβάλλοντος, την σύγκριση και με την εφαρμογή γνωστικών διαδικασιών. Παρόλο που ο όρος μάθηση υποδηλώνει τη μαθησιακή διαδικασία, ωστόσο συχνά προσδιορίζει και το αποτέλεσμα αυτής. Οι επιστήμονες του χώρου της πληροφορικής και της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) ορίζουν την λεγόμενη Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) ως: το φαινόμενο κατά το οποίο ένα σύστημα βελτιώνει την απόδοσή του κατά την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας, χωρίς να υπάρχει ανάγκη να προγραμματιστεί εκ νέου την δημιουργία, δηλαδή, υπολογιστικών συστημάτων που είναι ικανά να μάθουν, και να βελτιώσουν την απόδοσή τους κάνοντας κατάλληλη χρήση των αποτελεσμάτων κάποιας εργασίας (MacQueen, 1967).

Ένας σχετικός γενικός ορισμός Μηχανικής Μάθησης δίνεται από τον Mitchell (1997): *«Ένα πρόγραμμα υπολογιστή λέμε ότι μαθαίνει από την εμπειρία  $E$  ως προς κάποια κλάση εργασιών  $T$  και μέτρο απόδοσης  $P$ , αν η απόδοσή του σε εργασίες από το  $T$ , όπως μετρείται από το  $P$ , βελτιώνεται μέσω της εμπειρίας  $E$ .»*

Στην Επαγωγική Μάθηση (Inductive Learning), με τη διαδικασία της επαγωγής (induction) ο άνθρωπος μαθαίνει κατανοώντας το περιβάλλον του μέσω παρατηρήσεων και δημιουργεί μια απλοποιημένη (αφαιρετική) εκδοχή του που ονομάζεται νοητικό μοντέλο (mental model). Επιπλέον, ο άνθρωπος έχει τη δυνατότητα να οργανώνει και να συσχετίζει τις εμπειρίες και τις παρατηρήσεις του δημιουργώντας νέες δομές που ονομάζονται νοητικά πρότυπα (mental patterns), με αξιοποίηση και του επαγωγικού και του απαγωγικού συλλογισμού (MacQueen, 1967).

Στη δημιουργία νέων προτύπων από παλαιά βασίζονται οι τρόποι μάθησης που εξαρτώνται σε μικρό ή μεγάλο βαθμό από την προϋπάρχουσα γνώση για ένα πρόβλημα, όπως είναι η μάθηση από επεξηγήσεις και η μάθηση από περιπτώσεις. Σε

σχέση με την ανθρώπινη ικανότητα προς μάθηση, οι φιλόσοφοι θέτουν το ερώτημα: «Πώς μπορεί ένας επαγωγικός συλλογισμός που οδηγεί στη μάθηση να αξιολογηθεί ως προς την ορθότητά του;». Αντίστοιχα, οι ψυχολόγοι ρωτούν: «Πώς αποθηκεύει ο εγκέφαλος τα αποτελέσματα της διαδικασίας της μάθησης, δηλαδή τα νοητικά μοντέλα και τα πρότυπα;». Στο χώρο της TN απλώς ρωτούν: «Πώς μπορεί μία μηχανή να δημιουργήσει νέα μοντέλα και πρότυπα μάθησης από συγκεκριμένα παραδείγματα και πόσο αξιόπιστα είναι αυτά τα μοντέλα και πρότυπα στην πράξη;» (Huberty, Jordan, Brandt, 2005).

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να δοθεί ο ακόλουθος εναλλακτικός ορισμός για τη Μηχανική Μάθηση: Η ικανότητα ενός υπολογιστικού συστήματος να δημιουργεί μοντέλα ή πρότυπα από ένα σύνολο δεδομένων.

Ως κλάδος της TN, η Μηχανική Μάθηση ασχολείται με τη μελέτη αλγορίθμων που βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους σε κάποια εργασία που τους έχει ανατεθεί χρησιμοποιώντας την εμπειρία τους από προηγούμενες εκτελέσεις της ίδιας ή παραπλήσιας εργασίας σε διαφορετικά δεδομένα. Όσον αφορά τη σχεδίαση των συστημάτων Μηχανικής Μάθησης, για τα συστήματα που ανήκουν στη συμβολική TN, η δυνατότητα μάθησης προσδιορίζεται ως η ικανότητα πρόσκτησης επιπλέον γνώσης, που επιφέρει μεταβολές στην υπάρχουσα καταχωρημένη γνώση είτε αλλάζοντας χαρακτηριστικά της είτε με αυξομείωσή της. Στην περίπτωση των συστημάτων TN που ανήκουν στη Μη Συμβολική TN (όπως η περίπτωση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων), ως μάθηση προσδιορίζεται η δυνατότητα που διαθέτουν τα συστήματα στο να μετασχηματίζουν την εσωτερική τους δομή, παρά στο να μεταβάλλουν κατάλληλα τη γνώση που έχει καταχωρηθεί μέσα σε αυτά κατά το σχεδιασμό τους (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek, 2010).

Αν και απέχουμε πάρα πολύ από τη δημιουργία μηχανών που μαθαίνουν τόσο καλά όσο ο άνθρωπος, για συγκεκριμένες περιοχές μάθησης έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν επιτρέψει την εμφάνιση σύγχρονων εμπορικών εφαρμογών με σημαντική επιτυχία. Επιπλέον, τα αποτελέσματα από τις εφαρμογές της TN αρχίζουν ήδη να είναι ορατά και να δίνουν απαντήσεις σε αναπάντητα, έως τώρα, ερωτήματα άλλων κλάδων που διερευνούν την ικανότητα του ανθρώπου να μαθαίνει. Εκτός της ίδιας της TN, μεταξύ των επιστημονικών κλάδων που επωφελούνται από τα

επιτεύγματα στον τομέα της Μηχανικής Μάθησης συγκαταλέγονται οι: Εξόρυξη Δεδομένων, Πιθανότητες και Στατιστική, Θεωρία της Πληροφορίας, Αριθμητική Βελτιστοποίηση, Θεωρία της Πολυπλοκότητας, Θεωρία Ελέγχου (προσαρμοστική), Ψυχολογία (εξελικτική, γνωστική), Νευροβιολογία και Γλωσσολογία (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek 2010).

### 3.1.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

Οι αλγόριθμοι της Μηχανικής Μάθησης χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τους αλγόριθμους με επίβλεψη κι αυτούς χωρίς επίβλεψη.

#### Αλγόριθμοι με επίβλεψη

Ίσως ο πιο διαδεδομένος τύπος μάθησης με πληθώρα εφαρμογών στο πλαίσιο της αναγνώρισης προτύπων. Οι αλγόριθμοι με επίβλεψη απαιτούν την παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα που θα προσδιορίσει τόσο τα δεδομένα εισόδου όσο και τα δεδομένα εξόδου, καθώς πρέπει να παρέχει και ανάδραση σχετικά με την ακρίβεια των προβλέψεων (accuracy of predictions) κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης. Με την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος εφαρμόζει οτι έμαθε σε νέα δεδομένα (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek, 2010).

#### Αλγόριθμοι χωρίς επίβλεψη

Οι αλγόριθμοι χωρίς επίβλεψη απαιτούν τα δεδομένα εισόδου, όχι όμως τις τιμές εξόδου, είτε επειδή είναι άγνωστες, είτε επειδή είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστούν. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούν μια επαναληπτική προσέγγιση που ονομάζεται «βαθιά μάθηση» (deep learning)\* για να εξάγουν αποτελέσματα μέσω ανασκόπησης των δεδομένων. Οι αλγόριθμοι χωρίς επίβλεψη χρησιμοποιούνται για πιο πολύπλοκες εργασίες από οτι οι αλγόριθμοι με επίβλεψη. Υπάρχουν πολλές και ποικίλες περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται ως «χωρίς επίβλεψη». Αρκετά συνηθισμένες περιπτώσεις είναι η κατανομή πιθανότητας, η ομαδοποίηση και η συμπίεση δεδομένων (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek, 2010).

