



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα  
**Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

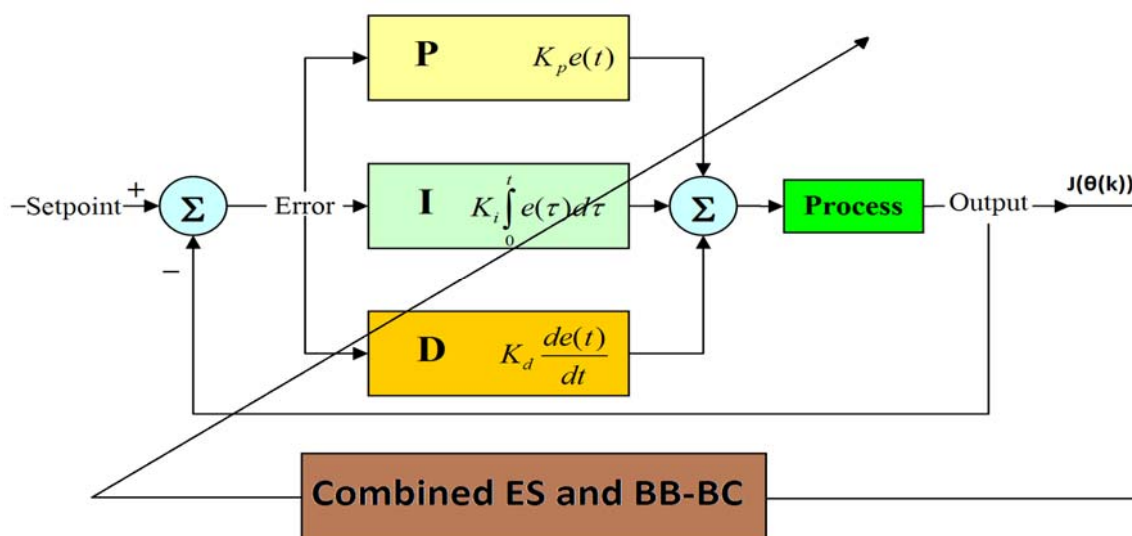
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Αυτοματισμού

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ PID ΚΑΙ ΑΣΑΦΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

EXTREMUM SEEKING ΚΑΙ BIG BANG-BIG CRUNCH»



ΔΑΡΑΚΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΙΑ΄

A.M. 36929

Επιβλέπων:

Δρ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΝΤΟΥΝΗΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΤΕΙ Πειραιά

Πειραιάς – Μάιος 2013

## Περίληψη

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί την κορύφωση των σπουδών μου στο Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά, τμήμα Αυτοματισμού και αποτελεί εργασία έρευνας και καταγραφής αποτελεσμάτων, που περιγράφουν την διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων PID και ασαφών ελεγκτών.

Με την υποστήριξη του καθηγητή μου Δρ. Αναστάσιου Ντούνη, που θα ήθελα να τον ευχαριστήσω πολύ για ακόμη μια φορά, μου δόθηκε η ευκαιρία να μάθω πρωτίστως και μετέπειτα να αναλύσω και να ερευνήσω κι άλλους τρόπους βελτιστοποίησης ελεγκτών πέραν από αυτούς που διδάχθηκα κατά την φοίτηση μου στην σχολή.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος Extremum Seeking καθώς και παραδείγματα βελτιστοποίησης ελεγκτών με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο, στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος Big Bang-Big Crunch καθώς και παραδείγματα βελτιστοποίησης ελεγκτών με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο συνδυασμός των δυο προαναφερθέντων αλγορίθμων καθώς και τα αποτελέσματά του συγκριτικά με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ES και τέλος στο κεφάλαιο τέσσερα παρουσιάζονται διάφορα συστήματα και η βελτιστοποίηση της απόκρισης της εξόδου τους με την χρήση του συνδυασμού των δύο αλγορίθμων.

Θα ήθελα να τονίσω τον χαρακτήρα της εργασίας αυτής και να επισημάνω τον σκοπό της. Σαφώς η μελέτη μου στηρίχτηκε σε επιστημονικά κείμενα, όμως το κυριότερο μέρος της εργασίας αυτής στηρίχτηκε στην υλοποίηση και εφαρμογή των θεωριών των δύο αλγορίθμων στο αριθμητικό υπολογιστικό περιβάλλον (numerical computing environment) Matlab.

## Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την ανάγκη να επισημάνω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει στη διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων και την αμέριστη και ανιδιοτελή υποστήριξή τους σε κάθε μου επιλογή.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω για ακόμη μια φορά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αναστάσιο Ντούνη για την εμπιστοσύνη και αφιέρωση πολύτιμου χρόνου ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλλαν στην εργασία αυτή προσφέροντάς μου έμπνευση, γνώση και ιδέες

# Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Περίληψη  | 2  |
| Ευχαριστίες   | 3  |
| <b>Κεφάλαιο 1°</b><br><b>Extremum Seeking</b>   | 6  |
| 1.1) Ιστορική αναδρομή  | 7  |
| 1.2) Η θεωρία του αλγορίθμου Extremum Seeking   | 8  |
| 1.3) Εφαρμογές του αλγορίθμου Extremum Seeking  | 12 |
| 1.4) Βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός PID ελεγκτή μέσω του αλγορίθμου Extremum Seeking            | 13 |
| 1.5) Παράδειγμα συντονισμού PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Extremum Seeking                           | 17 |
| 1.6) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Extremum Seeking για το κλειστό σύστημα της $G(s)$                 | 20 |
| 1.7) Παράδειγμα συντονισμού Fuzzy PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Extremum Seeking                     | 22 |
| 1.8) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Extremum Seeking για το κλειστό σύστημα της $G(s)$ με Fuzzy PID    | 26 |
| 1.9) Συμπεράσματα χρήσης του αλγορίθμου Extremum Seeking  | 28 |
| <b>Κεφάλαιο 2°</b><br><b>Big Bang-Big Crunch</b>  | 29 |
| 2.1) Η θεωρία του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch  | 30 |
| 2.2) Παράδειγμα συντονισμού PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Big Bang-Big Crunch                        | 35 |
| 2.3) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της $G(s)$              | 39 |
| 2.4) Παράδειγμα συντονισμού Fuzzy PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Big Bang-Big Crunch                  | 42 |
| 2.5) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της $G(s)$ με Fuzzy PID | 47 |
| 2.6) Συμπεράσματα χρήσης του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch   | 50 |

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Συνδυασμός των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch</b>   | <b>51</b> |
| 3.1) Η συνύπαρξη των δυο αλγορίθμων   | 52        |
| 3.2) Παράδειγμα συντονισμού PID ελεγκτή με τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch                        | 53        |
| 3.3) Αποτελέσματα του συνδυασμού των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της $G(s)$              | 57        |
| 3.4) Παράδειγμα συντονισμού Fuzzy PID ελεγκτή με τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch                  | 61        |
| 3.5) Αποτελέσματα του συνδυασμού των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της $G(s)$ με Fuzzy PID | 66        |
| 3.6) Συμπεράσματα χρήσης του συνδυασμού των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch   | 70        |

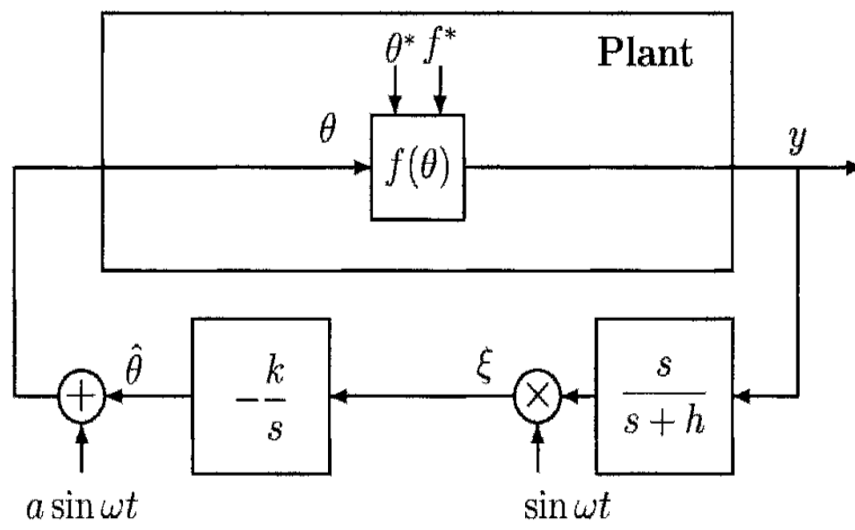
### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

#### **Βελτιστοποίηση των παραμέτρων PID και Fuzzy PID ελεγκτών διαφόρων συστημάτων**

|  |     |
|--|-----|
| 4.1) Σύστημα πρώτου βαθμού με πραγματικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή                                 | 72  |
| 4.2) Σύστημα δευτέρου βαθμού με μιγαδικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή                                 | 75  |
| 4.3) Σύστημα δευτέρου βαθμού με πραγματικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή                               | 78  |
| 4.4) Σύστημα δευτέρου βαθμού με μιγαδικούς πόλους και χρονική καθυστέρηση ελεγχόμενο από PID ελεγκτή         | 81  |
| 4.5) Σύστημα τρίτου βαθμού με μιγαδικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή                                   | 84  |
| 4.6) Σύστημα τετάρτου βαθμού με μιγαδικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή                                 | 87  |
| 4.7) Σύστημα πρώτου βαθμού με πραγματικό πόλο ελεγχόμενο από Fuzzy PID ελεγκτή                               | 90  |
| 4.8) Σύστημα δευτέρου βαθμού με πραγματικούς πόλους και χρονική καθυστέρηση ελεγχόμενο από Fuzzy PID ελεγκτή | 93  |
| Προτάσεις Περαιτέρω Βελτίωσης  | 96  |
| Παράρτημα Α  | 97  |
| Παράρτημα Β  | 100 |
| Παράρτημα Γ  | 104 |
| Βιβλιογραφία   | 111 |

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Extremum Seeking



## 1.1) Ιστορική Αναδρομή

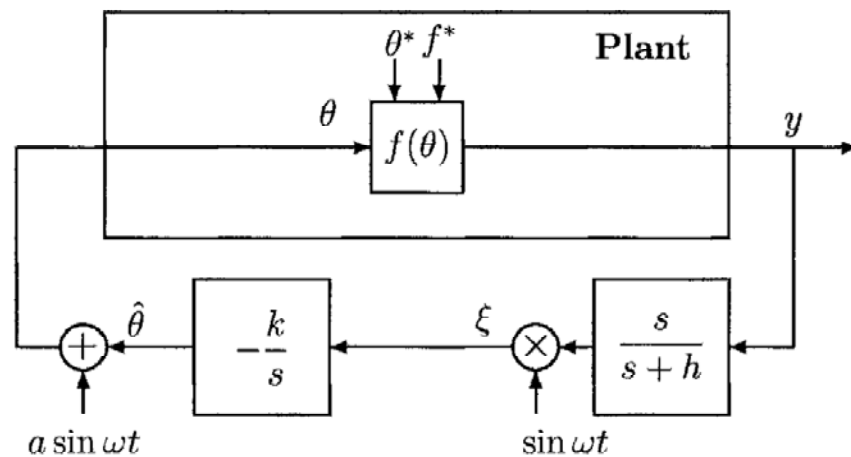
Η πρώτη τεκμηριωμένη χρήση του αλγορίθμου Extremum Seeking (ES) είναι το 1922 στην εφαρμογή του Leblanc για τα συστήματα των ηλεκτρικών σιδηροδρόμων. Στη δεκαετία του 1950 και του 1960, ο Extremum Seeking (ES) είχε ευρέως μελετηθεί και χρησιμοποιούνταν σε εφαρμογές στην πρώην Σοβιετική Ένωση και από ερευνητές στις δυτικές χώρες. Το ενδιαφέρον για τον ES αυξήθηκε ραγδαία στη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, ως μια καταγεγραμμένη έρευνα εμφανίστηκε το 1979 από τον Sternby.

Ο αλγόριθμος Extremum Seeking (ES), ήταν ένα πολύ δημοφιλές εργαλείο στις εφαρμογές ελέγχου στις δεκαετίες του 1940, 1950 και 1960, ωστόσο επανήλθε σαν ένα υπαρκτό ερευνητικό θέμα και σαν ένα εργαλείο για βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο στην δεκαετία του 1990. Ο ES είναι επίσης μια μέθοδος για προσαρμοστικό έλεγχο αλλά δεν εφαρμόζεται σε κλασσικά παραδείγματα ή μοντέλα αναφοράς και τα σχετικά διαγράμματα, τα οποία επιλύουν το πρόβλημα της *ευστάθειας* μιας γνωστής τροχιάς αναφοράς ή ενός επιθυμητού σημείου.

Μια δεύτερη διάκριση μεταξύ του κλασσικού προσαρμοστικού ελέγχου και του ES, είναι ότι ο ES δεν χρειάζεται να είναι γνωστό το μοντέλο. Γι' αυτό το λόγο, παρέχει μια αυστηρή και υψηλών επιδόσεων εναλλακτική στις μεθόδους ελέγχου, με την συμμετοχή των Νευρωνικών Δικτύων (Neural Network). Ο αγνώστου-μοντέλου χαρακτήρας του εξηγεί και την αναζωπύρωση στην δημοτικότητα του αλγορίθμου την τελευταία δεκαετία του περασμένου αιώνα. Τελευταίες έρευνες έγιναν πάνω σε συστήματα ρευστομηχανικής, καύσης και βιομετρικά συστήματα τα οποία όλα χαρακτηρίζονται από πολύπλοκα και ασταθή μοντέλα.

## 1.2) Η θεωρία του αλγορίθμου Extremum Seeking

Ο αλγόριθμος Extremum Seeking (ES) είναι εφαρμόσιμος σε περιπτώσεις που υπάρχει μη-γραμμικότητα και η μη-γραμμικότητα έχει ένα τοπικό ελάχιστο ή μέγιστο. Η μη-γραμμικότητα μπορεί να βρίσκεται στο ίδιο το σύστημα, ως μια φυσική μη-γραμμικότητα, που να κάνει την εμφάνιση της μέσω ενός χάρτη ισορροπίας (equilibrium map), ή μπορεί να υπάρχει στο αντικείμενο ελέγχου που προστίθεται στο σύστημα μέσω μιας συνάρτησης κόστους του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ως εκ τούτου, κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει τον αλγόριθμο Extremum Seeking (ES) και για να ορίσει μια επιθυμητή τιμή ώστε να πετύχει μια βέλτιστη έξοδο, αλλά και για να ρυθμίσει παραμέτρους ενός συστήματος με ανάδραση. Οι παράμετροι που θα ρυθμιστούν μπορεί να αποτελούνται από πολλές μεταβλητές.



Εικόνα 1.1: Βασικό διάγραμμα ελέγχου του Extremum Seeking, όπου το Plant είναι το ελεγχόμενο σύστημα



| Σύμβολο        | Επεξήγηση   |
|----------------|---|
| $y$            | Η έξοδος η οποία ελαχιστοποιείται                             |
| $f^*$          | Ελάχιστη τιμή της εξόδου                                      |
| $f''$          | Η δεύτερη παράγωγος (Εάν θετική το $f(\theta)$ έχει ελάχιστο) |
| $\theta^*$     | Η άγνωστη βέλτιστη είσοδος                                    |
| $\hat{\theta}$ | Η εκτίμηση της άγνωστης βέλτιστης εισόδου                     |
| $k$            | Το εκτιμώμενο κέρδος του ολοκληρωτή $1/s$ (θετικό)            |
| $a$            | Το πλάτος της διαταραχής του σήματος ελέγχου                  |
| $\omega$       | Η συχνότητα του σήματος ελέγχου                               |
| $h$            | Η συχνότητα αποκοπής του washout φίλτρου                      |
| +/X            | Διαμόρφωση/Αποδιαμόρφωση                                      |

Η εικόνα 1.1 δείχνει ένα βασικό διάγραμμα βρόγχου του Extremum Seeking. Υποθέτουμε ένα  $f(\theta)$  τις μορφής:

$$f(\theta) = f^* + \frac{f''}{2}(\theta - \theta^*)^2 \quad (\text{Εξίσωση 1.1})$$

όπου το  $f'' > 0$ . Κάθε συνάρτηση  $f(\theta)$  που ανήκει στο  $C^2$  μπορεί να προσεγγιστεί τοπικά από την εξίσωση (1.1). Η υπόθεση ότι το  $f'' > 0$  έγινε χωρίς βλάβη της γενικότητας. Εάν το  $f'' < 0$ , τότε πολύ απλά αντικαθιστάμε στην εικόνα 1.1 το  $k$  ( $k > 0$ ) με  $-k$ . Ο σκοπός του αλγορίθμου είναι να κάνει το  $\theta - \theta^*$  όσο το δυνατόν μικρότερο, ώστε η έξοδος  $f(\theta)$  να οδηγηθεί στο ελάχιστό της  $f^*$ .

Το σήμα της διαταραχής  $a \sin(\omega t)$  που προστίθεται στο σύστημα βοηθάει στο μέτρημα την κλίση του  $f(\theta)$ . Μια στοιχειώδης διαισθητική εξήγηση του πώς «δουλεύει» το διάγραμμα παρατίθεται παρακάτω.