## Αλγόριθμοι με μερική επίβλεψη

Στην περίπτωση της μερικής επίβλεψης είναι γνωστοί μερικοί στόχοι, αλλά όχι όλοι. Αυτό το ενδεχόμενο βρίσκεται μεταξύ μάθησης με επίβλεψη και μάθησης χωρίς επίβλεψη, αφού συχνά χρησιμοποιούνται ένα σύνολο δεδομένων για εκπαίδευση (train set) με γνωστούς στόχους (labels) και ένα σύνολο δεδομένων ελέγχου (test set) με άγνωστες εξόδους. Ο σκοπός σε αυτή την περίπτωση είναι να προβλεφθούν οι στόχοι του συνόλου δεδομένων ελέγχου. Άλλη, σπανιότερη περίπτωση μάθησης με μερική επίβλεψη είναι αυτή στην οποία εισάγονται περιορισμοί, όπως για παράδειγμα η ανάγκη μερικά πρότυπα να έχουν ίδιους στόχους μεταξύ τους, χωρίς να είναι εκ των προτέρων γνωστοί οι στόχοι αυτοί. Οι διαδικασίες που εμπλέκονται στην Μηχανική Μάθηση είναι παρόμοιες με αυτές της εξόρυξης δεδομένων και της πρότυπης μοντελοποίησης. Σε όλες τις παραπάνω απαιτείται έρευνα σε όγκους δεδομένων με σκοπό την εύρεση προτύπων, και επαναπροσδιορισμού των ενεργειών του προγράμματος αναλόγως (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek 2010).

Ο Πίνακας 4 που ακολουθεί είναι ένας συνοπτικός συγκριτικός πίνακας των ειδών μηχανικής μάθησης.

ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ – ΜΗ ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ – ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ		
ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΜΑΘΗΣΗ	ΜΗ ΕΠΙΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΜΑΘΗΣΗ	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα δεδομένα εισόδου επισημαίνονται.</li> <li>• Χρησιμοποιεί σύνολο εκπαίδευσης.</li> <li>• Χρησιμοποιείται για πρόβλεψη.</li> <li>• Κατηγοριοποίηση και παλινδρόμηση.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τα δεδομένα εισόδου δεν επισημαίνονται.</li> <li>• Χρησιμοποιεί μόνο το σύνολο δεδομένων.</li> <li>• Χρησιμοποιείται για ανάλυση.</li> <li>• Συσταδοποίηση και μετασχηματισμός δεδομένων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Παίρνει αποφάσεις με βάση την πείρα που έχει αποκτήσει.</li> <li>• Δύσκολες αποφάσεις για περίπλοκα προβλήματα.</li> <li>• Συστήματα ανταμοιβής.</li> </ul>



**Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας επιβλεπόμενης, μη επιβλεπόμενης και ενισχυτικής μάθησης (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek 2010).**

### 3.1.3 Βασικές εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης

Όλοι οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης δέχονται κάποιον τύπο δεδομένων σαν είσοδο, αλλά επιτυγχάνουν διαφορετικό σκοπό. Ανάλογα με αυτό τον σκοπό, κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

**Ταξινόμηση (Classification)** με την οποία και ασχολήθηκα στην εργασία

Ο σκοπός των αλγορίθμων ταξινόμησης είναι να αναγνωρίσουν και να ταξινομήσουν δείγματα, ανάλογα με την τάξη στην οποία ανήκουν. Ένα γνωστό παράδειγμα, είναι εικόνες διαφορετικών ζώων, όπου το σύστημα καλείται να τα ταξινομήσει ανάλογα με το είδος τους, λόγω χάρη σε γάτες, σκύλους, πρόβατα κτλ. Στην πράξη, αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να ταξινομήσουν φωνή (voice classification), ή να αναγνωρίσουν αντικείμενα (object recognition) (Breiman, 1984). Στις περισσότερες περιπτώσεις το πλήθος των κλάσεων είναι εκ των προτέρων γνωστό και μπορεί να είναι από δύο μέχρι μερικές χιλιάδες. Οι περιπτώσεις στις οποίες οι κλάσεις (ή κατηγορίες) είναι δύο, ονομάζονται και δυο-κλάσεων (two-class) ή δυαδικά (binary) προβλήματα ταξινόμησης. Πρόκειται για μια διαδικασία μάθησης με επίβλεψη, αφού ο αλγόριθμος απαιτείται να εκπαιδευτεί πρώτα με σύνολα δεδομένων εισόδου, και τις αντίστοιχες κλάσεις στις οποίες ανήκουν (labels). Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ελεγχθεί η ικανότητα σωστής πρόβλεψης ενός μοντέλου ταξινόμησης, όμως ο πιο κοινός είναι ο υπολογισμός της ακρίβειας (accuracy) της ταξινόμησης. Η ακρίβεια είναι το ποσοστό των σωστών προβλέψεων προς τις συνολικές προβλέψεις του μοντέλου.

**Παλινδρόμηση (Regression)**

Τα μοντέλα παλινδρόμησης (linear regression, regression trees, support vector regression, κ.α.) έχουν σκοπό να υπολογίσουν μια συνάρτηση ( $f$ ) που θα αντιστοιχίζει συνεχείς τιμές εξόδου ( $y$ ) βάσει ενός συνόλου παραμέτρων που δέχονται ως είσοδο ( $x$ ). Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος μπορεί δοθέντων συνόλων δεδομένων για την ατμοσφαιρική πίεση, την υγρασία και το υψόμετρο μια περιοχής, να εξαγάγει τιμές

για την θερμοκρασία στην περιοχή αυτή. Αποτελεί επίσης διαδικασία μάθησης με επίβλεψη, αφού για να εκπαιδευτεί το μοντέλο χρειάζεται σύνολο δεδομένων εισόδου και εξόδου (πχ τιμές για πίεση, υγρασία, υψόμετρο και θερμοκρασία για το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης) (Sugeno, Yasukawa, 1993).

### **Ομαδοποίηση (Clustering)**

Τα μοντέλα ομαδοποίησης αναθέτουν ένα σύνολο χαρακτηριστικών/ιδιοτήτων σε υποσύνολα του συνόλου δεδομένων εισόδου έτσι ώστε να μπορούν να διαχωριστούν σε ομάδες (clusters) βάσει αυτών των χαρακτηριστικών. Οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης δεν εξάγουν συνεχεία / διακριτές τιμές εντός ενός συνόλου και δεν δέχονται σύνολα τιμών εξόδου κατά την εκπαίδευση του μοντέλου. Συνεπώς πρόκειται για διαδικασία μάθησης χωρίς επίβλεψη (unsupervised) (Färber, Günnemann, Kriegel, Kröger, Müller, Schubert, Seidl, Zimek 2010).

#### **3.1.4 Πίνακας σύγχυσης**

Ο πίνακας σύγχυσης (Confusion Matrix) παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις πραγματικές και προβλεπόμενες κατηγοριοποιήσεις που πραγματοποιούνται από ένα σύστημα κατηγοριοποίησης. Η απόδοση αξιολογείται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα στη μήτρα, τα οποία συμβολίζονται TP (True Positive), FN (False Negative), FP (False Positive), TN (True Negative) όπου το κάθε ένα συμβολίζει (Sugeno, Yasukawa, 1993):

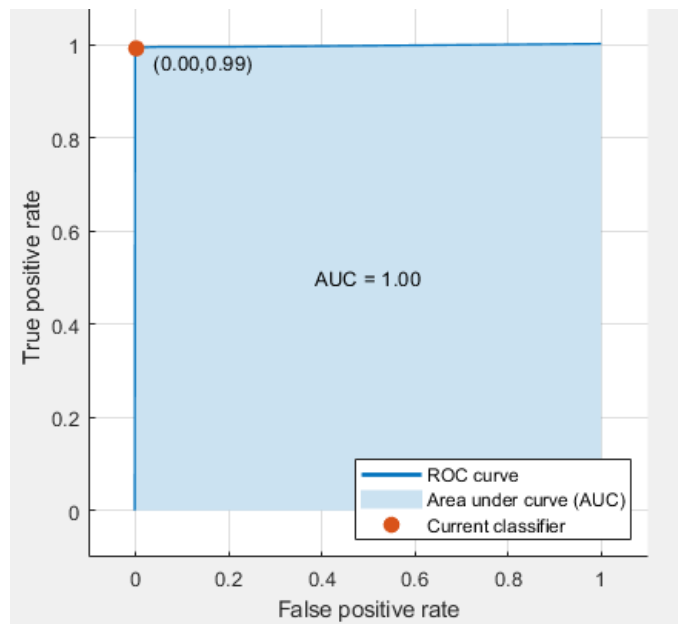
- TP: πλήθος θετικών δειγμάτων που έχουν προβλεφθεί σωστά από το μοντέλο.
- FN: πλήθος θετικών δειγμάτων που έχουν προβλεφθεί εσφαλμένα ως αρνητικά.
- FP: πλήθος αρνητικών δειγμάτων που έχουν προβλεφθεί εσφαλμένα ως θετικά.
- TN: πλήθος αρνητικών δειγμάτων που έχουν προβλεφθεί σωστά από το μοντέλο.

		Model 1.1				
		0	1	2	3	4
True Class	Overturned integral	0	0	0	0	0
	Overturned proportional	1	0	0	0	0
	Underturned integral	0	0	0	0	0
	Underturned proportional	1	0	0	0	0
Predicted Class		0	1	2	3	4

**Πίνακας 5: Παράδειγμα πίνακα σύγχυσης.**

### 3.1.5 Καμπύλη χαρακτηριστικών λειτουργίας δέκτη

Το γράφημα καμπύλης χαρακτηριστικών λειτουργίας δέκτη (Receiver Operating Characteristic - ROC) είναι ένα χρήσιμο εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση της απόδοσης του κατηγοριοποιητή, υπολογίζοντας τις ψευδείς θετικές και τις πραγματικές θετικές τιμές με τη μετατόπιση του κατωφλίου απόφασης του κατηγοριοποιητή. Η καμπύλη ROC παρόλο που εξετάζει όλα τα κατώτατα όρια για ένα δεδομένο κατηγοριοποιητή, δεν επιστρέφει την ακρίβεια και την ανάκληση, αλλά δείχνει την ψευδή θετική συχνότητα (False Positive Rate) έναντι του πραγματικού θετικού ρυθμού (True Positive Rate). Η διαγώνιος της καμπύλης ROC ονομάζεται τυχαία εικασία και τα μοντέλα τα οποία είναι κάτω από αυτή θεωρούνται χειρότερα, σε σχέση με αυτά που είναι πάνω από αυτή. Όσο ένας κατηγοριοποιητής βρίσκεται πιο κοντά στην αριστερή πάνω γωνία της καμπύλης, τόσο καλύτερος είναι αφού έχει πραγματική θετική τιμή 1 και ψευδείς θετική τιμή 0 . Αντίθετα, όσο πιο κοντά βρίσκεται το μοντέλο στη διαγώνιο, τόσο λιγότερο ακριβές είναι το μοντέλο, ενώ αν πέσει ακριβώς πάνω στη διαγώνιο τότε είναι εντελώς τυχαίο (Sugeno, Yasukawa, 1993).



Σχήμα 19: Παράδειγμα καμπύλης χαρακτηριστικών λειτουργίας δέκτη.

### 3.2 Πρόβλημα προς επίλυση της εργασίας

Το πρόβλημα που χρειάστηκε να λύσουμε είναι να κατασκευαστεί ένα αυτόνομο σύστημα μηχανικής μάθησης, που θα λαμβάνει δεδομένα εισόδου/εξόδου χωρίς να γνωρίζει το σύστημα από το οποίο αυτά προέρχονται και να προσδιορίζει εάν ο PID ελεγκτής λειτουργεί σωστά, ή χρειάζεται επιτάχυνση/επιβράδυνση κάποιος ή κάποιοι από τους όρους τους. Στην εργασία αυτή για την κατηγοριοποίηση χρησιμοποιήσαμε τα KPIs, τα οποία βρήκαμε στο κεφάλαιο 2.3.1, και στην συνέχεια έγιναν δοκιμές με όλα αυτά τα KPIs για να μας δώσει το αποτέλεσμα με την μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέλος θα πρέπει να δούμε όλες τις τεχνικές μηχανικής μάθησης και πως συμπεριφέρονται για να καταλήξουμε στην καταλληλότερη τεχνική με την μεγαλύτερη ακρίβεια και τα λιγότερα KPIs για τα δικά μας δεδομένα. Το σύστημα αυτό θα μπορεί να αναπτυχθεί αυτόνομα σε κάποια βιομηχανική διεργασία και να επιτηρεί συνεχώς τους PID ελεγκτές προτείνοντας αλλαγές όταν χρειάζεται.

### 3.3 Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

Στην εργασία αυτή και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο αυτό προσπαθούμε να βρούμε την κατάλληλη τεχνική μηχανικής μάθησης έτσι ώστε εισάγοντας σαν δεδομένα τα KPIs και την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, που βρήκαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, να παίρνουμε σαν έξοδο αν είναι καλή η απόκριση ή όχι. Αυτό έγινε με την βοήθεια του matlab και συγκεκριμένα με την εφαρμογή classification learner. Στο συγκεκριμένο πείραμα ασχοληθήκαμε μόνο με την εφαρμογή της ταξινόμησης της μηχανικής μάθησης και όλες οι παρακάτω τεχνικές αφορούν αυτήν την εφαρμογή. Στη συνέχεια θα δείξουμε αναλυτικά για κάθε μία τεχνική τα αποτελέσματα που παίρναμε πριν καταλήξουμε στην καλύτερη για το παράδειγμά μας.

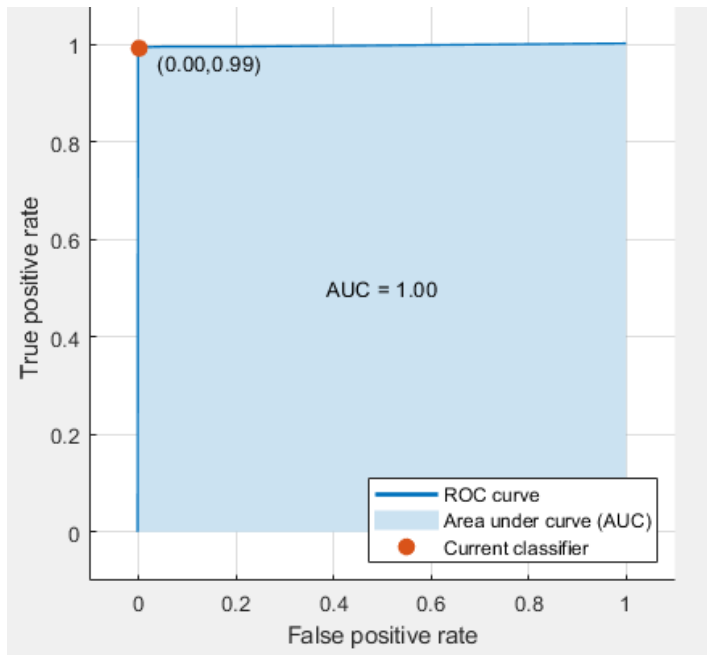
### 3.3.1 Δένδρα απόφασης (decision Trees)

Τα δέντρα ταξινόμησης είναι από τους πιο δημοφιλείς ταξινομητές στους αλγόριθμους μάθησης και έχουν εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε διάφορους τομείς, όπως στη διάγνωση ιατρικών περιστατικών κ.α. Είναι μία μέθοδος για την προσέγγιση συναρτήσεων στόχος, που έχουν ως έξοδο διακριτές τιμές. Τα δέντρα ταξινόμησης χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν, με κάποιο βαθμό ακρίβειας, την τιμή της μεταβλητής που μοντελοποιούν με βάση τις τιμές των θεωρούμενων ανεξάρτητων χαρακτηριστικών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι η ευκολία με την οποία ερμηνεύονται. Ωστόσο δεν μπορεί να χειριστεί περίπλοκες σχέσεις μεταξύ γνωρισμάτων (Breiman, 1984).

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο με ποσοστό ακρίβειας 99.6% χρησιμοποιώντας επτά KPIs . Στο Σχήμα 20 φαίνεται η καμπύλη ROC στην οποία παρατηρούμε ότι το κόκκινο σημάδι είναι κοντά στο ένα , που είναι και το επιθυμητό, και συγκεκριμένα είναι 0.99. Στο Σχήμα 21 παρατηρούμε ότι με λιγότερα KPIs βγάζουμε την ίδια ακρίβεια (99,6%) κι αυτό συμβαίνει γιατί το κάθε KPI δεν έχει την ίδια βαρύτητα στον αλγόριθμό μας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα KPI που χρησιμοποιήθηκαν είναι standard deviation PV (StdDevPV) , Percent Standard Deviation PV (perStdDevPV) και Oscillation Period (oscp).