Ξεκινάμε τονίζοντας ότι το  $\hat{\theta}$  στην εικόνα 1.1 υποδηλώνει την εκτίμηση της άγνωστης βέλτιστης εισόδου του  $\theta^*$ . Οπότε έχουμε

$$\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$$

το οποίο δηλώνει το εκτιμώμενο κόστος. Έτσι,

$$\theta - \theta^* = a \sin(\omega t) - \tilde{\theta}$$

το οποίο, όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση (1.1), μας δίνει

$$y = f^* + \frac{f''}{2} (\tilde{\theta} - a \sin(\omega t))^2 \quad (\text{Εξίσωση 1.2})$$

Επεκτείνοντας περισσότερο αυτήν την έκφραση της εξίσωσης και χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα  $2 \sin^2(\omega t) = 1 - \cos(2\omega t)$ , παίρνουμε

$$y = f^* + \frac{f''}{2} \tilde{\theta}^2 - af''\tilde{\theta} \sin(\omega t) + \frac{a^2 f''}{2} \sin^2(\omega t) \quad (\text{Εξίσωση 1.3})$$

$$= f^* + \frac{a^2 f''}{4} + \frac{f''}{2} \tilde{\theta}^2 - af''\tilde{\theta} \sin(\omega t) + \frac{a^2 f''}{4} \cos(2\omega t) \quad (\text{Εξίσω 1.4})$$

Το washout (υψηπερατό-high pass filter) φίλτρο

$$\frac{s}{s+h}$$

εφαρμόζεται στην έξοδο, για να απομακρύνει το  $f^*$ , ήτοι

$$\frac{s}{s+h} [y] \approx \frac{f''}{2} \tilde{\theta}^2 - af''\tilde{\theta} \sin(\omega t) + \frac{af''}{4} \cos(2\omega t) \quad (\text{Εξίσωση 1.5})$$

Το σήμα στην συνέχεια «αποδιαμορφώνεται» με τον πολλαπλασιασμό του  $\sin(\omega t)$ , το οποίο μας δίνει

$$\xi \approx \frac{f''}{2} \tilde{\theta}^2 \sin(\omega t) - af''\tilde{\theta} \sin^2(\omega t) + \frac{a^2 f''}{4} \cos(2\omega t) \sin(\omega t) \quad (\text{Εξίσωση 1.6})$$

Όπως βλέπουμε, στην δεξιά μεριά της εξίσωσης και πιο συγκεκριμένα την DC συνιστώσα (ή σταθερά) στο  $\sin^2(\omega t)$ , είναι κρίσιμο. Εφαρμόζοντας και πάλι την τριγωνομετρική ταυτότητα  $2 \sin^2(\omega t) = 1 - \cos(2\omega t)$ , καθώς επίσης και την τριγωνομετρική ταυτότητα

$$2 \cos(2\omega t) \sin(\omega t) = \sin(3\omega t) - \sin(\omega t),$$

καταλήγουμε στο ότι

$$\xi \approx -\frac{af''}{2}\tilde{\theta} + \frac{af''}{2}\tilde{\theta}\sin(2\omega t) + \frac{a^2f''}{8}(\sin(\omega t) - \sin(3\omega t)) + \frac{f''}{2}\tilde{\theta}^2\sin(\omega t)$$

(Εξίσ 1.7)

Τονίζουμε ότι επειδή το  $\theta^*$  είναι σταθερό,

$$\tilde{\theta} = -\hat{\theta}$$

άρα παίρνουμε

$$\tilde{\theta} \approx \frac{k}{s} \left[ -\frac{af''}{2}\tilde{\theta} + \frac{af''}{2}\tilde{\theta}\cos(2\omega t) + \frac{a^2f''}{8}(\sin(\omega t) - \sin(3\omega t)) + \frac{f''}{2}\tilde{\theta}^2\sin(\omega t) \right]$$

(Εξίσωση 1.8)

Πρώτα από όλα παραλείπουμε τον τελευταίο όρο επειδή είναι τετράγωνο του  $\tilde{\theta}$  και εμείς ενδιαφερόμαστε μόνο για τοπική ανάλυση:

$$\tilde{\theta} \approx \frac{k}{s} \left[ -\frac{af''}{2}\tilde{\theta} + \frac{af''}{2}\tilde{\theta}\cos(2\omega t) + \frac{a^2f''}{8}(\sin(\omega t) - \sin(3\omega t)) \right] \quad (\text{Εξ. 1.9})$$

Οι δύο τελευταίοι όροι είναι σήματα υψηλών συχνοτήτων. Όταν περνούν από ένα ολοκληρωτή, εξασθενούν πλήρως. Έτσι, τους παραλείπουμε, παίρνοντας

$$\tilde{\theta} \approx \frac{k}{s} \left[ -\frac{af''}{2}\tilde{\theta} \right] \quad (\text{Εξίσωση 1.10})$$

ή

$$\tilde{\theta} \approx -\frac{kaf''}{s}\tilde{\theta} \quad (\text{Εξίσωση 1.11})$$

Αφού το  $kf'' > 0$ , τότε το σύστημα είναι ευσταθές. Έτσι φθάνουμε στο συμπέρασμα ότι το  $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ , ή, με όρους πραγματικών προβλημάτων,  $\hat{\theta}(t)$  συγκλίνει πολύ κοντά στο  $\theta^*$ .

Ρίχνοντας μια ματιά στην ανάλυση που μόλις κάναμε, είναι πολύ σημαντικό να τονίσουμε ότι οι προσεγγίσεις μας ευσταθούν μόνο όταν η γωνιακή συχνότητα  $\omega$  είναι μεγάλη (σε μια ποιοτική έννοια) συγκριτικά με τα  $k, a, h$  και  $f''$ .

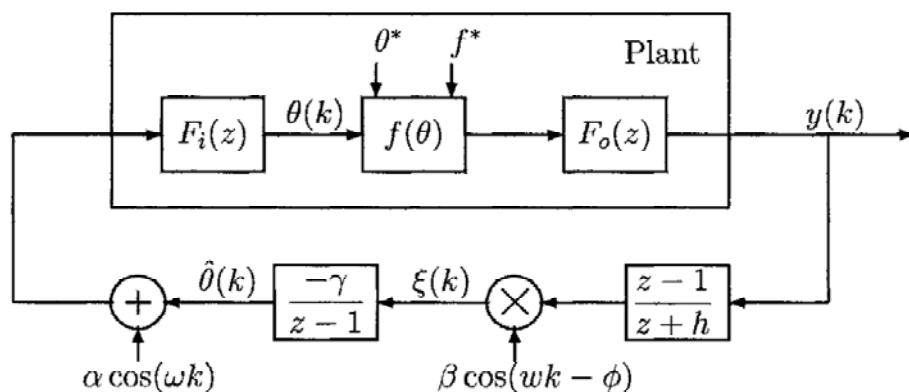
### 1.3) Εφαρμογές του αλγορίθμου Extremum Seeking

Ο αλγόριθμος Extremum Seeking έχει πολυάριθμες εφαρμογές. Κάποιες εξ' αυτών είναι στα συστήματα αντιμπλοκαρίσματος τροχών (Anti-lock braking, ABS) όπου σκοπός του αλγορίθμου είναι να βρει την βέλτιστη τιμή της δύναμης τριβής (friction force) [1]. Μια επιπλέον εφαρμογή είναι στους βιοαντιδραστήρες (bioreactors) όπου σκοπός του αλγορίθμου είναι η βελτιστοποίηση της παραγωγής μικρό-οργανισμών, δηλαδή πρακτικά στην μεγιστοποίηση του αριθμού της βιομάζας που συλλέγεται σε μια μονάδα χρόνου [1]. Μια αρκετά πρωτοποριακή εφαρμογή του είναι στα θερμοακουστικά συστήματα ψύξης (Thermoacoustic Coolers) όπου σκοπός του αλγορίθμου είναι να εντοπίσει την βέλτιστη τιμή της ροής μετά την αύξηση της ροής στην κρύα μεριά [6]. Τέλος μια ακόμα εφαρμογή, ή οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα στο παρακάτω κεφάλαιο, είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελεγκτή PID.

## 1.4) Βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός PID ελεγκτή μέσω του αλγορίθμου Extremum Seeking

Αν και οι PID ελεγκτές χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία, η αποτελεσματικότητά τους είναι συχνά περιορισμένη λόγω της κακής ρύθμισης των παραμέτρων τους. Η ρύθμιση των PID ελεγκτών στο χέρι, το οποίο απαιτεί βελτιστοποίηση των τριών παραμέτρων, είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία, πολλή προσπάθεια έχει επενδυθεί στην ανάπτυξη συστηματικών μεθόδων συντονισμού. Πολλές από αυτές τις μεθόδους βασίζονται σε γνώση του μοντέλου ή απαιτούν ειδικά πειράματα για να προσδιορίσει ένα κατάλληλο μοντέλο. Ωστόσο, σε πολλές καταστάσεις το μοντέλο δεν είναι γνωστό, και δεν είναι επιθυμητό να ανοίξουμε τον βρόχο της διαδικασίας για την αναγνώριση του συστήματος. Έτσι, μια μέθοδος για την ρύθμιση των παραμέτρων του PID εντός ενός κλειστού βρόγχου έχει πολλά πλεονεκτήματα.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε μια μέθοδο για τη βελτιστοποίηση της βηματικής απόκρισης ενός συστήματος κλειστού βρόγχου που αποτελείται από ένα ελεγκτή PID, αγνώστου μοντέλου, χρησιμοποιώντας την διακριτή έκδοση του αλγορίθμου Extremum Seeking(ES) (εικόνα 1.2). Συγκεκριμένα, ο ES ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους η οποία ποσοτικοποιεί την απόδοση του ελεγκτή PID. Ο ES τροποποιεί επαναληπτικά τις παραμέτρους προς βελτίωση (σε αυτή την εφαρμογή, τις παραμέτρους του PID) ώστε η συνάρτηση κόστους της έξοδος της συνάρτησης να φθάνει ένα τοπικό ελάχιστο ή τοπικό μέγιστο.



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα ελέγχου του Extremum Seeking για διακριτά συστήματα, όπου η δομή είναι ίδια με την συνεχή της μορφή. Τα δυο γραμμικά μπλοκ,  $F_i(z)$  και  $F_o(z)$  απαιτούνται ώστε το σύστημα να είναι εκθετικά ευσταθές.

Ο ES χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τις παραμέτρους του PID ελεγκτή έτσι ώστε η συνάρτηση κόστους να φτάσει ένα τοπικό ελάχιστο. Η συνάρτηση κόστους, υπολογίζεται στο τέλος του βηματικού πειράματος. Χρησιμοποιούμε το ISE (Integrated Squared Error-Ολοκλήρωμα του τετραγώνου του σφάλματος) σαν συνάρτηση κόστους

$$J(\theta) = \frac{1}{T - t_0} \int_{t_0}^T e^2(t, \theta) dt$$

όπου το σφάλμα  $e(t, \theta) = r(t) - y(t, \theta)$  είναι η διαφορά μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου του κλειστού συστήματος και

$$\theta = [K, T_i, T_d]^T$$

περιέχει τις παραμέτρους του PID.

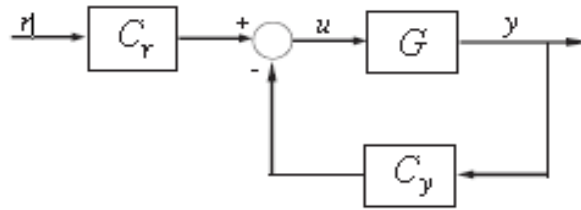
Η συνάρτηση κόστους  $J(\theta)$  λαμβάνει υπόψη το σφάλμα μεταξύ του διαστήματος  $[t_0, T]$ . Ορίζοντας το  $t_0$  να προσεγγίζει το  $T_{\text{peak}}$ , χρόνο στον οποίο η απόκριση της εξόδου του κλειστού συστήματος φθάνει στο πρώτο peak, η συνάρτηση κόστους  $J(\theta)$  θέτει μηδενικά βάρη στο αρχικό τμήμα της απόκρισης.

Ως εκ τούτου, ο ελεγκτής ρυθμίζεται στο να μηδενίσει το σφάλμα μετά το χρόνο του πρώτου peak  $T_{\text{peak}}$  χωρίς περιορισμούς.

Χρησιμοποιούμε έναν κλασσικό PID ελεγκτή της μορφής

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d_y(t)}{dt})$$

με την εξαίρεση ότι ο όρος της διαφορίσης δρα στην μετρούμενη έξοδο του συστήματος αλλά όχι στο σήμα αναφοράς. Αυτή η μορφή του PID ελεγκτή αποφεύγει την μεγάλη προσπάθεια για έλεγχο κατά την διάρκεια της βηματικής μεταβολής στο σήμα αναφοράς.



Εικόνα 1.3: Μπλοκ διάγραμμα του κλειστού συστήματος ελέγχου, με τον όρο της διαφοράρισης να δρα μόνο στην μετρούμενη έξοδο αλλά όχι στο σήμα αναφοράς.

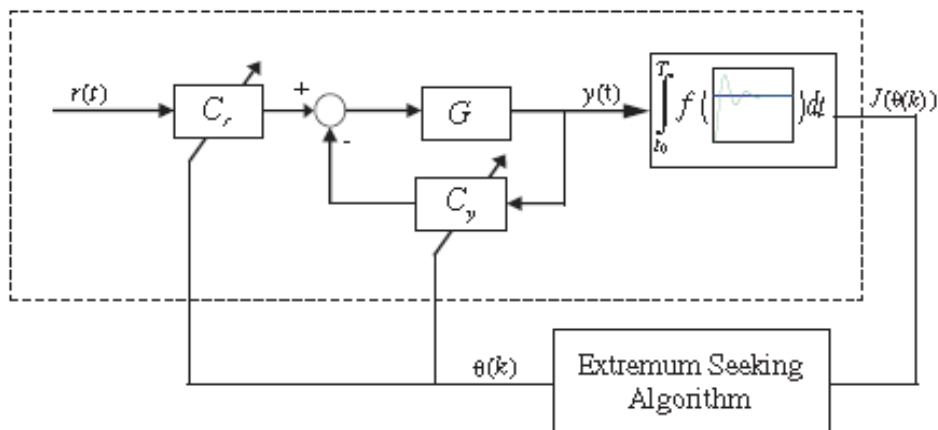
Η εικόνα 1.3 δείχνει το μπλοκ διάγραμμα ενός κλειστού συστήματος ελέγχου, όπου το μοντέλο  $G$  είναι άγνωστο. Ο ελεγκτής έχει παραμετροποιηθεί ως

$$C_r(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$C_y(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

και τα  $r, u$  και το  $y$  είναι τα σήματα αναφοράς, ελέγχου και εξόδου, αντίστοιχα.

Ο ES έχει σκοπό να ρυθμίσει κατάλληλα των PID ελεγκτή έτσι ώστε το βρεθεί μια ελάχιστη τιμή για την συνάρτηση κόστους  $J(\theta)$ . Ωστόσο, επειδή ο ES είναι μια μέθοδος κλίσης (gradient method), οι παράμετροι του PID που βρίσκει ο ES δεν επιφέρουν απαραίτητα μια καθολική ελάχιστη τιμή στο  $J(\theta)$ .



Εικόνα 1.4: Το ολοκληρωμένο διάγραμμα του Extremum Seeking για την ρύθμιση του PID ελεγκτή

Το ολοκληρωμένο διάγραμμα του ES για τον συντονισμό των παραμέτρων του PID ελεγκτή φαίνεται στην εικόνα 1.4. Το βηματικό πείραμα, το οποίο είναι με διακεκομμένες γραμμές, τρέχει επαναληπτικά. Το κόστος  $J(\theta(k))$  υπολογίζεται στο τέλος του βηματικού πειράματος. Ο αλγόριθμος ES χρησιμοποιεί την τιμή του κόστους  $J(\theta(k))$  για να υπολογίσει τις καινούργιες τιμές του ελεγκτή  $\theta(k)$ . Ένα ακόμα βηματικό πείραμα ακολουθεί με τις καινούργιες παραμέτρους του ελεγκτή και η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά.

Η υλοποίηση στο πεδίο του χρόνου της διακριτής μορφής του αλγορίθμου ES που απεικονίζεται στην εικόνα 1.2 είναι

$$\xi(k) = -h\xi(k-1) + J(\theta(k-1)),$$

$$\hat{\theta}_i(k+1) = \hat{\theta}_i(k) - \gamma_i \alpha_i \cos(\omega_i k) [J(\theta(k)) - (1+h)\xi(k)],$$

$$\theta_i(k+1) = \hat{\theta}_i(k+1) + \alpha_i \cos(\omega_i(k+1))$$

όπου το  $\xi(k)$  είναι μια εσωτερική μεταβλητή και ο δείκτης  $i$  υποδηλώνει την  $i^{\text{th}}$  θέση ενός πίνακα. Το  $\gamma_i$  είναι το εκτιμώμενο κέρδος (estimation gain) και το  $\alpha_i$  είναι το πλάτος της διαταραχής (perturbation amplitude). Η ευστάθεια και η σύγκλιση εξαρτώνται από τις τιμές των  $\gamma$  και  $\alpha$  καθώς και από την μορφή της συνάρτησης κόστους  $J(\theta)$  κοντά στην ελάχιστη τιμή. Η γωνιακή συχνότητα  $\omega_i$  επιλέγεται να έχει την τιμή  $\omega_i = a^i \pi$ , όπου το  $a$  ικανοποιεί το

$0 < a < 1$ . Επιπρόσθετα, το υψιπερατό φίλτρο (Highpass Filter)  $\frac{z-1}{z+h}$  κατασκευάζεται έτσι

ώστε  $0 < h < 1$ . Το σύστημα του ελεγκτή και του μοντέλου είναι στο συνεχές χρόνο, ενώ ο αλγόριθμος ES στο διακριτό χρόνο.