Στο πίνακα 6 μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσα λάθη έχει κάνει ο αλγόριθμός μας αλλά και ποια ακριβώς είναι αυτά. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι από τις 900 τιμές όπου θα έπρεπε να εμφανίσει το μήνυμα «OK» το εμφάνισε 893 φορές και εμφάνισε

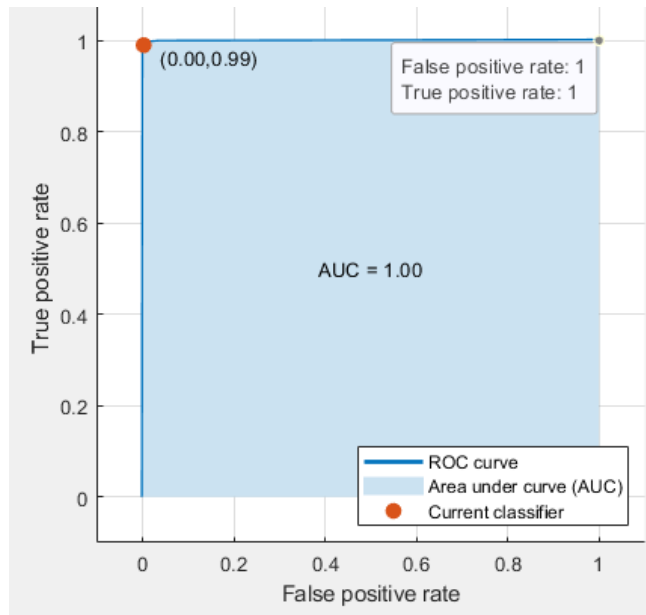
λανθασμένα 2 φορές «Overtuned proportional» και 5 φορές «Undertuned Proportional».



Σχήμα 20: Καμπύλη ROC.

	OK	893		2		5
True Class	Overtuned integral	1	899			
	Overtuned proportional		2	898		
	Undertuned integral	1			899	
	Undertuned proportional	2	2		2	894
		OK	Overtuned integral	Overtuned proportional	Undertuned integral	Undertuned proportional
		Predicted Class				

Πίνακας 6: classification matrix Fine Tree features 7/7 accuracy 99.6%.



Σχήμα 21: Καμπύλη ROC.

True Class		Predicted Class				
		OK	Overtuned integral	Overtuned proportional	Undertuned integral	Undertuned proportional
OK		891	3	2	1	3
Overtuned integral			899	1		
Overtuned proportional		1	1	898		
Undertuned integral		1			898	1
Undertuned proportional		4				896

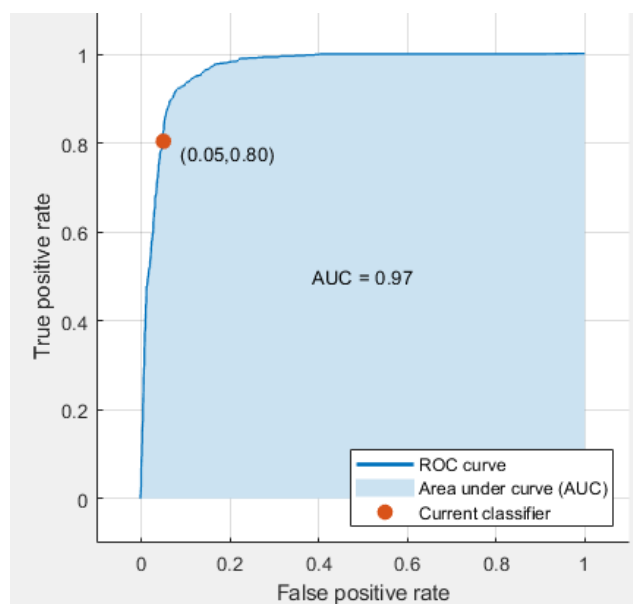
Πίνακας 7: Classification matrix Fine Tree features 3/7 accuracy 99.6%.

### 3.3.2 Μάθηση κατά Bayes (Naïve Bayes)

Ο κατηγοριοποιητής απλοϊκός Bayes (Naïve Bayes) κατηγοριοποιεί ένα δείγμα χρησιμοποιώντας το απλοϊκό μοντέλο Bayes, υποθέτοντας ότι τα γνωρίσματα είναι κατά συνθήκη ανεξάρτητα μεταξύ τους, με δεδομένη την κατηγορία. Η μάθηση του απλοϊκού μοντέλου Bayes αποδίδει πολύ καλά σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, αφού είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, ο οποίος μπορεί να κλιμακωθεί καλά σε πολύ μεγάλα προβλήματα. Τέλος, τα δεδομένα

τα οποία περιέχουν κάποιο θόρυβο δεν επηρεάζουν τον αλγόριθμο, δίνοντας έτσι απαντήσεις στο πρόβλημα της κατηγοριοποίησης (Zakharov, Jämsä-Jounela, 2014).

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο με ποσοστό ακρίβειας 88,5% χρησιμοποιώντας επτά KPIs . Στο σχήμα 22 φαίνεται η καμπύλη ROC στην οποία παρατηρούμε ότι το κόκκινο σημάδι δεν είναι κοντά στο ένα , που είναι και το επιθυμητό, και συγκεκριμένα είναι 0.80. Στο σχήμα 23 παρατηρούμε ότι με λιγότερα KPIs έχουμε λιγότερη ακρίβεια (81,8%) χρησιμοποιώντας τα ίδια KPIs με πριν (περίπτωση decision Trees). Ενώ στην περίπτωση του σχήματος 24 όπου έχουμε αλλάξει τα τρία αυτά KPI το ποσοστό ακρίβειας μεγαλώνει και μάλιστα περισσότερο από την πρώτη περίπτωση με τα επτά KPIs, κάτι που μας δείχνει πόσο σημαντικό είναι να διαλέξουμε τα σωστά KPIs για την κάθε μέθοδο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα KPI που χρησιμοποιήθηκαν είναι standard deviation PV (StdDevPV) , Average PV (AverPV) και Oscillation Period (oscp). Στο πίνακα 8 μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσα λάθη έχει κάνει ο αλγόριθμός μας αλλά και ποια ακριβώς είναι αυτά. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι από τις 900 τιμές όπου θα έπρεπε να εμφανίσει το μήνυμα «OK» το εμφάνισε 724 φορές και εμφάνισε λανθασμένα 48 φορές «Overtuned Integral», 91 φορές «Overtuned proportional», 6 φορές «Untertuned Integral» και 31 φορές «Undertuned Proportional».

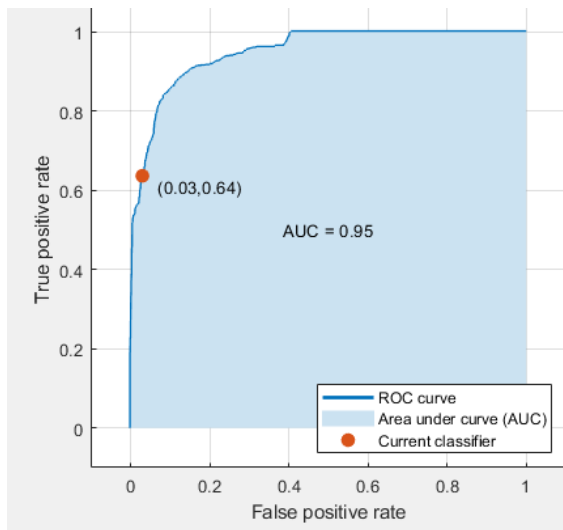


Σχήμα 22: Καμπύλη ROC.

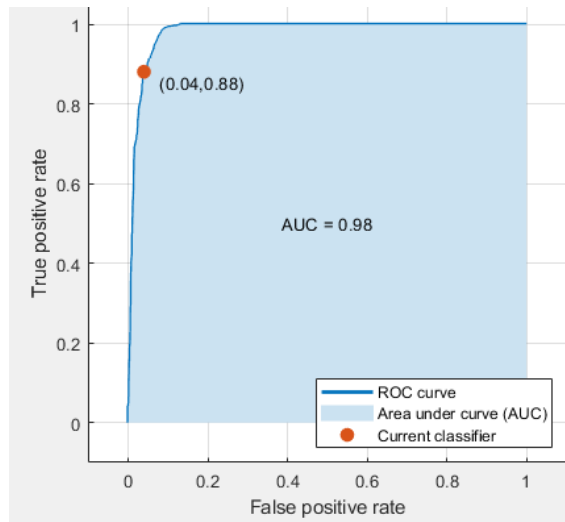


True Class	OK	724	48	91	6	31
	Overtuned integral	5	872	16		7
	Overtuned proportional	13	12	872		3
	Undertuned integral	77	14	4	777	28
	Undertuned proportional	83	39	42		736
		OK	Overtuned integral	Overtuned proportional	Undertuned integral	Undertuned proportional
		Predicted Class				

**Πίνακας 8: classification matrix Kernel naïve bayes features7/7 accuracy 88.5%.**



**Σχήμα 23: Καμπύλη ROC Kernel naïve bayes features 3/7 accuracy 81,8%.**



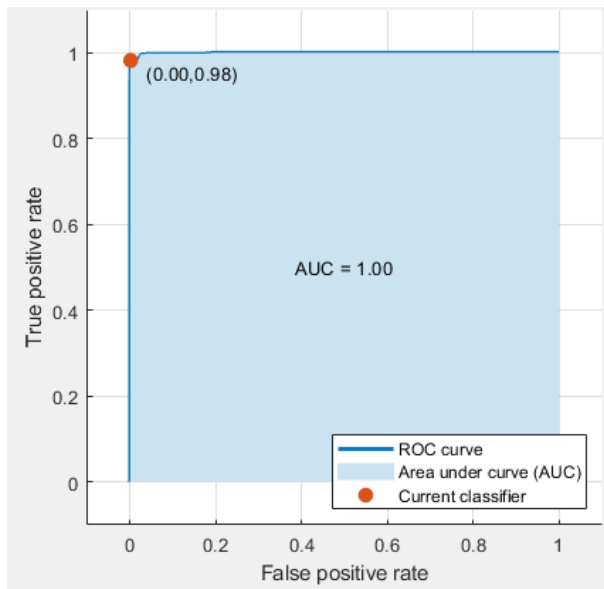
**Σχήμα 24: Καμπύλη ROC Kernel naïve bayes features 3/7 accuracy 91,7%.**

### 3.3.3 Μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης

Οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines) δημιουργήθηκαν από τον Hava Siegelmann και τον Vladimir Vapnik το 1992. Είναι μια μέθοδος διανυσματικής μάθησης η οποία σε σχέση με άλλους ταξινομητές, όπως ο αλγόριθμος Multilayer Perceptron ή ο Naive Bayes που εντοπίζουν έναν οποιοδήποτε γραμμικό διαχωριστή ή αναζητούν τον καλύτερο δυναμικό γραμμικό διαχωριστή με βάση κάποιο κριτήριο αντίστοιχα, έχουν ως στόχο τον εντοπισμό ενός ορίου απόφασης μεταξύ των κλάσεων. Το όριο αυτό πρέπει να βρίσκεται στη μέγιστη δυνατή απόσταση από οποιοδήποτε σημείο των δεδομένων εκπαίδευσης. Έστω η μηχανή εκπαίδευσης  $f(x, \alpha)$  όπου το  $\alpha$  είναι το σύνολο των παραμέτρων της συνάρτησης βασισμένο σε σημεία τα οποία αποτελούνται από το υποσύνολο των δεδομένων όπου ορίζεται η θέση του διαχωριστή. Τα σημεία αυτά ονομάζονται διανύσματα υποστήριξης. Στόχος των μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης δεν είναι η ελαχιστοποίηση του εμπειρικού κινδύνου, αλλά η ελαχιστοποίηση του ανώτερου ορίου σφάλματος γενίκευσης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρειάζεται το όριο απόφασης της μηχανικής εκπαίδευσης να έχει τη μέγιστη ελάχιστη απόσταση από το πιο κοντινό σημείο εκπαίδευσης (Zakharov, Jämsä-Jounela, 2014).

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο με ποσοστό ακρίβειας 99,4% χρησιμοποιώντας επτά KPIs. Στο σχήμα 25 φαίνεται η καμπύλη ROC στην οποία παρατηρούμε ότι το κόκκινο σημάδι δεν είναι κοντά στο ένα, που

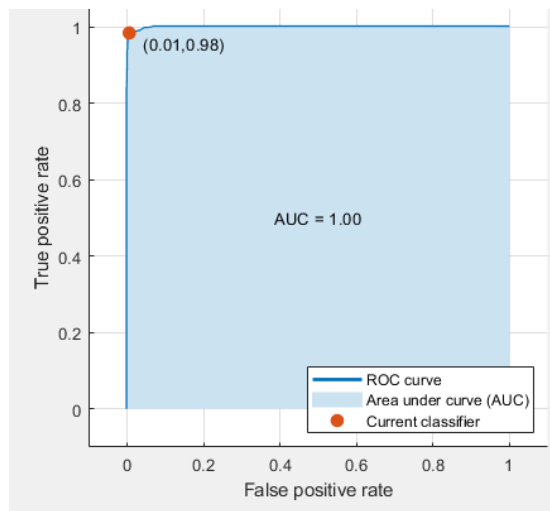
είναι και το επιθυμητό, και συγκεκριμένα είναι 0.98. Στο σχήμα 26 παρατηρούμε ότι με λιγότερα KPIs έχουμε λιγότερη ακρίβεια (99,3%) χρησιμοποιώντας τα ίδια KPIs με πριν (περίπτωση decision Trees). Στο πίνακα 9 μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσα λάθη έχει κάνει ο αλγόριθμός μας αλλά και ποια ακριβώς είναι αυτά. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι από τις 900 τιμές όπου θα έπρεπε να εμφανίσει το μήνυμα «OK» το εμφάνισε 884 φορές και εμφάνισε λανθασμένα 16 φορές «Undertuned Proportional».



Σχήμα 25: Καμπύλη ROC.

	OK	884				16
True Class	Overtuned integral	3	897			
	Overtuned proportional		3	897		
	Undertuned integral				899	1
	Undertuned proportional	2				898
		OK	Overtuned integral	Overtuned proportional	Undertuned integral	Undertuned proportional
		Predicted Class				

Πίνακας 9: classification matrix Quadratic SVM features7/7 accuracy 99.4%.



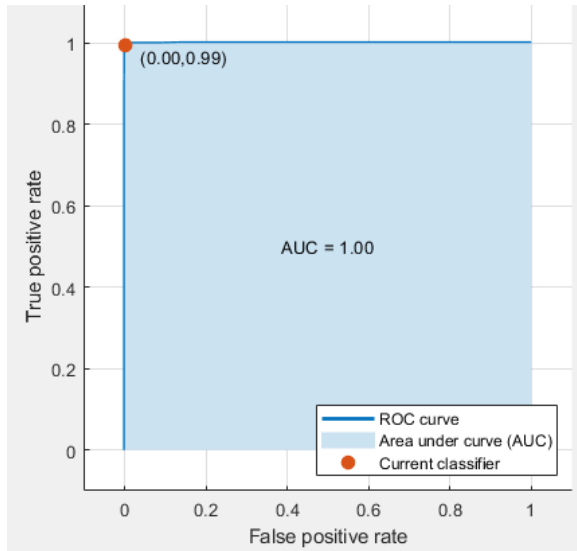
**Σχήμα 26: Καμπύλη ROC Quadratic SVM features3/7 accuracy 99.3%.**

### 3.3.4 Συλλογική μάθηση (Ensemble Learning)

Με τον όρο συλλογική μάθηση (Ensemble Learning) εννοούμε το συνδυασμό πολλαπλών μοντέλων μηχανικής μάθησης με σκοπό τη δημιουργία ισχυρότερων μοντέλων. Σε ένα φάσμα αλγορίθμων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι που έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικότεροι σε σχέση με τους άλλους για κατηγοριοποίηση και παλινδρόμηση είναι τα τυχαία δάση (Random Forests) και τα ενισχυόμενα δέντρα απόφασης (Boosted Recision Trees). Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ενδυνάμωσης (boosting) είναι βασισμένοι στη λειτουργία του σταθμισμένου συνόλου εκπαίδευσης. Το σταθμισμένο σύνολο εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται έχει ένα βάρος  $w \geq 0$ . Το βάρος αυτό αντικατοπτρίζει την πιθανότητα το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό να επιλεγεί στο σύνολο εκπαίδευσης. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάρος, τόσο μεγαλύτερη είναι η σημασία του προς την μάθηση μιας υπόθεσης (Zakharov, Jämsä-Jounela, 2014).

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο με ποσοστό ακρίβειας 99,7% χρησιμοποιώντας επτά KPIs . Στο σχήμα 27 φαίνεται η καμπύλη ROC στην οποία παρατηρούμε ότι το κόκκινο σημάδι είναι κοντά στο ένα , που είναι και το επιθυμητό, και συγκεκριμένα είναι 0.99. Στο σχήμα 28 παρατηρούμε ότι με λιγότερα KPIs έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια (99,8%) χρησιμοποιώντας τα ίδια KPIs με πριν (περίπτωση decision Trees). Στο πίνακα 10 μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσα λάθη έχει κάνει ο αλγόριθμός μας αλλά και ποια ακριβώς είναι αυτά.