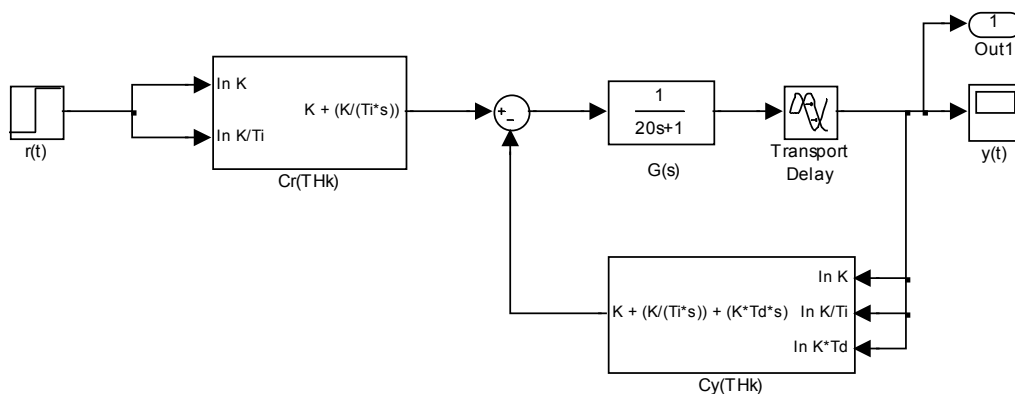
## 1.5) Παράδειγμα συντονισμού PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Extremum Seeking

Ο αλγόριθμος ES θα εφαρμοστεί στην συνάρτηση μεταφοράς

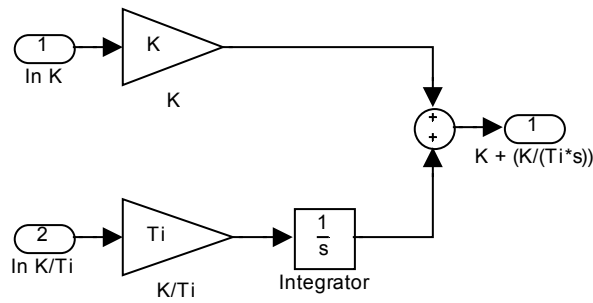
$$G(s) = \frac{1}{20s + 1} e^{-5s}$$

η οποία είναι πρώτου βαθμού και έχει μια χρονική καθυστέρηση 5 δευτερολέπτων. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0,01sec, ενώ οι χρονικές καθυστερήσεις προσεγγίζονται από μια τρίτου βαθμού Pade προσέγγιση. Επιπλέον οι συντελεστές  $a$  και  $h$  ορίζονται 0,8 και 0,5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους θα κυμανθεί από  $t_0=10\text{sec}$  έως  $T=100\text{sec}$ , το  $\alpha=[0.05,1,0.05]^T$ , το  $\gamma=[100,1200,100]^T$  και η γωνιακή συχνότητα  $\omega_i = a^i \pi$ . Το  $\xi(k-1)$  παίρνει την τιμή 0,04. Η προσημείωση θα γίνει στην εφαρμογή του Matlab, Simulink.

Το σύστημα μας στο simulink:

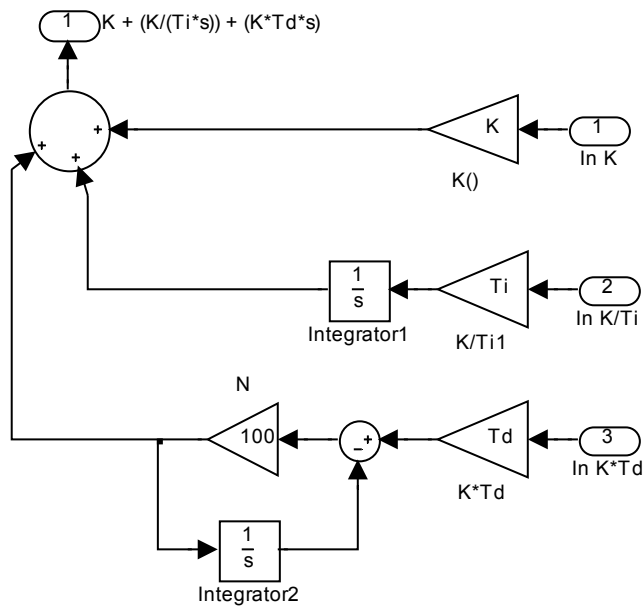


όπου, το  $r(t)$  είναι η βηματική είσοδος, το  $G(s)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς χωρίς την χρονική καθυστέρηση, η οποία εισέρχεται στο σύστημα με το Transport Delay (5 sec),  $y(t)$  είναι ένα scope στο οποίο θα δούμε γραφικά την απόκριση του συστήματος, το  $C_r(THk)$  είναι:



$$\text{το } C_r(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

και το Cy(THk) είναι:

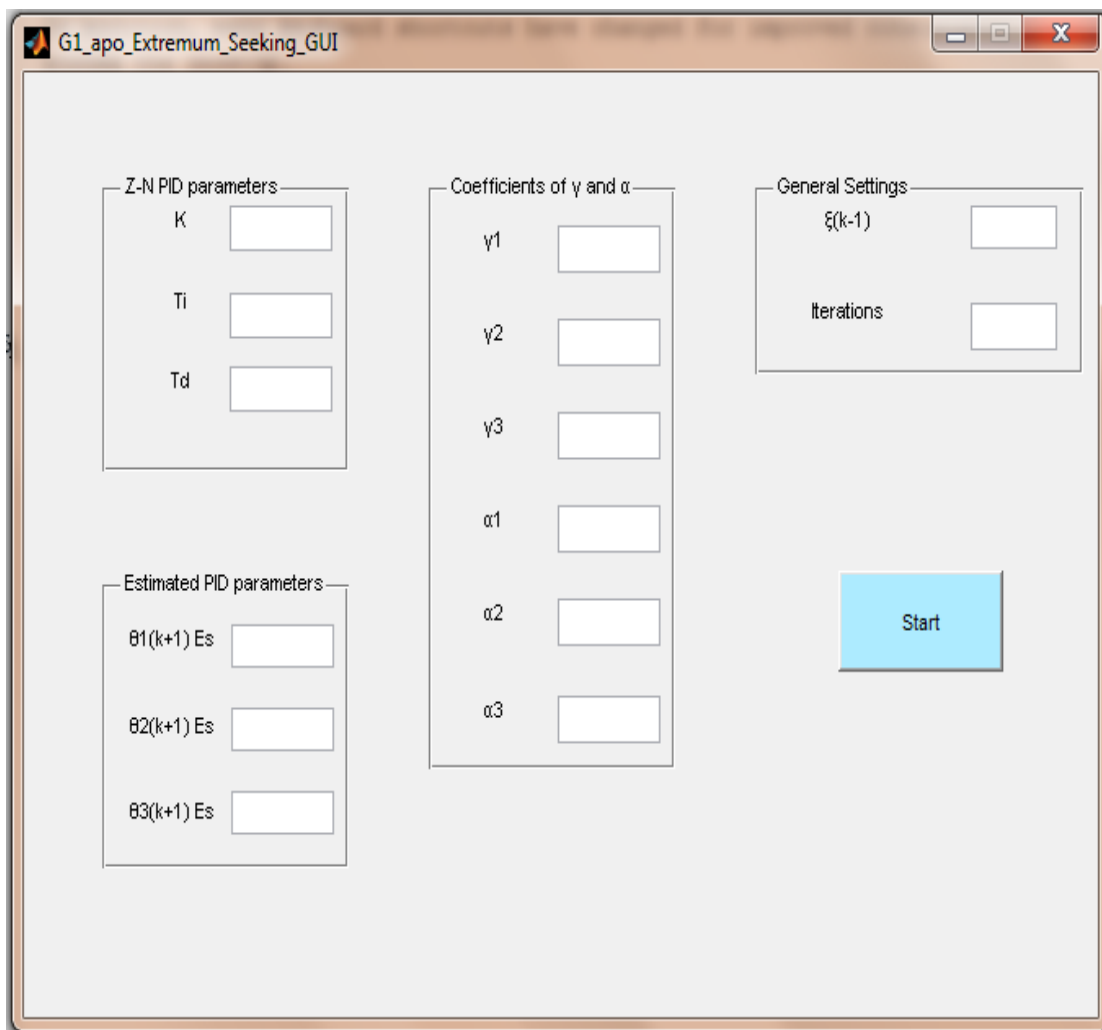


$$\text{το } C_\psi = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Στο σύστημα σαν αρχικές τιμές για τις παραμέτρους του PID έχουμε πάρει τις τιμές της μεθόδου Zeigler-Nichols οι οποίες είναι [4.06,9.25,2.31].

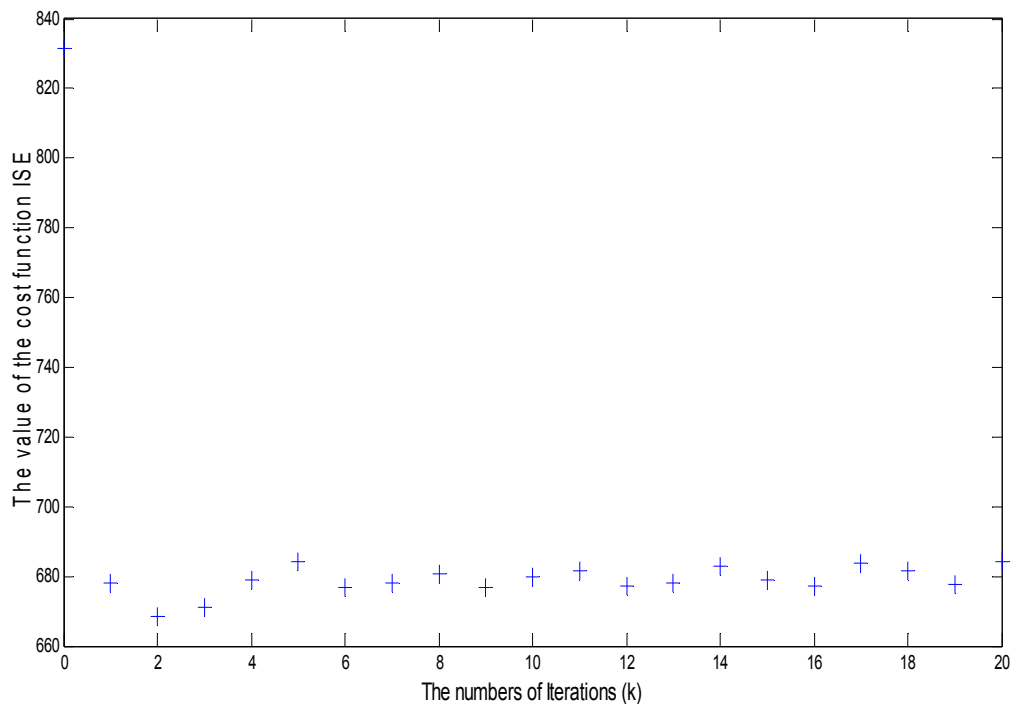
Ο κώδικας ο οποίος υλοποιεί τον αλγόριθμο Extremum Seeking είναι γραμμένος σε script στο Matlab και βρίσκεται στο παράρτημα Α.

Για την πιο εύκολη διεξαγωγή των πειραμάτων υλοποιήθηκε στην εφαρμογή του Matlab, Guide (GUI-graphical user interface), ένα πλαίσιο στο οποίο θα δίνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου και θα ξεκινά ο αλγόριθμος. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι το ακόλουθο:



## 1.6) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Extremum Seeking για το κλειστό σύστημα της $G(s)$

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου Extremum Seeking θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της μεθόδου Zeigler-Nichols.

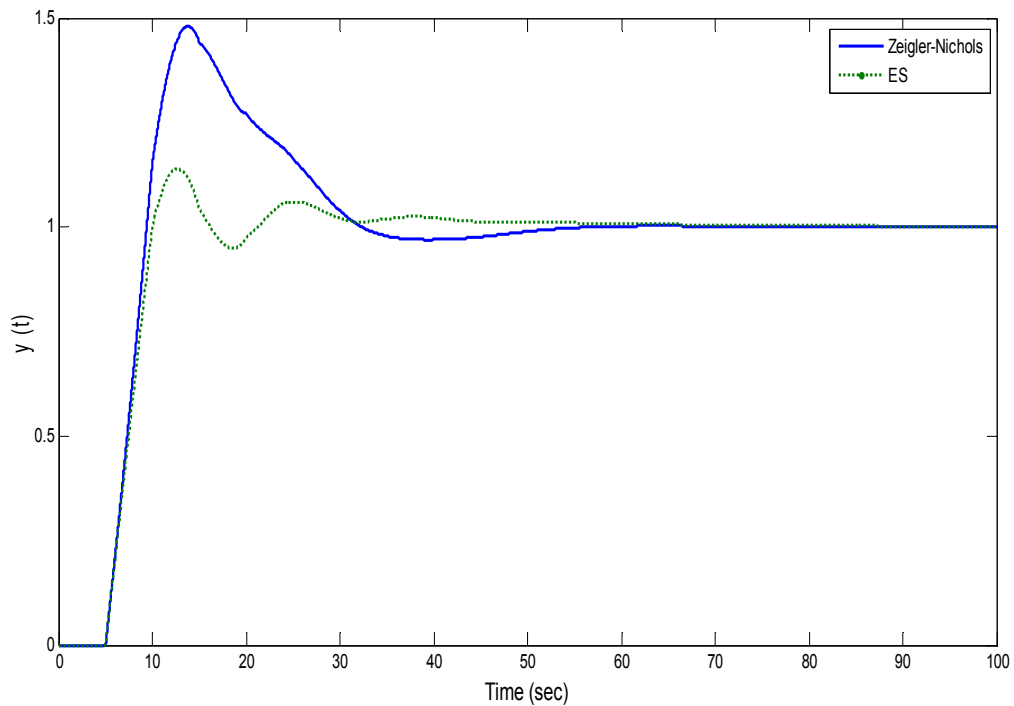


Εικόνα 1.5: Η εξέλιξη τις τιμές του cost function  $J(\theta)$

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 1.5 η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τρίτη επανάληψη ( $k=2$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τρεις επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method   | K      | Ti    | Td    |
|-----------------|--------|-------|-------|
| Zeigler-Nichols | 4.06   | 9.25  | 2.31  |
| ES              | 4.0966 | 25.13 | 2.245 |



Εικόνα 1.6 Η απόκριση της εξόδου του συστήματος με τις τιμές του ZN και η απόκριση του συστήματος με τις τιμές του ES

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 1.6 η μέθοδος ZN και ο αλγόριθμος ES μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method   | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο σφάλμα |
|-----------------|-----------------|-----------|----------------------|---------------|
| Zeigler-Nichols | 8.99 sec        | 48.25%    | 29.4 sec             | 0             |
| ES              | 9.489 sec       | 13.84%    | 27.15 sec            | 0.0015        |

- Χρόνος ανύψωσης: Ο χρόνος στον οποίο φθάνει στο 90% της τελικής τιμής (σε δευτερόλεπτα).
- Χρόνος αποκατάστασης: Ο χρόνος στον οποίο σταθεροποιείται μεταξύ του  $\pm 5\%$  της τελικής τιμής (σε δευτερόλεπτα).
- Το μόνιμο σφάλμα υπολογίστηκε στα 100sec.

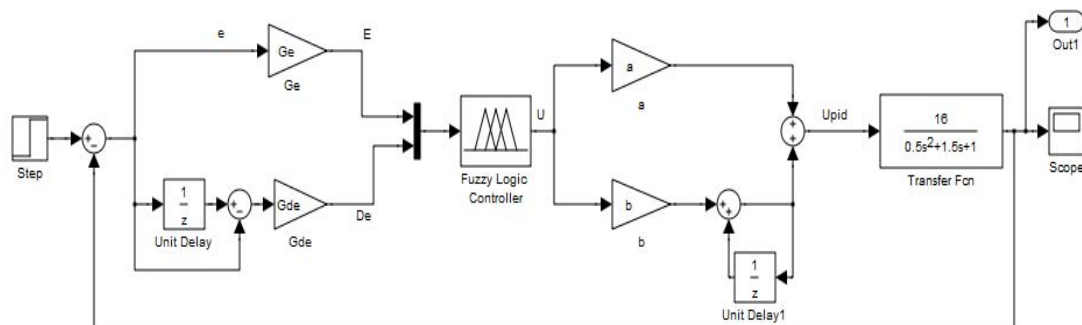
## 1.7) Παράδειγμα συντονισμού Fuzzy PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Extremum Seeking

Ο αλγόριθμος ES θα εφαρμοστεί στην συνάρτηση μεταφοράς

$$G(s) = \frac{16}{0.5s^2 + 1.5s + 1}$$

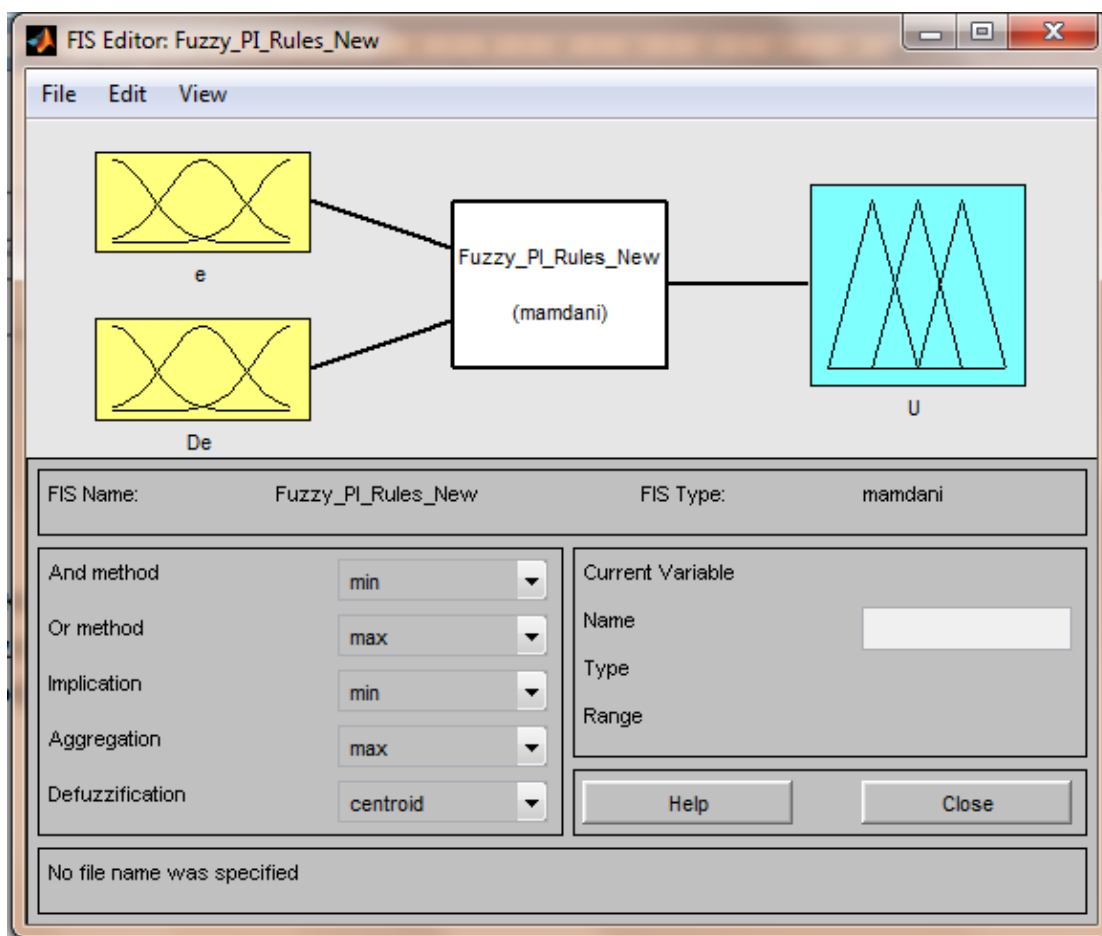
η οποία είναι πρώτου βαθμού. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.4sec. Επιπλέον οι συντελεστές  $a$  και  $b$  ορίζονται 0,8 και 0,5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους θα κυμανθεί από  $t_0=1.2\text{sec}$  έως  $T=10\text{sec}$ , το  $\alpha=[0.1,0.01,0.1,0.01]^T$ , το  $\gamma=[10,10,10,10]^T$  και η γωνιακή συχνότητα  $\omega_i = a \pi$ . Το  $\xi(\kappa-1)$  παίρνει την τιμή 0.1. Η προσομοίωση θα γίνει στην εφαρμογή του Matlab, Simulink. Σκοπός του αλγορίθμου είναι να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ .

Το κλειστό σύστημα ελέγχου με Fuzzy PID είναι της μορφής:

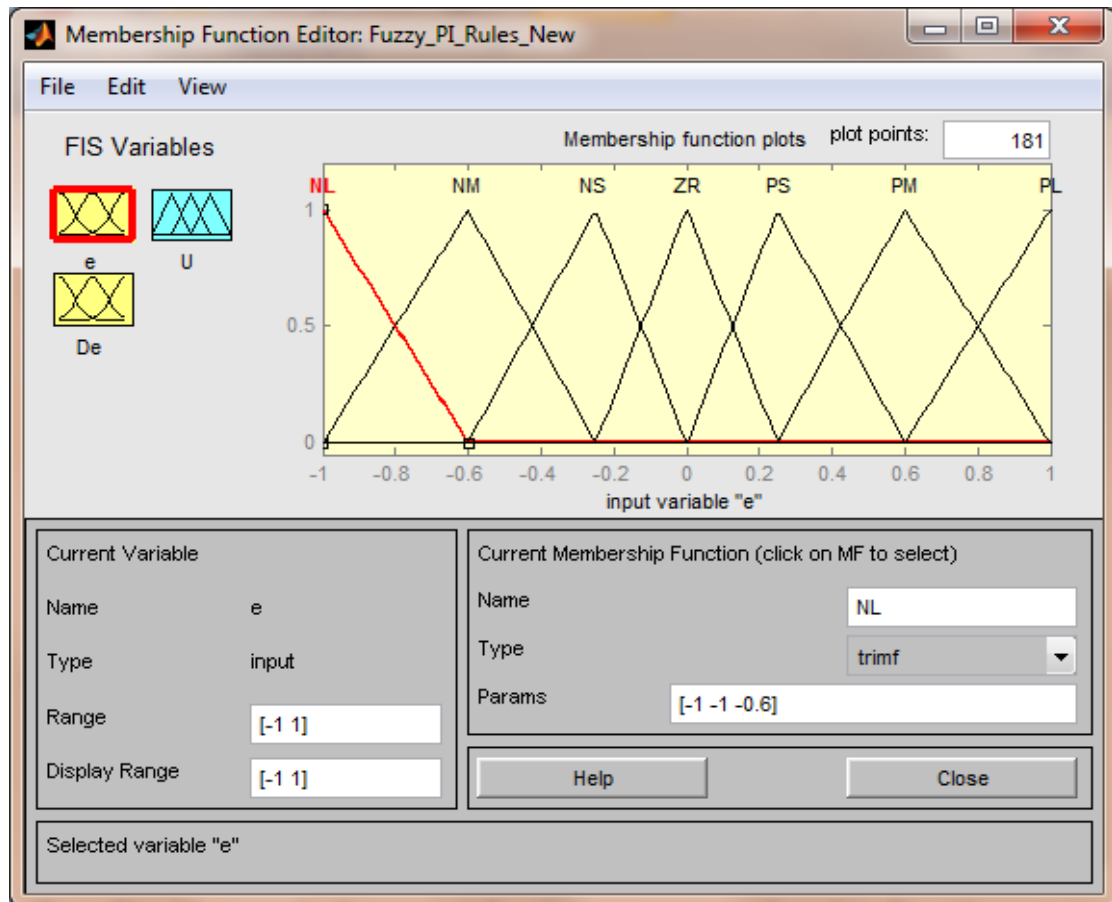


όπου τα  $G_e$  και  $G_{\Delta e}$  είναι οι συντελεστές του σφάλματος και η διαφορά του σφάλματος αντίστοιχα. Τα  $a$  και  $b$  είναι οι συντελεστές για την PD και PI μορφή του Ελεγκτή Ασαφής Λογικής (Fuzzy Logic Controller-FLC).

Η μέθοδος ασαφοποίησης και αποασαφοποίησης του FLC είναι της μορφής:



Τα  $e$  (Σφάλμα),  $\Delta e$  (Μεταβολή του Σφάλματος),  $U$  (Σήμα ελέγχου) αποτελούνται από 7 membership functions τύπου τριγώνου στο διάστημα  $[-1,1]$  και είναι της μορφής:

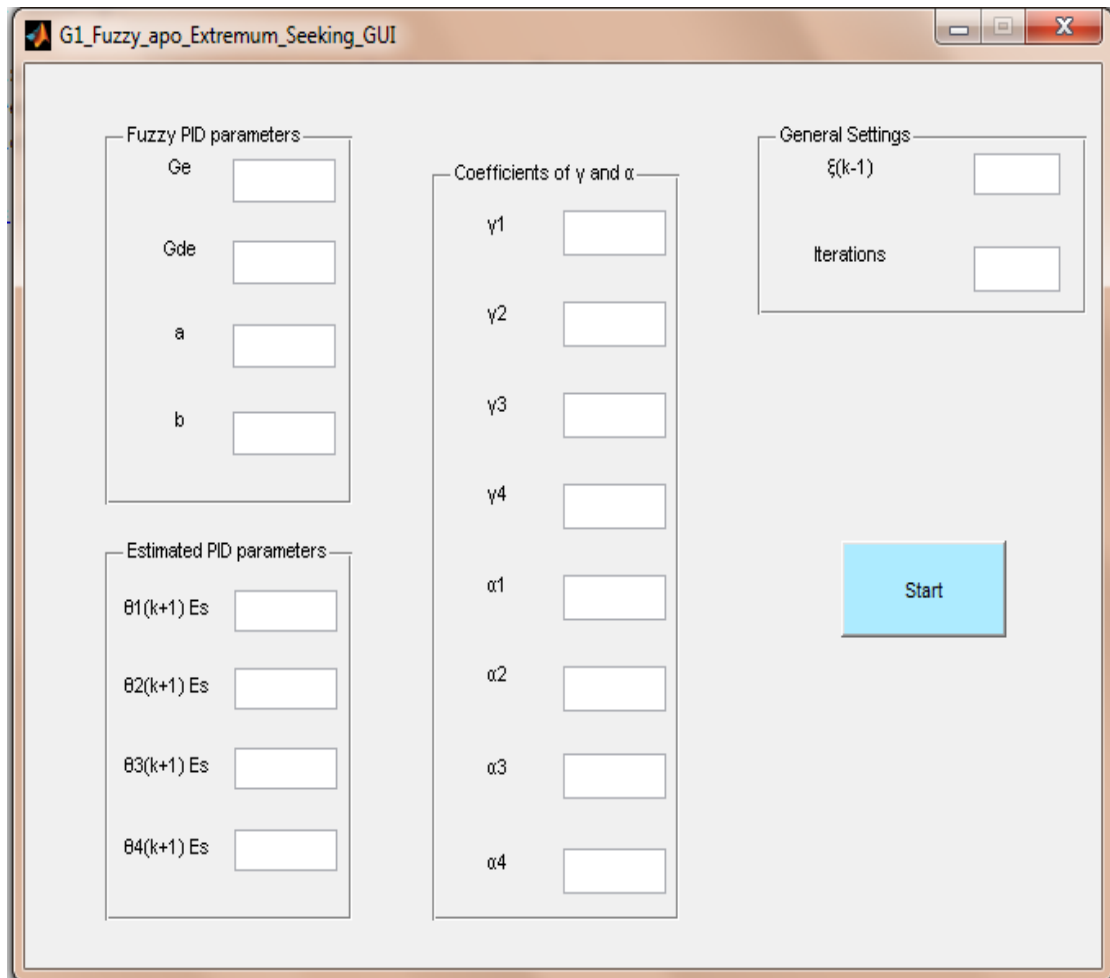


Τέλος οι κανόνες του Fuzzy PID είναι ίδιοι με τους κανόνες του Fuzzy PI.

Σαν αρχικές τιμές για τα  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  παίρνουμε τις  $[0.8, 0.1, 0.8, 0.1]$ .

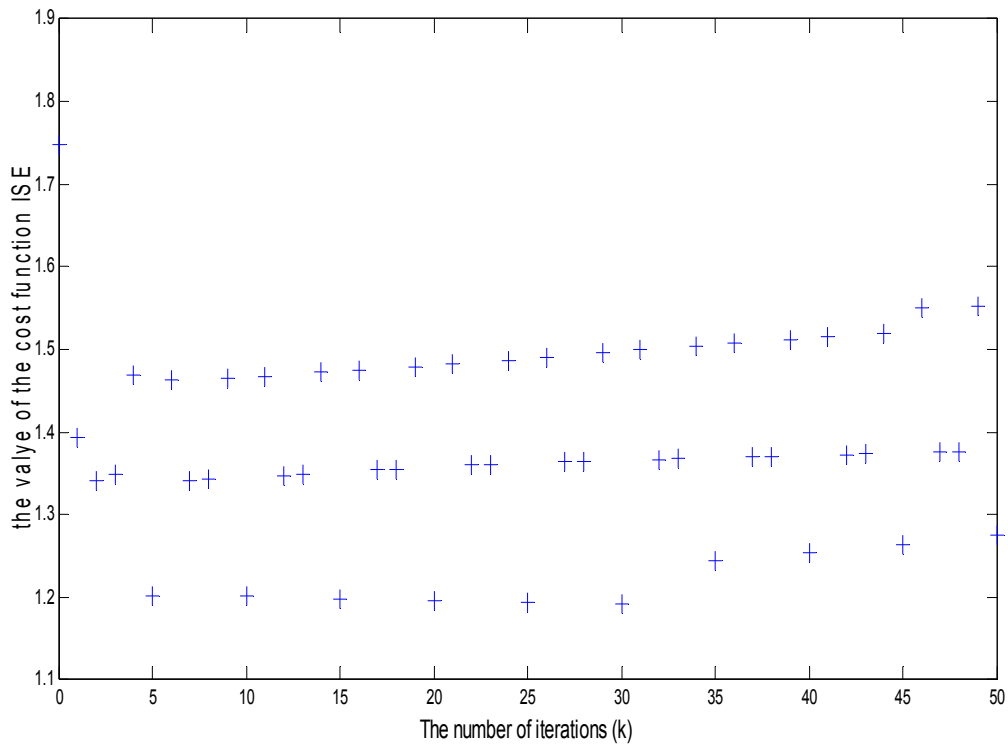


Για την πιο εύκολη διεξαγωγή των πειραμάτων υλοποιήθηκε στην εφαρμογή του Matlab, Guide (GUI-graphical user interface), ένα πλαίσιο στο οποίο θα δίνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου και θα ξεκινά ο αλγόριθμος. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι το ακόλουθο:



## 1.8) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Extremum Seeking για το κλειστό σύστημα της $G(s)$ με Fuzzy PID

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου Extremum Seeking θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα των αρχικών τιμών των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ .

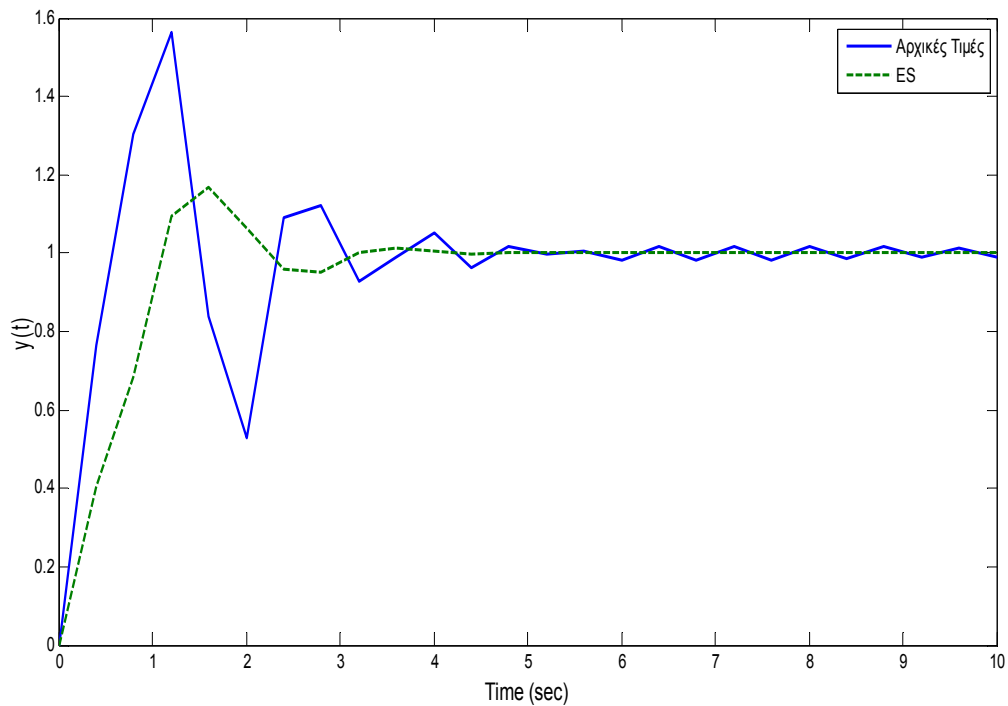


Εικόνα 1.7: Η εξέλιξη τις τιμής του cost function  $J(\theta)$

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 1.7 η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τριακοστή πρώτη επανάληψη ( $k=30$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τριανταμία επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                          | $G_e$  | $G_{\Delta e}$ | a      | b     |
|--|--------|----------------|--------|-------|
| Αρχ. Τιμές $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ | 0.8    | 0.1            | 0.8    | 0.1   |
| ES                                     | 0.5104 | 0.071          | 0.5104 | 0.071 |



Εικόνα 1.8 Η απόκριση της εξόδου του συστήματος με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  και η απόκριση του συστήματος με τις τιμές του ES

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 1.8 οι αρχικές τιμές των παραμέτρων και ο αλγόριθμος ES μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                          | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο σφάλμα |
|--|-----------------|-----------|----------------------|---------------|
| Αρχ. Τιμές $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ | 0.499 sec       | 56.35%    | 4 sec                | 0.01          |
| ES                                     | 1.011 sec       | 16.78%    | 2.0548 sec           | 0             |