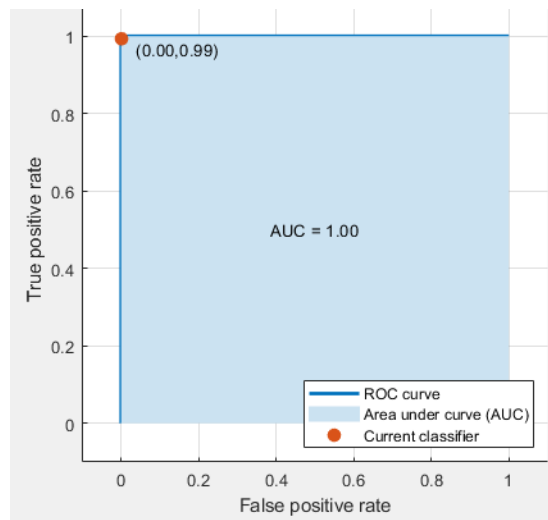
Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι από τις 900 τιμές όπου θα έπρεπε να εμφανίσει το μήνυμα «OK» το εμφάνισε 895 φορές και εμφάνισε λανθασμένα 1 φορά «Overtuned proportional» και 4 φορές «Undertuned Proportional».



Σχήμα 27: Καμπύλη ROC.

True Class	OK	895		1		4
	Overtuned integral	2	898			
	Overtuned proportional		4	896		
	Undertuned integral	1			899	
	Undertuned proportional	2	1			897
		OK	Overtuned integral	Overtuned proportional	Undertuned integral	Undertuned proportional
		Predicted Class				

Πίνακας 10: Classification matrix Ensemble bagged trees features 7/7 accuracy 99.7%.



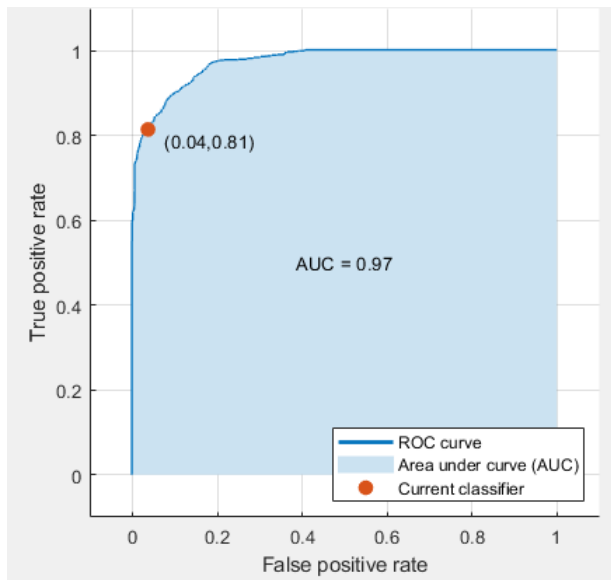
**Σχήμα 28: Καμπύλη ROC Ensemble bagged trees features 3/7 accuracy 99.8%.**

### 3.3.5 K κοντινότεροι γείτονες

Τελευταίος αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης είναι ο αλγόριθμος k κοντινότεροι γείτονες (k Nearest Neighbors – kNN), ο οποίος παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον στον τρόπο που ακολουθεί για την κατηγοριοποίηση των δεδομένων, αφού λειτουργεί διαφορετικά από τους προαναφερθέντες αλγορίθμους. Ονομάζεται επίσης και τεμπέλης αλγόριθμος (lazy algorithm) λόγω του ότι απομνημονεύει όλο το σύνολο εκπαίδευσης στη μνήμη. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ο κατηγοριοποιητής κατηγοριοποιεί αμέσως τα νέα δεδομένα εκπαίδευσης που συλλέγονται. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η εισαγωγή νέων δεδομένων για κατηγοριοποίηση αυξάνει γραμμικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου kNN ως προς την κατηγοριοποίηση ενός στοιχείου είναι οι ιδιότητες κάθε συγκεκριμένου στοιχείου που δίνεται σαν είσοδο στον αλγόριθμο να είναι παρόμοιες με τις ιδιότητες που έχουν τα άλλα σημεία, σε μια συγκεκριμένη απόσταση από αυτό. Η απόσταση αυτή ονομάζεται και “γειτονιά”, από όπου προκύπτει και το όνομα του αλγορίθμου (Zakharov, Jämsä-Jounela, 2014).

Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα από τον συγκεκριμένο αλγόριθμο με ποσοστό ακρίβειας 86,8% χρησιμοποιώντας επτά KPIs. Στο σχήμα 29 φαίνεται η καμπύλη ROC στην οποία παρατηρούμε ότι το κόκκινο σημάδι δεν είναι κοντά στο ένα, που είναι και το επιθυμητό, και συγκεκριμένα είναι 0.81. Στο σχήμα 30 παρατηρούμε ότι με λιγότερα KPIs έχουμε λιγότερη ακρίβεια (85.9%) χρησιμοποιώντας τα ίδια KPIs

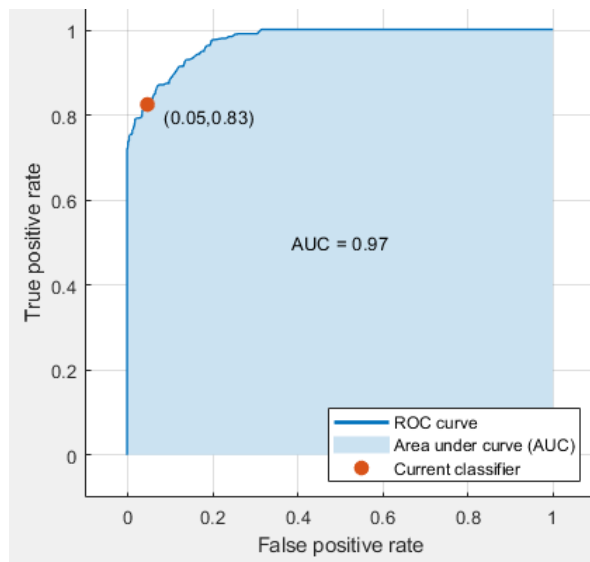
με πριν (περίπτωση decision Trees). Στο πίνακα 11 μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσα λάθη έχει κάνει ο αλγόριθμός μας αλλά και ποια ακριβώς είναι αυτά. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι από τις 900 τιμές όπου θα έπρεπε να εμφανίσει το μήνυμα «OK» το εμφάνισε 733 φορές και εμφάνισε λανθασμένα 65 φορές «Overtuned Integral», 64 φορές «Overtuned proportional» και 38 φορές «Undertuned Proportional».



**Σχήμα 29: Καμπύλη ROC.**

True Class	OK	733	65	64		38
	Overtuned integral	2	800	98		
	Overtuned proportional	19	25	850	3	3
	Undertuned integral	51	1	3	777	68
	Undertuned proportional	57	44	37	20	742
		OK	Overtuned integral	Overtuned proportional	Undertuned integral	Undertuned proportional
		Predicted Class				

**Πίνακας 11: Classification matrix coarse KNN features 7/7 accuracy 86.8%.**



**Σχήμα 30: Καμπύλη ROC coarse KNN features 3/7 accuracy 85.9%.**

### 3.4 Αποτελέσματα Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα που συλλέξαμε μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η καλύτερη τεχνική μηχανικής μάθησης είναι η Ensemble bagged trees με ποσοστό 99,7%, στην οποία χρησιμοποιήσαμε και τα επτά KPIs. Με την συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιώντας λιγότερα KPIs (3/7), δηλαδή standard deviation PV (StdDevPV) , Percent Standard Deviation PV (perStdDevPV) και Oscillation Period (oscper) η ακρίβεια ανεβαίνει στο 99.8% σε αντίθεση με την τεχνική Quadratic SVM features στην οποία παρόλο που το ποσοστό ακρίβειας είναι 99.4% με λιγότερα KPIs (3/7), πάλι τα standard deviation PV (StdDevPV) , Percent Standard Deviation PV (perStdDevPV) και Oscillation Period (oscper), μειώνεται στο 99.3%. Αυτό μας δείχνει πως με την τεχνική Quadratic SVM features για να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα χρειαζόμαστε παραπάνω από τρία KPIs. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την μέθοδο Ensemble bagged trees από τις 4500 τιμές εισόδου κατηγοριοποίησε λάθος μόνο 15 απ' αυτές ενώ με την μέθοδο Quadratic SVM features κατηγοριοποίησε λάθος 25 τιμές.



## 4 Συμπέρασμα - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### Συμπέρασμα

Οι ελεγκτές PID είναι σημαντικοί και απαραίτητοι σε βιομηχανίες καθώς και η αξιολόγηση αυτών. Ωστόσο, καθώς εξελίσσεται η επιστήμη της μηχανικής, υπάρχει πάντα δυνατότητα και κίνητρο για μεθοδολογίες που θα επιτρέψουν την αυτόματη και γρηγορότερη αξιολόγηση των ελεγκτών, όπως αναφέρουμε και παραπάνω με την μηχανική μάθηση.

Με την εργασία αυτή λοιπόν, ξεκινήσαμε με την εισαγωγή στους PID ελεγκτές, που είναι ένας μηχανισμός ανάδρασης βρόχου ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου καθώς και σε μια ποικιλία άλλων εφαρμογών που απαιτούν συνεχή έλεγχο, την ιστορία τους, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν αλλά και με ποιες μεθόδους τους ρυθμίζουμε.

Στη συνέχεια της εργασίας και με την βοήθεια του Matlab δημιουργήσαμε μία προσομοίωση ενός συστήματος με έναν PID ελεγκτή για να μπορέσουμε να τον κουρδίσουμε, να βρούμε την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, με ποσοστό ακρίβειας 99.3%, αλλά και να κουρδίσουμε τον ελεγκτή σωστά. Αφού έγιναν όλα αυτά με την χρήση του κατάλληλου PID ελεγκτή παρατηρούμε ένα σύστημα χωρίς υπέρβαση, με γρήγορο χρόνο ανύψωσης και καθόλου μόνιμο σφάλμα. Καταλαβαίνουμε έτσι πόσο σημαντικό ρόλο παίζει ένας σωστά ρυθμισμένος ελεγκτής στο σύστημά μας.

Τέλος ασχοληθήκαμε με την μηχανική μάθηση και συγκεκριμένα με την μέθοδο ταξινόμησης (classification) και διάφορες τεχνικές πάνω σε αυτή την μέθοδο. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές και αλλάζοντας συνέχεια τα KPIs παρατηρήσαμε ότι το κάθε KPI έχει βαθμό βαρύτητας πάνω στην τεχνική οπότε για την κάθε τεχνική που χρησιμοποιείς πρέπει να βρεις και ποια είναι τα κατάλληλα KPIs που θα χρησιμοποιήσεις για να έχεις το σωστό επιθυμητό αποτέλεσμα. Στα δικά μας δεδομένα η καλύτερη τεχνική με ποσοστό ακρίβειας 99.8% είναι η Ensemble bagged trees και χρησιμοποιώντας μόνο τρία από τα επτά KPIs τα οποία είναι standard deviation PV (StdDevPV) , Percent Standard Deviation PV (perStdDevPV) και Oscillation Period (oscper).

### **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Στην συγκεκριμένη εργασία ασχοληθήκαμε με την μηχανική μάθηση με την μέθοδο της ταξινόμησης, χρησιμοποιώντας μια βιβλιοθήκη από δεδομένα εισόδου/εξόδου που δημιουργήσαμε εμείς με την βοήθεια του matlab και τους αντίστοιχους KPIs. Για μελλοντική έρευνα, το επόμενο βήμα θα ήταν να εξετάσουμε πως ανταποκρίνονται οι τεχνικές αυτές σε πραγματικά δεδομένα και ποια τεχνική θα δώσει την μεγαλύτερη ακρίβεια με τα λιγότερα δυνατά KPIs σε δεδομένα που εισάγουμε για πρώτη φορά.

## 5 Βιβλιογραφία

Bennett, Stuart (1992). A history of control engineering, 1930-1955. IET. ISBN 978-0-86341-299-8.

Bennett, Stuart (June 1986). A history of control engineering, 1800-1930. IET. ISBN 978-0-86341-047-5.

Tim Wescott (October 2000). “PID without a PhD” (PDF). EE Times-India.

Ang, K.H., Chong, G.C.Y., and Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology, IEEE Trans Control Systems Tech, 13(4). <http://eprints.gla.ac.uk/3817/1/IEEE3.pdf>

Atherton, Drek P (December 2014). “Almost Six Decades in Control Engineering”. Control Systems, IEEE. doi:10.1109/MCS.2014.2359588.

Li, Y., et al. (2004) CAutoCSD - Evolutionary search and optimisation enabled computer automated control system design, Int J Automation and Computing, vol. 1, No. 1. ISSN 1751-8520. [http://userweb.eng.gla.ac.uk/yun.li/ga\\_demo/](http://userweb.eng.gla.ac.uk/yun.li/ga_demo/)

Jinghua Zhong (Spring 2006). “PID Controller Tuning: A Short Tutorial” (PDF). Retrieved 2011-04-04.

Y Li, KH Ang, GCY Chong, Patents, software, and hardware for PID control: An overview and analysis of the current art, Control Systems, IEEE, 26 (1). <http://eprints.gla.ac.uk/3816/1/IEEE2pdf.pdf>

Cooper, Douglas. “PI Control of the Heat Exchanger”. Practical Process Control by Control Guru. Retrieved 2014-02-27.

King, Myke (2010). Process Control: A Practical Approach. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-97587-9.

Tan, Kok Kiong; Wang Qing-Guo; Hang Chang Chieh (1999). Advances in PID Control. London, UK: Springer-Verlag. ISBN 1-85233-138-0.

Liptak, Bela (1995). Instrument Engineers’ Handbook: Process Control. Radnor, Pennsylvania: Chilton Book Company. ISBN 0-8019-8242-1.

May, G., Taisch, M., Prabhu, V. V., Barletta, I. (2013). Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art, Gaps and Industrial Needs. IFIP International Federation for Information Processing 2013.

Bennett, Stuart (1996). “A brief history of automatic control” (PDF). IEEE Control Systems Magazine (IEEE) 16 (3). doi:10.1109/37.506394.

Richard E. Bellman (December 8, 2015). “Adaptive Control Processes: A Guided Tour”. Princeton University Press.

Tim Wescott (October 2000). “PID without a PhD”. EE Times-India.

Karl-Johan Åström and Tore Hägglund. “PID Controllers: Theory, Design and Tuning”. Instrument Society of America, 2 edition, 1995.

Ogata, Katsuhiko. “Modern Control Engineering”, 5th Edition : ISBN 0136156738.

Ines Färber, Stephan Günemann, Hans-Peter Kriegel, Peer Kröger, Emmanuel Müller, Erich Schubert, Thomas Seidl, Arthur Zimek (2010).”On Using Class-Labels in Evaluation of Clusterings”. In Xiaoli Z. Fern, Ian Davidson, Jennifer Dy. MultiClust: Discovering, Summarizing, and Using Multiple Clusterings. ACM SIGKDD.

MacQueen, J. B. (1967). Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, University of California Press.

M. Bauer, K.S. Brooks, C. Sandrock, Industry expectations and academic practice in control engineering education – a South African survey, in: IFAC World Congress, Cape Town, August 2014, 2014.

M. Jelali, Control Performance Management in Industrial Automation, Springer, Berlin, 2013.

D. Ender Process control performance: not as good as you think Control Eng., (1993)

B. Huang, S.L. Shah Performance Assessment of Control Loops Springer, Berlin (1999).

N. Gershenfeld The Nature of Mathematical Modeling, Cambridge University Press, Cambridge (1999)

R. Ortega Some remarks on adaptive neuro-fuzzy systems Internat. J. Adapt. Control Signal Process., 10 (1996)

Astrom, K. J. and T. Hagglund (1984a). Automatic tuning of simple regulators. In Proc. IFAC 9th World Congress. o Budapest, Hungary

Gawthrop, P. J. and P. E. Nomikos (1990). Automatic tuning of commercial PID controllers for single-loop and multiloop applications. IEEE Control Syst. Mag.

Radke, F. and R. Isermann (1987). A parameter-adaptive PID-controller with stepwise parameter optimization. Automatica.

Åström, K.J. and Hägglund, T. (2006) Advanced PID Control, ISA, USA.

K. J. Astrom, U. Borisson, L.Ljung and B.Wittenmarkt. Theory and Applications of Self-Tuning Regulators, (1977).

J. Holst Local convergence properties for some recursive estimation algorithms. Dept. of Automatic Control, Lund Institute of Technology, to appear ( 1977).

B. Wittenmarkt Self-tuning regulator. TFRT-3054, Dept. of Automatic Control, Lund Institute of Technology (1973).

Diaz-Rodriguez, I.D., Oliveira, V.A., and Bhattacharyya, S.P. (2015). Modern design of classical controllers: digital PID controllers. In 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), IEEE.