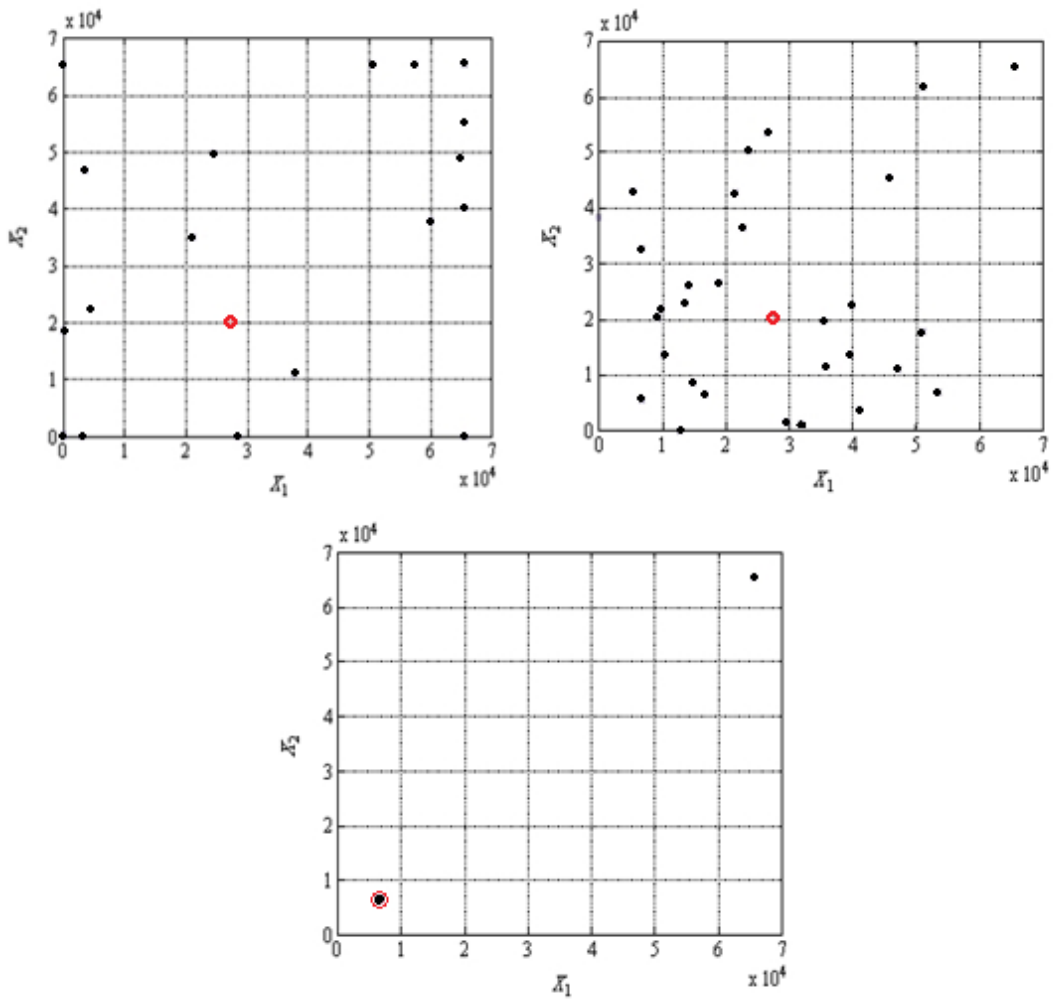
Το μόνιμο σφάλμα υπολογίστηκε στα 10sec.

## 1.9) Συμπεράσματα χρήσης του αλγορίθμου Extremum Seeking

Ο αλγόριθμος Extremum Seeking είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος είναι εύκολα υλοποιήσιμος και έχει άμεσα και σαφή αποτελέσματα σε σχέση με άλλες μεθόδους. Όπως παρατηρήσαμε και στα δύο παραδείγματα που αναλύθηκαν προωτέρα ( με PID και Fuzzy PID), ο αλγόριθμος έχει την ικανότητα να μειώνει αισθητά τις υπερυψώσεις των κλειστών συστημάτων καθώς και να μεταβάλλει τους χρόνους ανύψωσης και αποκατάστασης. Επιπλέον ο αλγόριθμος είτε εξαλείφει είτε δημιουργεί ένα πολύ μικρό μόνιμο σφάλμα πάντα μέσα στα επιτρεπτά όρια. Όμως κάθε σύστημα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, με συνέπεια να θέλει μια προεργασία ο αλγόριθμος ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί σωστά. Σε συνέχεια του προηγούμενου, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος έχει αρκετές εσωτερικές μεταβλητές (  $\xi(k-1)$  ,  $\gamma_i$  ,  $\alpha_i$  ) τα οποία θέλουν μια προεργασία ώστε να βρεθούν οι όσο το δυνατόν βέλτιστες τιμές. Για αυτό τον λόγο, συνίσταται η χρήση άλλου αλγορίθμου ο οποίος θα αναλάβει να βρει τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του ES ώστε αυτός να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι ο Big Bang -Big Crunch, ο οποίος θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

# Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

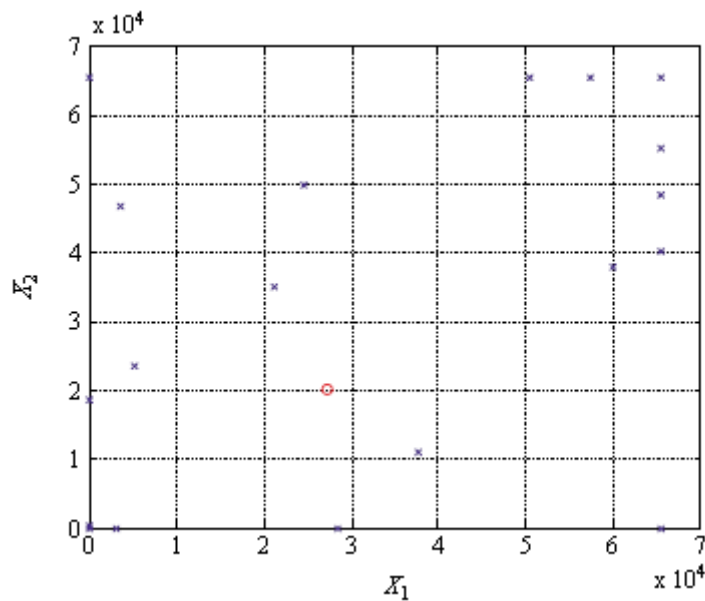
## Big Bang-Big Crunch



## 2.1) Η θεωρία του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch

Την τυχειότητα μπορούμε να την δούμε σαν ισοδύναμο της διάχυσης της ενέργειας στην φύση, καθώς και την σύγκλιση σε ένα τοπικό ή καθολικό βέλτιστο σημείο σαν την βαρυτική έλξη. Καθώς η διάχυση της ενέργειας προκαλεί μια «αταξία» στην κατανομή των σωματιδίων, εμείς θα χρησιμοποιήσουμε την τυχειότητα σαν ένα μετασχηματισμό της συγκλίνουσας λύσης (τάξη) για την δημιουργία πλήρως καινούργιων υποψήφιων λύσεων («αταξία», χάος).

Ο αλγόριθμος Big Bang-Big Crunch (BB-BC) είναι παρόμοιος με τον Γενετικό αλγόριθμο (Genetic Algorithm) επειδή και οι δύο δημιουργούν ένα τυχαίο αρχικό πληθυσμό πιθανών λύσεων. Η δημιουργία του τυχαίου αρχικού πληθυσμού ονομάζεται φάση Big Bang. Σε αυτήν την φάση, ο πληθυσμός των πιθανών λύσεων διαχέεται σε ολόκληρο τον ερευνητικό χώρο ομοιόμορφα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Η διάδοση του πληθυσμού των πιθανών λύσεων για μια δυο διαστάσεων περίπτωση, όπου οι παράμετροι συμβολίζονται ως ' $X_1$  και  $X_2$ ' και το κέντρο των βαρών με το σύμβολο 'ο'

Η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών μπορεί να παράξει αριθμούς μεγαλύτερους από την μονάδα, ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαίος ο περιορισμός των τιμών ώστε να τους διατηρήσουμε εντός του ερευνητικού χώρου.

Ο αριθμός του πληθυσμού των πιθανών λύσεων της εικόνας 2.1 είναι 30 αλλά ο αριθμός αυτός μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί ανάλογα με την σύγκλιση που θα επιτευχτεί ή με τον αριθμό των επαναλήψεων του αλγορίθμου.

Η φάση Big Bang ακολουθείται από την φάση Big Crunch. Η φάση Big Crunch είναι μια διαδικασία σύγκλισης, η οποία έχει πολλές εισόδους αλλά μια μόνο έξοδο. Η έξοδος αυτή ονομάζεται ως κέντρο των «βαρών» (center of mass) διότι η έξοδος προέρχεται από τον υπολογισμό του κέντρου των βαρών. Ο όρος βάρος αναφέρεται στον αντίστροφο της τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function). Στο διάγραμμα (όπως στην εικόνα 2.1) το κέντρο των βαρών παρουσιάζεται με ένα κυκλάκι και συμβολίζεται ως  $x^c$ . Το  $x^c$  υπολογίζεται από την φόρμουλα:

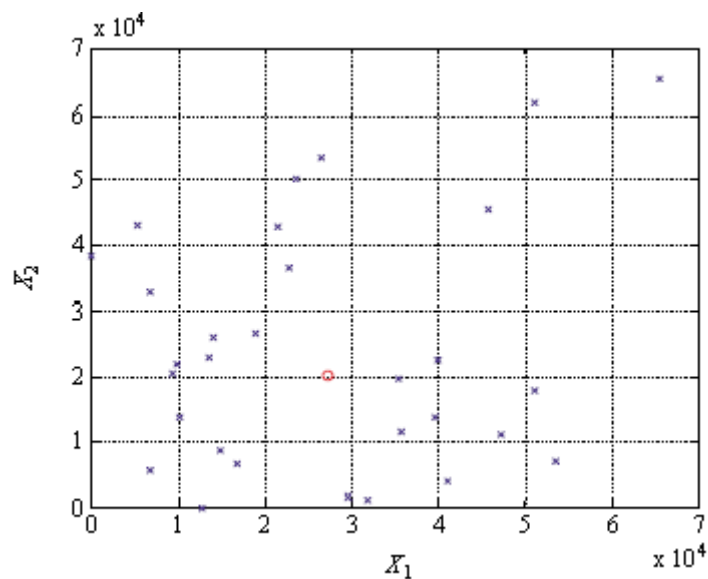
$$X^c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i} x^i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i}}$$

όπου το  $x^i$  είναι ένα σημείο μέσα σε ένα n-διαστάσεων ερευνητικό χώρο, το  $f^i$  είναι η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας και N είναι ο πληθυσμός στην φάση Big Crunch. Η διαδικασία σύγκλισης στην φάση Big Crunch απομακρύνει τις απομακρυσμένες τιμές όταν το κέντρο των βαρών εμπεριέχει περισσότερες πληροφορίες (μεγαλύτερο πληθυσμό ή πιο ακριβή πληθυσμό). Αυτή η μέθοδος είναι ανώτερη από το να διαλέγαμε δύο πιθανές λύσεις και να βρίσκαμε το βαρυτικό τους κέντρο (center of gravity).

Έπειτα από την φάση Big Crunch, ο αλγόριθμος πρέπει να δημιουργήσει νέες πιθανές λύσεις που θα χρησιμοποιηθούν στην φάση Big Bang της επόμενης επανάληψης του αλγορίθμου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους, όμως ο ευκολότερος είναι να μεταβεί στο βήμα ένα και να δημιουργήσει έναν καινούργιο αρχικό πληθυσμό πιθανών λύσεων. Ο αλγόριθμος δεν θα έχει καμία διαφορά με την μέθοδο τυχαίας εύρεσης, διότι οι επόμενες επαναλήψεις δεν θα χρησιμοποιούν την γνώση που αποκτήσαμε από τις προηγούμενες επαναλήψεις, γι' αυτόν τον λόγο δεν μπορεί να επιτευχθεί σύγκλιση με έναν τέτοιο αλγόριθμο.

Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρέπει να συγκλίνει σε ένα τοπικό σημείο, αλλά ταυτόχρονα για να μπορεί να θεωρείται σαν καθολικός αλγόριθμος, θα πρέπει να περιλαμβάνει ορισμένα σημεία μέσα στον πληθυσμό του που να έχουν μειωμένες πιθανότητες να είναι η βέλτιστη λύση. Για να είμαστε πιο ακριβής, εννοούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού που παράγεται από τον αλγόριθμο θα πρέπει να βρίσκεται γύρω από την βέλτιστη τιμή αλλά οι εναπομείναντες τιμές του πληθυσμού θα πρέπει να είναι απομακρυσμένες από την βέλτιστη τιμή μετά από ορισμένες επαναλήψεις. Αυτή η αναλογία απομακρυσμένων και μη τιμών από την βέλτιστη τιμή θα πρέπει να μειώνεται όσο ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνετε, αλλά σε κανένα σημείο δεν θα μπορεί να ισούται με το μηδέν που θα σημαίνει το τέλος της έρευνας.

Αυτή η σύγκλιση ή αλλιώς η χρήση της προηγούμενης γνώσης (κέντρο των βαρών) μπορεί να επιτευχθεί με την δημιουργία καινούργιων τιμών γύρω από το κέντρο των βαρών χρησιμοποιώντας μια διαδικασία κανονικής κατανομής (normal distribution) προς κάθε κατεύθυνση, όπου η τυπική απόκλιση (standard deviation) αυτής της normal κατανομής θα μειώνεται όσο ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου θα αυξάνεται. Ο νέος πληθυσμός φαίνεται στην εικόνα 2.2.



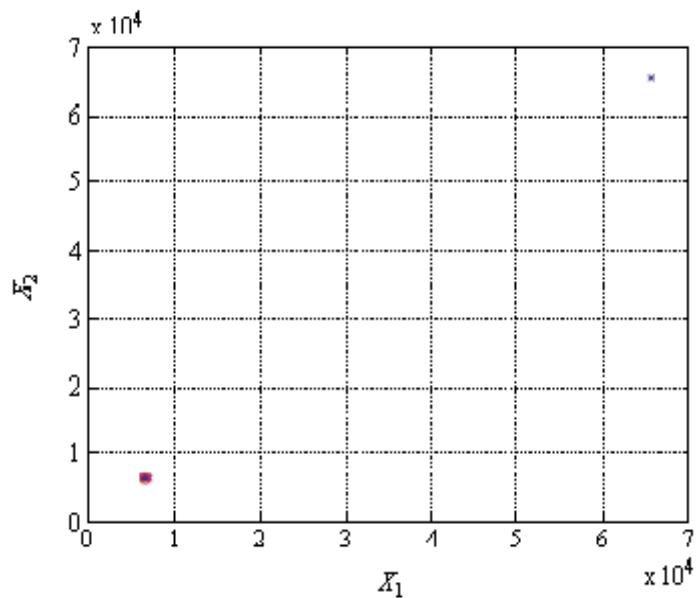
Εικόνα 2.2: Η διάδοση του πληθυσμού των πιθανών λύσεων για μια δυο διαστάσεων περίπτωση, όπου οι παράμετροι συμβολίζονται ως  $X_1$  και  $X_2$  και το κέντρο των βαρών με το σύμβολο 'ο' μετά από την 4<sup>η</sup> επανάληψη



Αυτή η σύγκλιση παίρνει την παρακάτω φόρμα, όπου τα σύνορα του ερευνητικού χώρου είναι το άθροισμα της Ευκλείδειας απόστασης όλων των πιθανών λύσεων:

Τα σύνορα του ερευνητικού χώρου στην  $k^{\text{η}}$  επανάληψη/ τα σύνορα του ερευνητικού χώρου στην  $(k+1)^{\text{η}}$  επανάληψη  $> 1$  (Εξίσωση 2.1)

Ύστερα από την δεύτερη έκρηξη (δεύτερο Big Bang), το κέντρο των βαρών επαναυπολογίζεται. Αυτά τα επιτυχημένα βήματα εκρήξεων και συστολών συνεχίζονται μέχρι τα κριτήρια παύσης ικανοποιηθούν. Οι δύο παράμετροι που θα τροφοδοτηθούν στην γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών είναι το κέντρο των βαρών και η τυπική απόκλιση. Το ζήτημα εύρεσης της απόκλισης μπορεί να διορθωθεί, αλλά μειώνοντας την τιμή της κατά την διάρκεια των επαναλήψεων του αλγορίθμου (Εξίσωση 2.1) παρουσιάζονται πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Εικόνα 2.3: Η συσσώρευση του πληθυσμού των πιθανών λύσεων γύρω από το κέντρο των βαρών μετά από 500 επαναλήψεις

Συνοψίζοντας τα βήματα του αλγορίθμου BB-BC καταλήγουμε:

**Βήμα 1<sup>ο</sup>** Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού τυχαίων λύσεων  $N$  σεβόμενοι τα όρια του ερευνητικού χώρου.

**Βήμα 2<sup>ο</sup>** Υπολογισμός της συνάρτησης καταλληλότητας για κάθε πιθανή λύση.

**Βήμα 3<sup>ο</sup>** Βρίσκουμε το κέντρο των βαρών σύμφωνα με την εξίσωση του  $x^c$ . Οι τιμές με την καλύτερη εφαρμογή μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για κέντρο των βαρών αντί της εξίσωσης του  $x^c$ .

**Βήμα 4<sup>ο</sup>** Υπολογίζουμε τον καινούργιο πληθυσμό γύρω από το κέντρο των βαρών, με το να προσθέτουμε ή να αφαιρούμε έναν normal τυχαίο αριθμό, του οποίου η τιμή θα μειώνεται όσο περνούν οι επαναλήψεις. Ο καινούργιος πληθυσμός είναι της μορφής:

$$x^{new} = x^c + lr/k$$

όπου το  $x^c$  είναι το κέντρο των βαρών,  $l$  είναι το μέγιστο όριο της παραμέτρου,  $r$  είναι ένας normal τυχαίος αριθμός και το  $k$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων. Το καινούργιο σημείο  $x^{new}$  είναι άνω και κάτω φραγμένο.

**Βήμα 5<sup>ο</sup>** Επιστρέφουμε στο 2<sup>ο</sup> βήμα έως ότου τα κριτήρια παύσης ικανοποιηθούν.

## 2.2) Παράδειγμα συντονισμού PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Big Bang-Big Crunch

Ο αλγόριθμος BB-BC θα εφαρμοστεί στην συνάρτηση μεταφοράς

$$G(s) = \frac{1}{20s + 1} e^{-5s}$$

η οποία είναι πρώτου βαθμού και έχει μια χρονική καθυστέρηση 5 δευτερολέπτων. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0,01sec, ενώ οι χρονικές καθυστερήσεις προσεγγίζονται από μια τρίτου βαθμού Pade προσέγγιση. Σαν συνάρτηση καταλληλότητας θα χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση ISE(Integrated Squared Error). Σκοπός του αλγορίθμου είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή PID, δηλαδή είναι μια 3 διαστάσεων περίπτωση όπου οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση είναι οι τρεις παράμετροι του PID ελεγκτή (K,Ti,Td) . Τα όρια των παραμέτρων του ελεγκτή PID είναι τα ακόλουθα:

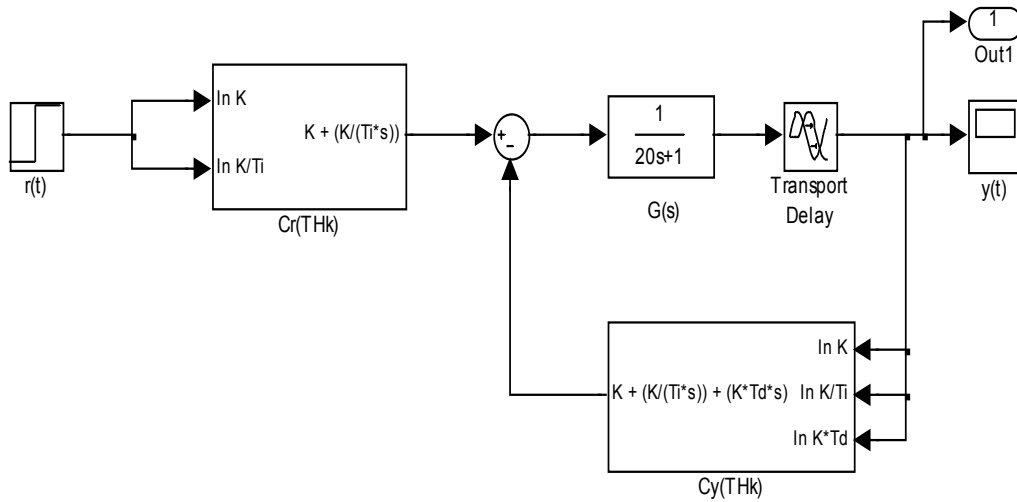
| Τιμή/Παράμετρος | K | Ti    | Td   |
|-----------------|---|-------|------|
| Min             | 3 | 8.12  | 1.97 |
| Max             | 5 | 13.53 | 2.46 |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις παραμέτρους του PID ελεγκτή είναι οι ακόλουθες:

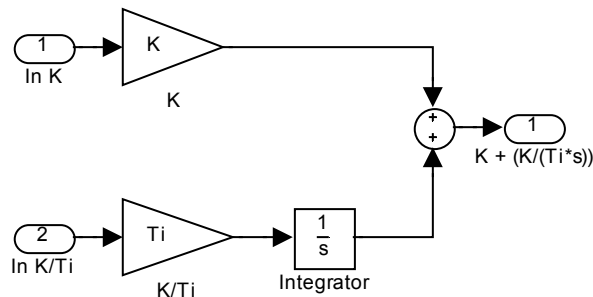
| Τιμή/παράμετρος               | K   | Ti  | Td  |
|-------------------------------|-----|-----|-----|
| $\mu$ (mean)                  | 0   | 0   | 0   |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.2 | 0.2 | 0.1 |

Η προσομοίωση θα γίνει στην εφαρμογή του Matlab, Simulink.

Το σύστημα μας στο simulink:

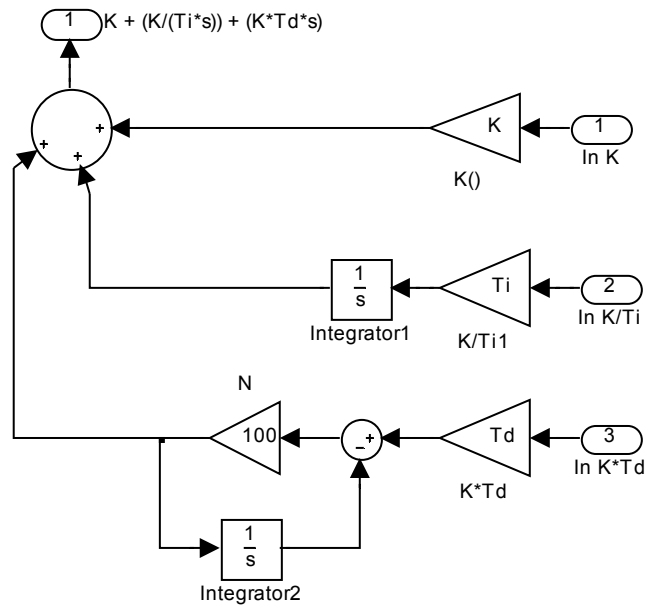


όπου, το  $r(t)$  είναι η βηματική είσοδος, το  $G(s)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς χωρίς την χρονική καθυστέρηση, η οποία εισέρχεται στο σύστημα με το Transport Delay (5 sec),  $y(t)$  είναι ένα scope στο οποίο θα δούμε γραφικά την απόκριση του συστήματος, το  $Cr(THk)$  είναι:



$$\text{το } C_r(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

και το Cy(THk) είναι:



$$\text{το } C_\psi = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Τα όρια των παραμέτρων του PID ελεγκτή πάρθηκαν συγκριτικά με την μέθοδο Zeigler-Nichols. Οι τιμές που μας δίνει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι [4.06,9.25,2.31].

Ο κώδικας ο οποίος υλοποιεί τον αλγόριθμο Big Bang-Big Crunch είναι γραμμένος σε script στο Matlab βρίσκεται στο παράρτημα Β.

Για την πιο εύκολη διεξαγωγή των πειραμάτων υλοποιήθηκε στην εφαρμογή του Matlab, Guide (GUI-graphical user interface), ένα πλαίσιο στο οποίο θα δίνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου και θα ξεκινά ο αλγόριθμος. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι το ακόλουθο:

The image shows a MATLAB GUI window titled "G1\_BB\_BC\_GUI". The window is divided into three main sections for parameter input:

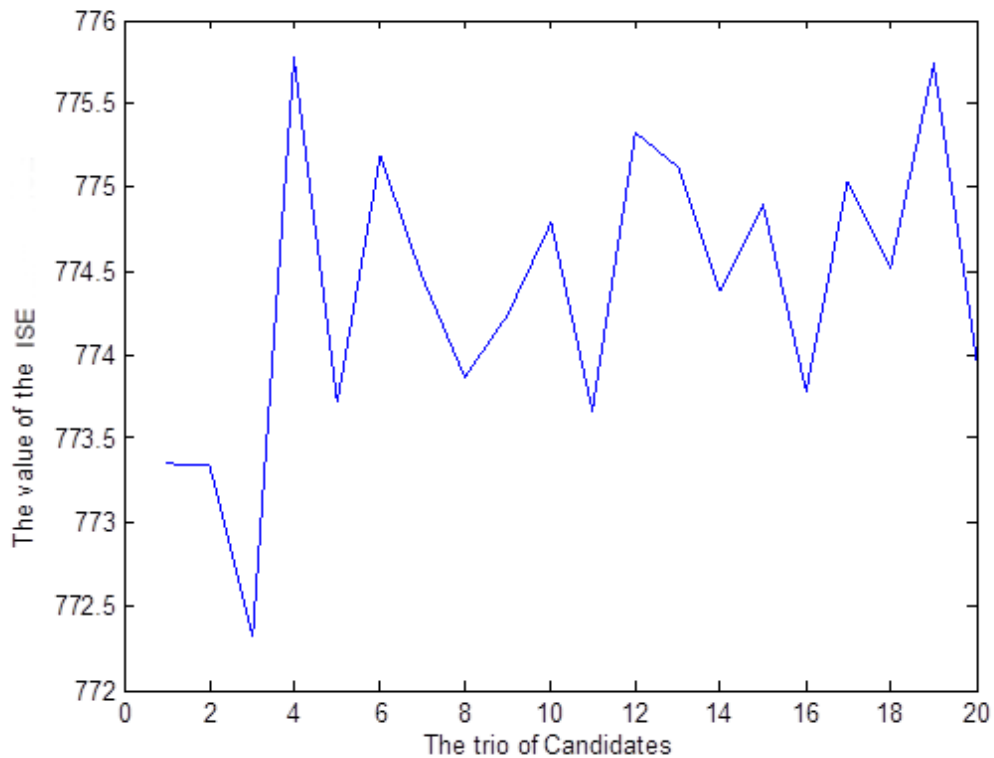
- Limits of the PID parameters:** This section contains six input fields arranged in a 3x2 grid. The rows correspond to the parameters  $K$ ,  $T_i$ , and  $T_d$ . The columns represent the minimum and maximum values for each parameter:  $K$  min,  $K$  max,  $T_i$  min,  $T_i$  max,  $T_d$  min, and  $T_d$  max.
- General Settings:** This section contains two input fields: "Number of Iterations" and "Number of Candidates".
- Input parameters of the Normal Distribution:** This section contains six input fields arranged in a 3x2 grid. The rows correspond to the parameters  $K$ ,  $T_i$ , and  $T_d$ . The columns represent the mean ( $\mu$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ) for each parameter:  $\mu K$ ,  $\sigma K$ ,  $\mu T_i$ ,  $\sigma T_i$ ,  $\mu T_d$ , and  $\sigma T_d$ .

A blue "Start" button is located on the right side of the window, below the "General Settings" section.

### 2.3) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της G(s)

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 20 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον αλγόριθμο θα τον τρέξουμε για 100 επαναλήψεις, δηλαδή έναν ικανοποιητικό αριθμό.

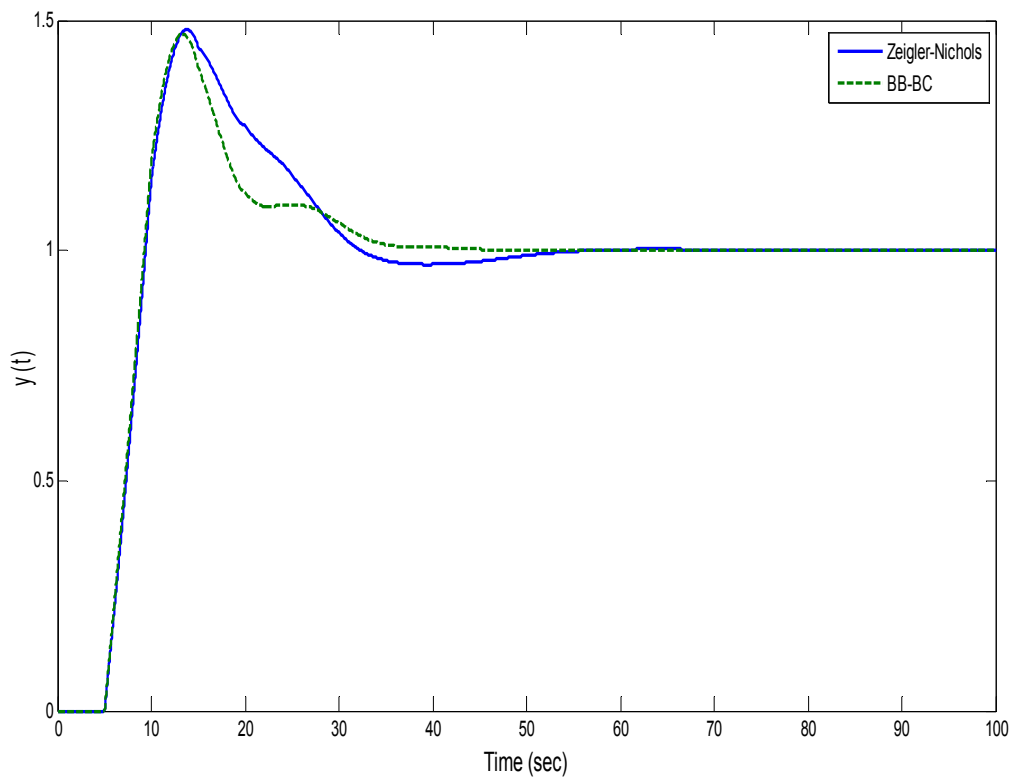
Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου BB-BC θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της μεθόδου Zeigler-Nichols.



Εικόνα 2.4: Η τιμές του fitness function J για κάθε τριάδα τιμών των παραμέτρων K, Ti, Td

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 2.4 η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την τρίτη τριάδα τιμών των παραμέτρων του PID ελεγκτή. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method   | K     | Ti     | Td    |
|-----------------|-------|--------|-------|
| Zeigler-Nichols | 4.06  | 9.25   | 2.31  |
| BB-BC           | 4.422 | 11.912 | 1.948 |



Εικόνα 2.5: Η απόκριση της εξόδου του συστήματος με τις τιμές του ΖΝ και η απόκριση του συστήματος με τις τιμές του ΒΒ-ΒC



Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 2.5 η μέθοδος ZN και ο αλγόριθμος BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method   | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα |
|-----------------|-----------------|-----------|----------------------|---------------|
| Zeigler-Nichols | 8.99 sec        | 48.25%    | 29.4 sec             | 0.0109        |
| BB-BC           | 8.83 sec        | 47.14%    | 30.8 sec             | 0.001         |

- Χρόνος ανύψωσης: Ο χρόνος στον οποίο φθάνει στο 90% της τελικής τιμής (σε δευτερόλεπτα).
- Χρόνος αποκατάστασης: Ο χρόνος στον οποίο σταθεροποιείται μεταξύ του  $\pm 5\%$  της τελικής τιμής (σε δευτερόλεπτα).
- Το μόνιμο σφάλμα υπολογίστηκε στα 50sec.

## 2.4) Παράδειγμα συντονισμού Fuzzy PID ελεγκτή με τον αλγόριθμο Big Bang-Big Crunch

Ο αλγόριθμος BB-BC θα εφαρμοστεί στην συνάρτηση μεταφοράς

$$G(s) = \frac{16}{0.5s^2 + 1.5s + 1}$$

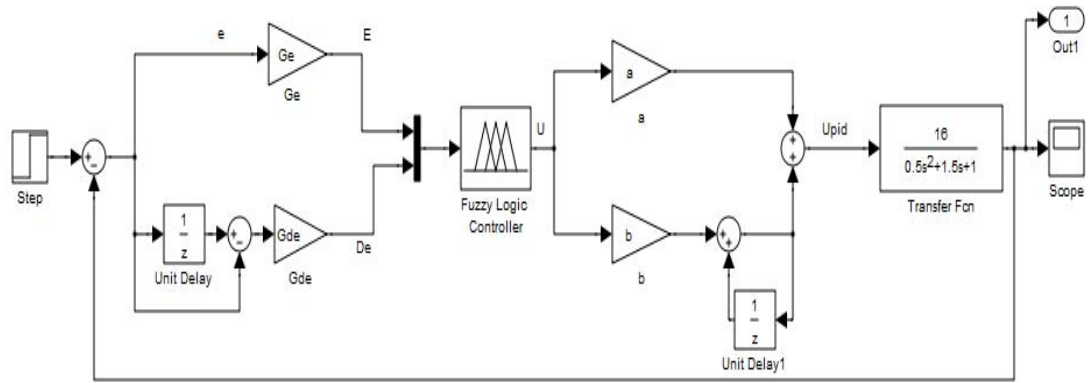
η οποία είναι πρώτου βαθμού. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.3sec. Σαν συνάρτηση καταλληλότητας θα χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση ISE(Integrated Squared Error). Η προσομοίωση θα γίνει στην εφαρμογή του Matlab, Simulink. Σκοπός του αλγορίθμου είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ , δηλαδή είναι μια 4 διαστάσεων περίπτωση. Τα όρια των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  είναι τα ακόλουθα:

| Παράμετρος | $G_e$ | $G_{\Delta e}$ | a   | b   |
|------------|-------|----------------|-----|-----|
| Min        | 0.6   | 0              | 0.6 | 0   |
| Max        | 1     | 0.2            | 1   | 0.2 |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις παραμέτρους  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  είναι οι ακόλουθες:

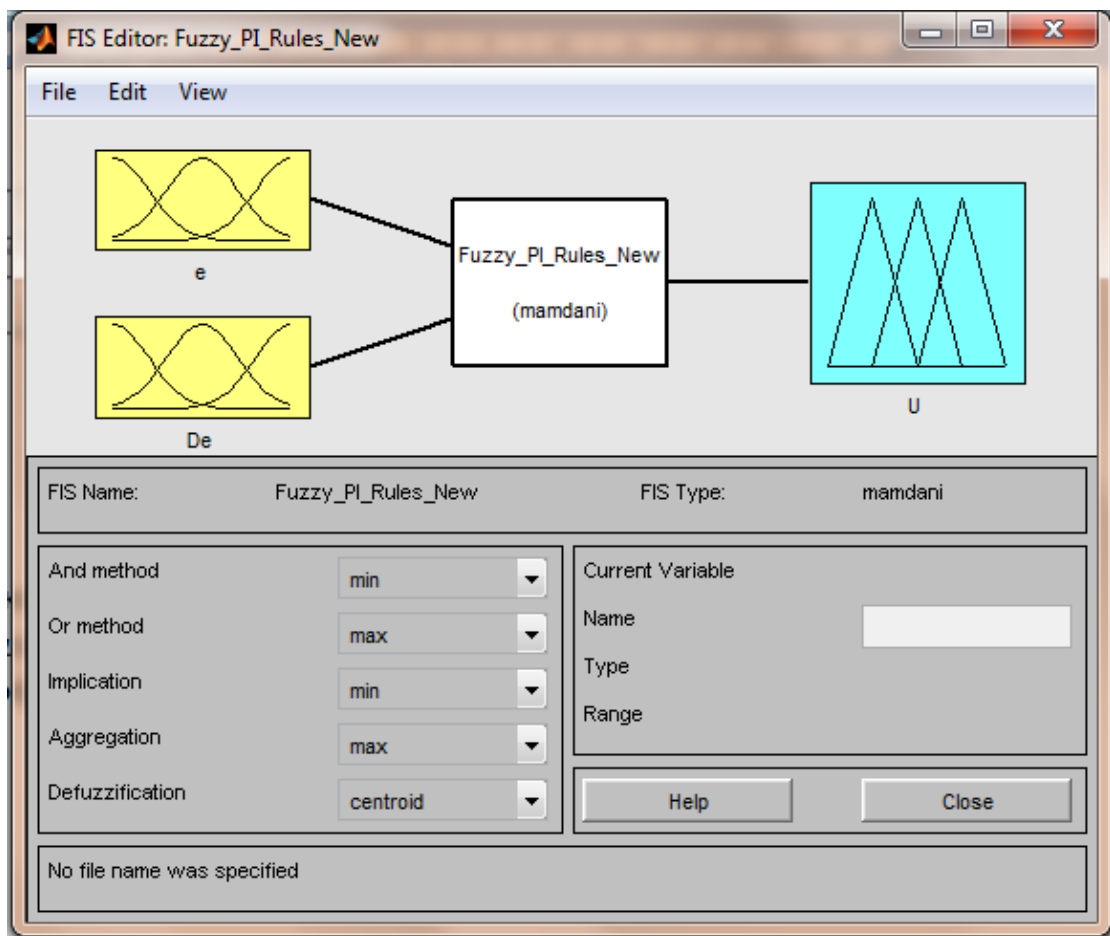
| Παράμετρος                    | $G_e$ | $G_{\Delta e}$ | a   | b   |
|-------------------------------|-------|----------------|-----|-----|
| $\mu$ (mean)                  | 0     | 0              | 0   | 0   |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.2   | 0.5            | 0.2 | 0.5 |

Το κλειστό σύστημα ελέγχου με Fuzzy PID είναι της μορφής:

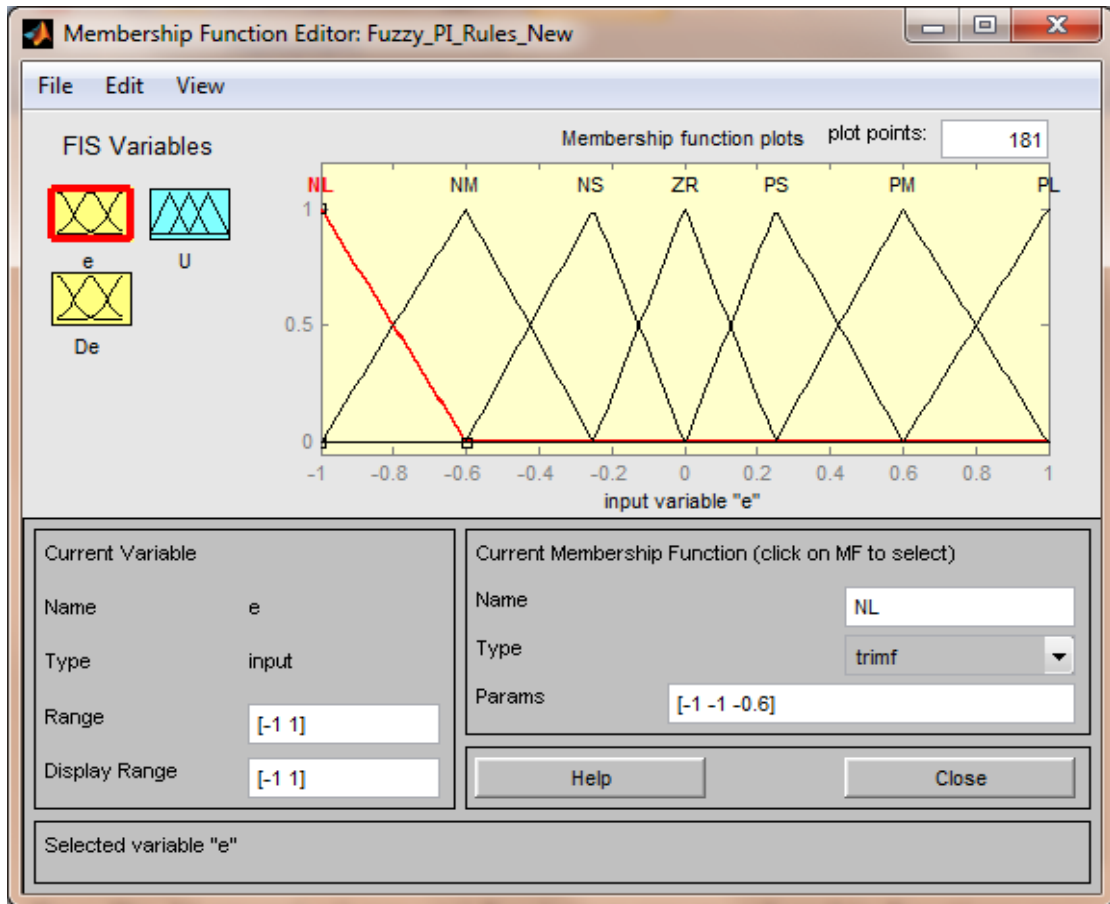


όπου τα  $G_e$  και  $G_{\Delta e}$  είναι οι συντελεστές του σφάλματος και η διαφορά του σφάλματος αντίστοιχα. Τα  $a$  και  $b$  είναι οι συντελεστές για την PD και PI μορφή του Ελεγκτή Ασαφής Λογικής (Fuzzy Logic Controller-FLC).

Η μέθοδος ασαφοποίησης και αποασαφοποίησης του FLC είναι της μορφής:



Τα  $e$  (Σφάλμα),  $\Delta e$  (Μεταβολή του Σφάλματος),  $U$  (Σήμα ελέγχου) αποτελούνται από 7 membership functions τύπου τριγώνου στο διάστημα  $[-1,1]$  και είναι της μορφής:



Τέλος οι κανόνες του Fuzzy PID είναι ίδιοι με τους κανόνες του Fuzzy PI.

Τα όρια των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  πάρθηκαν συγκριτικά με τις αρχικές τιμές  $[0.8, 0.1, 0.8, 0.1]$ .

Για την πιο εύκολη διεξαγωγή των πειραμάτων υλοποιήθηκε στην εφαρμογή του Matlab, Guide (GUI-graphical user interface), ένα πλαίσιο στο οποίο θα δίνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου και θα ξεκινά ο αλγόριθμος. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι το ακόλουθο:

The image shows a MATLAB GUI window titled "G1\_Fuzzy\_BB\_BC\_GUI". The window contains three main sections of input fields:

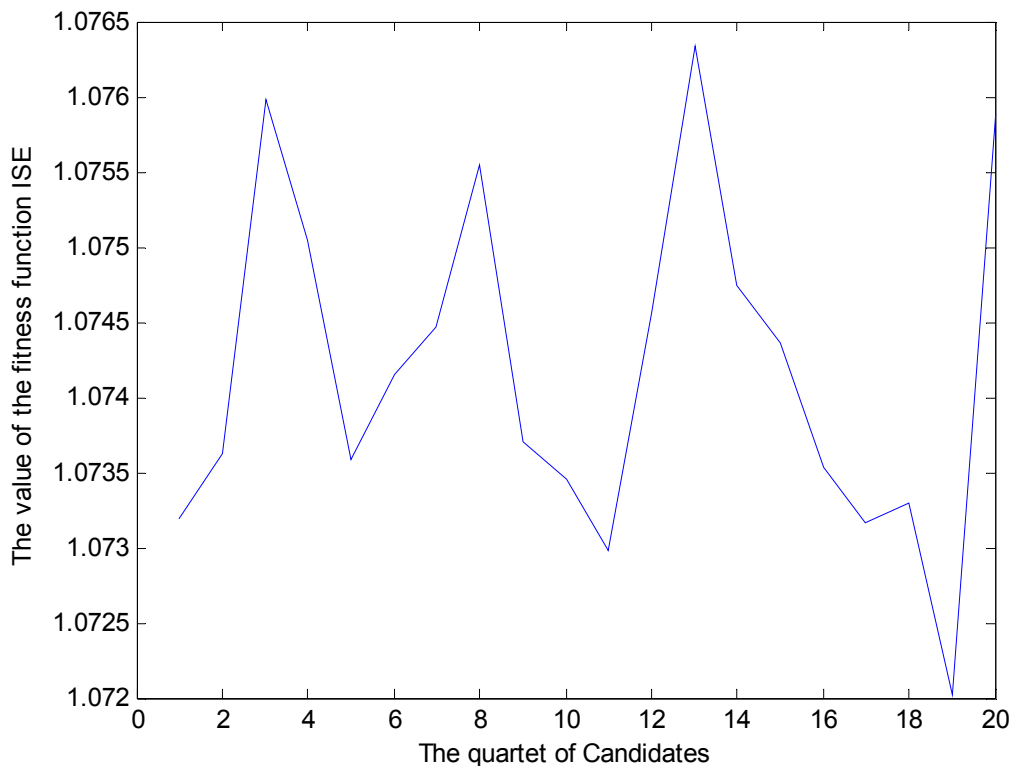
- Limits of the PID parameters:** A group box containing eight input fields arranged in two columns. The left column contains "Ge min", "Gde min", "a min", and "b min". The right column contains "Ge max", "Gde max", "a max", and "b max".
- General Settings:** A group box containing two input fields: "Number of Iterations" and "Number of Candidates".
- Input parameters of the Normal Distribution:** A group box containing eight input fields arranged in two columns. The left column contains " $\mu$  Ge", " $\mu$  Gde", " $\mu$  a", and " $\mu$  b". The right column contains " $\sigma$  Ge", " $\sigma$  Gde", " $\sigma$  a", and " $\sigma$  b".

Below the input fields, there is a large blue button labeled "Start".

## 2.5) Αποτελέσματα του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της $G(s)$ με Fuzzy PID

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 20 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον αλγόριθμο θα τον τρέξουμε για 100 επαναλήψεις, δηλαδή έναν ικανοποιητικό αριθμό.

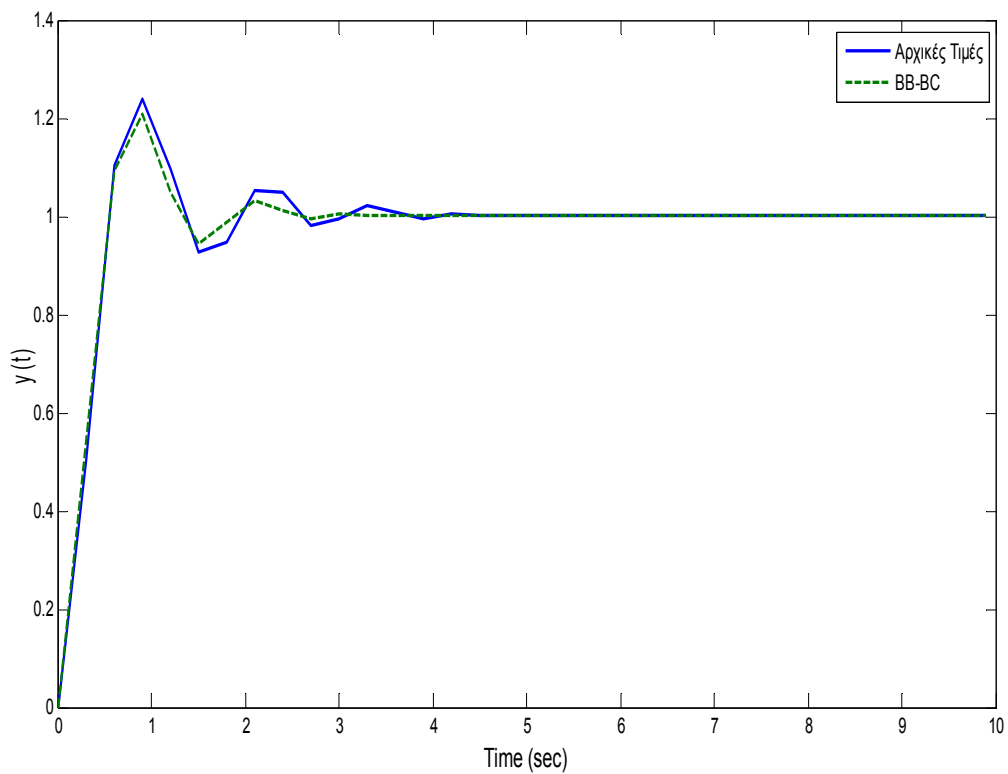
Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου BB-BC θα συγκριθούν με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ .



Εικόνα 2.6: Η τιμές του fitness function  $J$  για κάθε τετράδα τιμών των παραμέτρων  $G_e, G_{\Delta e}, a, b$

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 2.6 η ελάχιστη τιμή του fitness function  $J$  επιτυγχάνεται με την δέκατη ένατη τετράδα τιμών των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ . Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method                            | $G_e$  | $G_{\Delta e}$ | a     | b      |
|--|--------|----------------|-------|--------|
| Αρχ. Τιμές [ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ] | 0.8    | 0.1            | 0.8   | 0.1    |
| BB-BC                                    | 0.7349 | 0.0312         | 0.802 | 0.0961 |



Εικόνα 2.7: Η απόκριση της εξόδου του συστήματος με τις αρχικές τιμές των  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  και η απόκριση του συστήματος με τις τιμές του BB-BC



Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 2.7 οι αρχικές τιμές των  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$  και ο αλγόριθμος BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                          | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα |
|--|-----------------|-----------|----------------------|---------------|
| Αρχ. Τιμές $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ | 0.4958          | 24%       | 2.28                 | 0.0002        |
| BB-BC                                  | 0.4945          | 21%       | 1.5369               | 0.0002        |

Το μόνιμο σφάλμα υπολογίστηκε στα 10sec.

## 2.6) Συμπεράσματα χρήσης του αλγορίθμου Big Bang-Big Crunch

Ο αλγόριθμος Big Bang-Big Crunch είναι ένας εύκολα υλοποιήσιμος αλγόριθμος, ο οποίος μπορεί πολύ εύκολα και γρήγορα να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε περίπτωση όσων διαστάσεων (μεταβλητών) και αν είναι. Είναι ένας αλγόριθμος που δεν χρειάζεται πολύ προετοιμασία καθότι δεν περιέχει πολλές εσωτερικές μεταβλητές. Όμως ο αλγόριθμος μπορεί να μεταβάλει τις μεταβλητές μέσα σε όρια που εμείς του έχουμε ορίσει. Επιπλέον είναι ένας αλγόριθμος, ο οποίος θέλει αρκετές επαναλήψεις ούτως ώστε να συγκλίνουν οι μεταβλητές στην βέλτιστη τιμή τους. Για να μπορέσουμε να «ανοίξουμε» τα όρια των μεταβλητών θα πρέπει να δημιουργήσουμε και μεγαλύτερο πληθυσμό τυχαίων αρχικών πιθανών λύσεων. Αυτό θα έχει όμως ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος να γίνει αρκετά βαρύς και να χρειάζεται μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμού των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών. Οπότε, ο αλγόριθμος θα χάσει τον χαρακτήρα του γρήγορου και εύκολα υλοποιήσιμου αλγορίθμου. Όλα τα προηγούμενα έχουν σαν συνέπεια ο αλγόριθμος BB-BC να μην μπορεί να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους ενός PID και Fuzzy PID ελεγκτή. Όπως παρατηρούμε και στα δύο παραδείγματα που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια ο αλγόριθμος BB-BC βελτιώνει ελάχιστα τις αποκρίσεις των κλειστών συστημάτων, χωρίς να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για αυτό τον λόγο ο αλγόριθμος BB-BC δεν συνίσταται για βελτιστοποίηση παραμέτρων ελεγκτών. Πάρα ταύτα ο αλγόριθμος συνίσταται για βοηθητικός αλγόριθμος σε αλγορίθμους που χρήζουν βελτιστοποίηση των εσωτερικών τους μεταβλητών, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος Extremum Seeking. Ο συνδυασμός των δυο αλγορίθμων θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Συνδυασμός των αλγορίθμων Extermum Seeking και Big Bang-Big Crunch

**Extremum Seeking + Big Bang-Big Crunch =  
Combined Power**

### 3.1) Η συνύπαρξη των δυο αλγορίθμων

Όπως αναφέρθηκε πρότερα, σκοπός της πτυχιακής ήταν η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός PID ή Fuzzy ελεγκτή σε πραγματικό χρόνο. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Extremum Seeking, ο οποίος βρίσκει εφαρμογή πάνω στην βελτιστοποίηση παραμέτρων ελεγκτών. Όμως όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, παρά την ευχέρεια του αλγορίθμου στην εύρεση βέλτιστων τιμών, ο αλγόριθμος ES χρειάζεται πολλές εσωτερικές μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν την απόδοσή του. Αυτές οι εσωτερικές μεταβλητές του ES δεν μπορούν να γενικευθούν έτσι ώστε να εφαρμόζονται σε όλα σχεδόν τα μοντέλα των συστημάτων. Με άλλα λόγια, κάθε σύστημα χρειάζεται δικές του τιμές άρα απαιτείται χρόνος και ιδιαίτερη προσπάθεια για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Αυτό κάνει τον αλγόριθμο δύσχρηστο και χρονοβόρο. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Big Bang-Big Crunch να αναλάβει την εύρεση των βέλτιστων τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του ES. Ο αλγόριθμος BB-BC είναι ένας εύκολος, εύχρηστος και γρήγορος αλγόριθμος ο οποίος δεν απαιτεί τον ορισμό εσωτερικών μεταβλητών για να εφαρμοστεί. Μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε πρόβλημα, χωρίς κάποιον περιορισμό στον αριθμό των διαστάσεων (αριθμό των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση).