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2101/2101.02939.pdf>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318304701>

<https://www.masibus.com/controllers/digital-process-controllers/auto-tune-pid-controller-lc5296v-at/>

<https://www.indiamart.com/proddetail/self-tune-controllers-18583227130.html>

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.126.6246&rep=rep1&type=pdf>

## Παράρτημα

### A.1 Matlab κώδικας αναφερόμενος στα κεφάλαια 3 και 4

`%eisagwgh dedomenwn (PV,SP,MV) apo to simulink`

```
simout=sim('first_try2');
```

```
PV=simout.PV;
```

```
SP=simout.SP;
```

```
MV=simout.MV;
```

```
t=[0:1:PV.Time(end)];
```

```
xp=[0:1:PV.Time(end)];
```

```
PV1=interp1(PV.Time,PV.Data,xp,'linear');
```

```
MV1=interp1(MV.Time,MV.Data,xp,'linear');
```

```
SP1=interp1(SP.Time,SP.Data,xp,'linear');
```

```
PV1=PV1';
```

```
MV1=MV1';
```

```
SP1=SP1';
```

```
PV1=timeseries(PV1,t);
```

```
MV1=timeseries(MV1,t);
```

```
SP1=timeseries(SP1,t);
```

`%ypologismos Std Dev PV(sdPV1)`

```
function out=std_dev_PV1(PV1,SP1,MV1)
```

```
K=SP1.data-PV1.data;
```

```
out=std(K);
```

```
end
```

`%ypologismos average PV1`

```
function out=average_PV1(PV1)
```

```
out=mean(PV1.data);
```

```
end
```

```
%ypologismos percent std dev PV1
```

```
function out=percent_std_dev_PV1(averPV1,sdPV1)
```

```
if averPV1 > 0.0001
```

```
out=sdPV1/averPV1;
```

```
else
```

```
    averPV1=0.00001;
```

```
    out = sdPV1/averPV1;
```

```
end
```

```
end
```

```
%ypologismos average OP
```

```
function out=average_OP(MV1)
```

```
out=mean(MV1.data);
```

```
end
```

```
%ypologismos Std Dev OP(sdOP)
```

```
function out=std_dev_OP(PV1,SP1,MV1)
```

```
out=std(MV1.data);
```

```
end
```

```
%Sp1 changes in Automatic
```

```
function out=SP1_changes(SP1)
```

```
    c=0;
```

```
    for i=1:length(SP1.data(:))-1
```

```
        b=SP1.data(i+1)-SP1.data(i);
```

```
        if b~=0
```

```
            c=c+1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
    out=c;
```

```
end
```

```
function sum_MV1=getValveOverHour(MV1)

    total_sum=0;
    for i=2:length(MV1.data(:))
        %     diff=abs(MV1.data(i)-MV1.data(i-1));
        %     if diff~=0
        %         total_sum=total_sum+diff;
        %     end
        total_sum=total_sum+abs(MV1.data(i)-MV1.data(i-1));
    end
    sum_MV1=total_sum/(MV1.time(length(MV1.time(:)))/60);
    %sum_MV1=total_sum/86370;
end
```

```
function perSat=getPerSaturation(MV1,percent)
```

```
    if percent==3
        array3 = nan(length(MV1.data(:)), 1);

        for i=1:length(MV1.data(:))
            if MV1.data(i) <= 3
                array3(i,:) = MV1.time(i);
            end
        end

        first=0;
        last=0;
        diff3=0;
        check=0;
        for i=length(array3(:))-1:0
            if i~=0
                check=isnan(array3(i));
            end
        end
    end
```



```
if check==0 & first==0 & last==0
    first=i;
elseif check==0 & first~=0 & i~=0
    last=i;
elseif (check==1 | i==0) & first~=0 & last~=0
    diff3=diff3+(array3(first)-array3(last));
    first=0;
    last=0;
end
end
perSat=diff3/MV1.time(length(MV1.time(:)));

else
    array97 = nan(length(MV1.data(:)), 1);

    for i=1:length(MV1.data(:))
        if MV1.data(i) >= 97
            array97(i,:) = MV1.time(i);
        end
    end

    first=0;
    last=0;
    diff97=0;
    check=0;
    for i=length(array97(:))-1:0
        if i~=0
            check=isnan(array97(i));
        end
        if check==0 & first==0 & last==0
            first=i;
        elseif check==0 & first~=0 & i~=0
            last=i;
        end
    end
end
```

```
elseif (check==1 | i==0) & first~=0 & last~=0
    diff97=diff97+(array97(first)-array97(last));
    first=0;
    last=0;
end
end

perSat=diff97/MV1.time(length(MV1.time(:)));
end
end

% Tuning
function out=Tuning(sys,type)

%opts=pidtuneOptions('PhaseMargin',45,'DesignFocus','disturbance-rejection');
out=pidtune(sys,type);
assignin('caller','tune',out);
assignin('caller','tuning',sys);
%assignin('base','options',opts);
%disp(info)

end

%oscilation period
function T=getOscilationPeriod(PV1)

I=getOscilationIndex(PV1);

%oscilation period
if I > 0.2
    d=detrend(PV1.data);
    [~,locs]=findpeaks(d); %here the peaks of the function
    T = max(diff(locs));
else
```

```
T = 'N/A';  
end  
end  
  
function [TF sys]=getTransferFunction(PV1, MV1)  
    %Find TF with procest  
  
    k=[PV1.data MV1.data];  
  
    tfdata = iddata(k(:,1),k(:,2),1);  
  
    poles = {'P1','P2U','P3U'};  
  
    sys = procest(tfdata, poles(1));  
    percentage = sys.Report.Fit.FitPercent;  
    final_pole = poles(1);  
  
    for i=2:length(poles)  
        sys1 = procest(tfdata, poles(i));  
        temp = sys.Report.Fit.FitPercent;  
        if temp > percentage  
            sys=sys1;  
            percentage = temp;  
            final_pole = poles(i);  
        end  
    end  
    %disp(sys);  
    TF=table(final_pole, percentage);  
    assignin('base','sys',sys);  
end  
  
% Tuning  
function out=Tuning(sys,type)
```

```
%opts=pidtuneOptions('PhaseMargin',45,'DesignFocus','disturbance-rejection');
out=pidtune(sys,type);
assignin('caller','tune',out);
assignin('caller','tuning',sys);
%assignin('base','options',opts);
%disp(info)

end

%Basikos kwdikas (ypologismos KPIs,transfer function kai PID tuning)
function KPI=getKpiVariables(PV1,MV1,SP1)

    %onomasia metablhtwn

name={'sdPV1';'averPV1';'persdPV1';'averOP';'sdOP';'sp1ch';'MvOverHour';'perSat3';
perSat97';'oscInd';'oscPer';'transFuncPole';'transFuncPer';'Tune'};

    %Emfanish std dev PV1 (stdPV1)
sdPV1=std_dev_PV1(PV1,SP1,MV1);

    %emfanish average PV1
averPV1=average_PV1(PV1);

    %emfanish percent std dev PV1
persdPV1=percent_std_dev_PV1(averPV1,sdPV1);

    %emfanish average OP
averOP=average_OP(MV1);

    %emfanish std dev OP
sdOP=std_dev_OP(PV1,SP1,MV1);

    %emfanish SP1 changes
sp1ch=SP1_changes(SP1);
```

```
%emfanish Valve Travel Index Over an Hour
```

```
MvOverHour=getValveOverHour(MV1);
```

```
%emfanish Percent Saturation gia <= 3%
```

```
perSat3=getPerSaturation(MV1, 3);
```

```
%emfanish Percent Saturation gia >= 97%
```

```
perSat97=getPerSaturation(MV1, 97);
```

```
%emfanish Oscillation Index
```

```
oscInd=getOscillationIndex(PV1);
```

```
%emfanish Oscillation Period
```

```
oscPer=getOscillationPeriod(PV1);
```

```
%emfanish Transfer Function
```

```
[transFunc sys]=getTransferFunction(PV1,MV1);
```

```
transFuncPole = char(transFunc.final_pole);
```

```
transFuncPer = transFunc.percentage;
```

```
%Tuning PID
```

```
type='PI';
```

```
Tune=Tuning(sys,type);
```

```
value={sdPV1;averPV1;persdPV1;averOP;sdOP;sp1ch;MvOverHour;perSat3;perSat9
```

```
7;oscInd;oscPer;transFuncPole;transFuncPer;Tune};
```

```
KPI=table(name,value);
```

```
assignin('caller','KPI',KPI);
```

```
end
```