### 3.2) Παράδειγμα συντονισμού PID ελεγκτή με τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch

Ο συνδυασμός των αλγορίθμων ES και BB-BC θα εφαρμοστεί στην συνάρτηση μεταφοράς

$$G(s) = \frac{1}{20s + 1} e^{-5s}$$

η οποία είναι πρώτου βαθμού και έχει μια χρονική καθυστέρηση 5 δευτερολέπτων. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01, ενώ οι χρονικές καθυστερήσεις προσεγγίζονται από μια τρίτου βαθμού Pade προσέγγιση. Σκοπός είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των εσωτερικών μεταβλητών του ES  $\xi(k-1)$ ,  $\gamma_i$ ,  $\alpha_i$ . Επιπλέον οι συντελεστές  $a$  και  $h$  του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES (J\_ES) θα κυμανθεί από  $t_0=10\text{sec}$  έως  $T=100\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

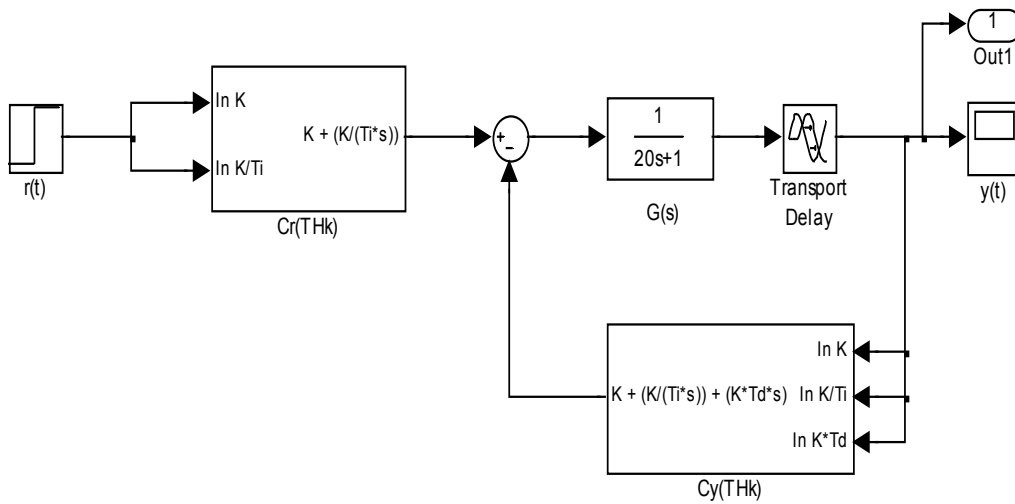
| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.03       | 50         | 1100       | 50         | 0.01       | 0.9        | 0.01       |
| Max             | 0.05       | 100        | 1300       | 100        | 0.05       | 1.1        | 0.05       |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

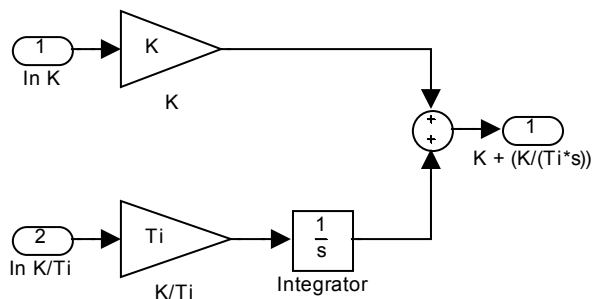
| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.1        | 0.5        | 0.1        | 0.5        | 0.5        | 0.1        | 0.5        |

Η προσομοίωση θα γίνει στην εφαρμογή του Matlab, Simulink.

Το σύστημα μας στο simulink:

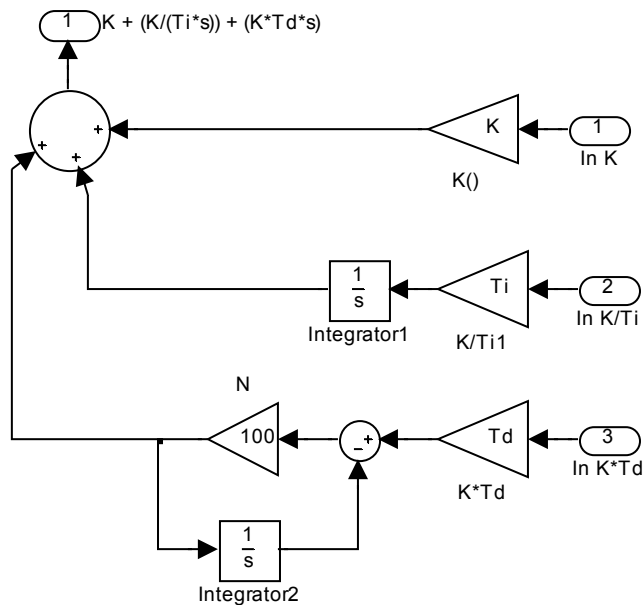


όπου, το  $r(t)$  είναι η βηματική είσοδος, το  $G(s)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς χωρίς την χρονική καθυστέρηση, η οποία εισέρχεται στο σύστημα με το Transport Delay (5 sec),  $y(t)$  είναι ένα scope στο οποίο θα δούμε γραφικά την απόκριση του συστήματος, το  $C_r(THk)$  είναι:



$$\text{το } C_r = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

και το  $C_y(T_Hk)$  είναι:



$$\text{το } C_\psi = k \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES πάρθηκαν σύμφωνα με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην αντίστοιχη εφαρμογή του αλγορίθμου ES στην συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς στο Κεφάλαιο 1.

Ο κώδικας ο οποίος υλοποιεί τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC είναι γραμμένος σε script στο Matlab βρίσκεται στο παράρτημα Γ.

Για την πιο εύκολη διεξαγωγή των πειραμάτων υλοποιήθηκε στην εφαρμογή του Matlab, Guide (GUI-graphical user interface), ένα πλαίσιο στο οποίο θα δίνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου και θα ξεκινά ο αλγόριθμος. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι το ακόλουθο:

Combined\_Algorithms\_BBBC\_ES\_GUI

Limits of the ES's internal parameters

c min  c max

g1 min  g1 max

g2 min  g2 max

g3 min  g3 max

a1 min  a1 max

a2 min  a2 max

a3 min  a3 max

Input parameters of the Normal Distribution

μ c  σ c

μ g1  σ g1

μ g2  σ g2

μ g3  σ g3

μ a1  σ a1

μ a2  σ a2

μ a3  σ a3

Z-N PID parameters

K

Ti

Td

General Settings

Number of Iterations

Number of Candidates

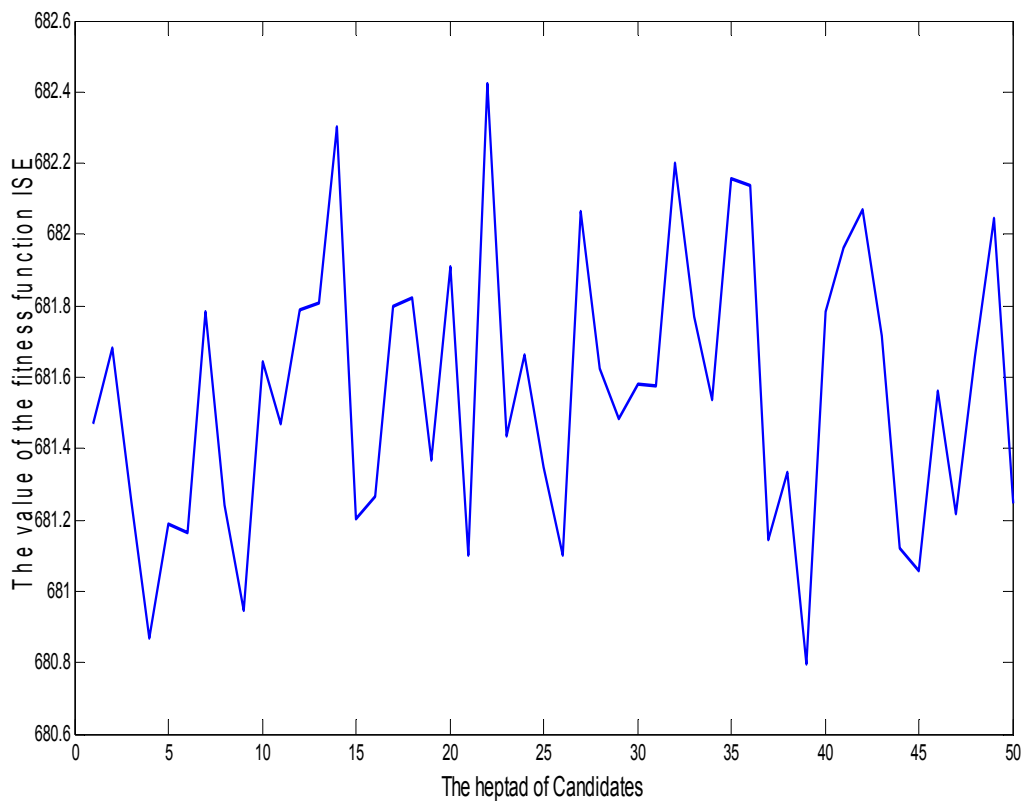
Start



### 3.3) Αποτελέσματα του συνδυασμού των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της G(s)

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 50 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις, αριθμό επαναλήψεων στον οποίο επέρχεται σύγκλιση. Επιλέχθηκε μεγάλος αριθμός τυχαίων τιμών για κάθε παράμετρο διότι επιλέξαμε μεγάλο εύρος ορίων για κάθε παράμετρο.

Τα αποτελέσματα του συνδυασμού των αλγορίθμων BB-BC και ES θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ES που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 1.

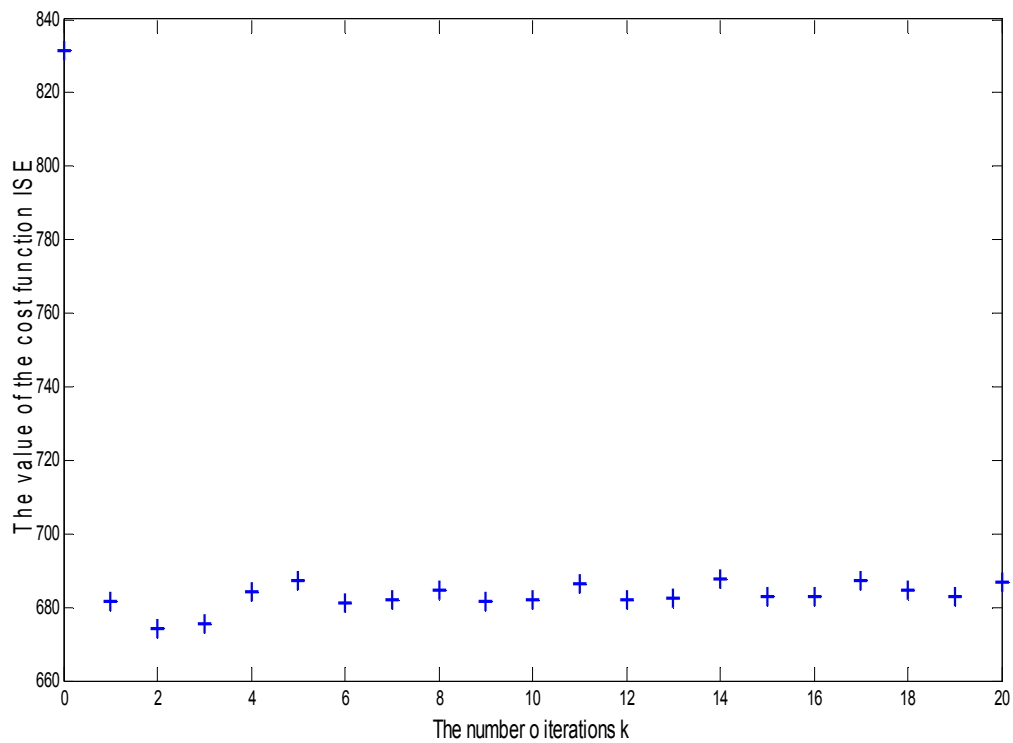


Εικόνα 3.1: Η τιμές του fitness function J για κάθε επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 3.1 η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την τριακοστή ένατη επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ES                    | 0.04       | 100        | 1200       | 100        | 0.05       | 1          | 0.05       |
| Combined ES and BB-BC | 0.04       | 87.1621    | 1222       | 84.8434    | 0.0291     | 0.9833     | 0.0276     |

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.

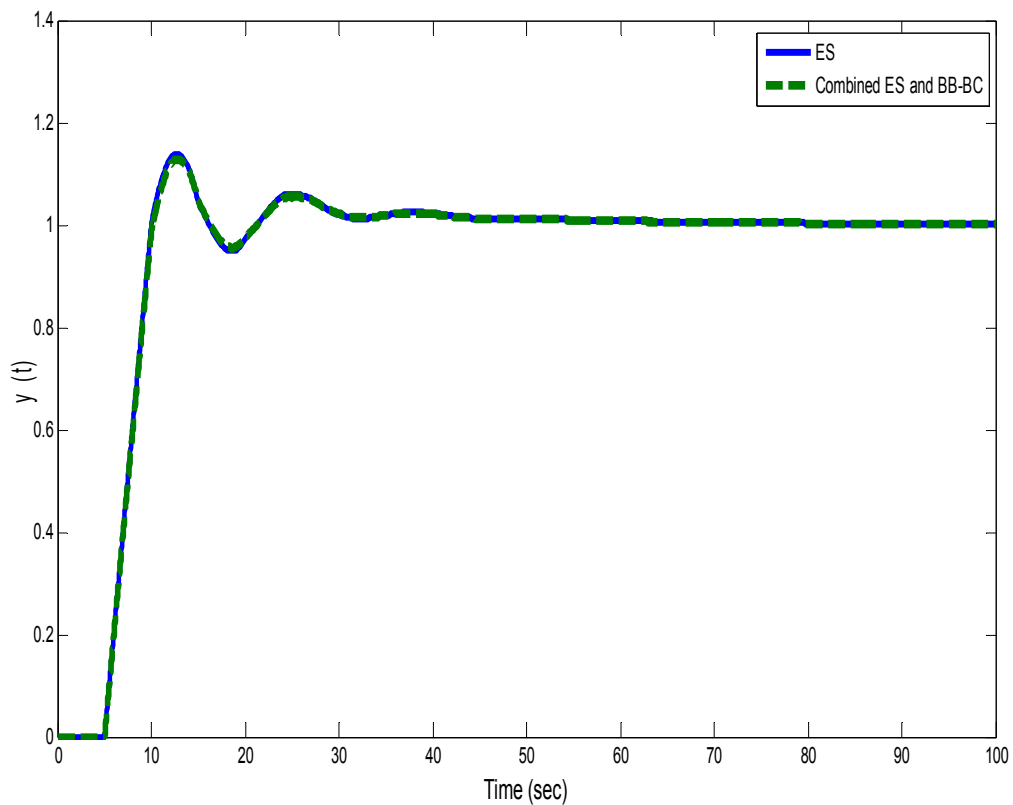


Εικόνα 3.2: Η εξέλιξη τις τιμές του cost function  $J(\theta)$

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 3.2 η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τρίτη επανάληψη ( $k=2$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τρεις επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K      | $T_i$   | $T_d$  |
|---|--------|---------|--------|
| ES  | 4.0966 | 25.13   | 2.245  |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 4.0304 | 25.0875 | 2.2267 |



Εικόνα 3.3: Η απόκριση της εξόδου του συστήματος με τις τιμές του ES και η απόκριση του συστήματος με τις τιμές του ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 3.3 ο αλγόριθμος ES και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα |
|---|-----------------|-----------|----------------------|---------------|
| ES  | 9.489 sec       | 13.84%    | 27.15 sec            | 0.0015        |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 9.5643 sec      | 12.86%    | 26.858 sec           | 0.0014        |

- Χρόνος ανύψωσης: Ο χρόνος στον οποίο φθάνει στο 90% της τελικής τιμής (σε δευτερόλεπτα).
- Χρόνος αποκατάστασης: Ο χρόνος στον οποίο σταθεροποιείται μεταξύ του  $\pm 5\%$  της τελικής τιμής (σε δευτερόλεπτα).
- Το μόνιμο σφάλμα υπολογίστηκε στα 100sec.

### 3.4) Παράδειγμα συντονισμού Fuzzy PID ελεγκτή με τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch

Ο συνδυασμός των αλγορίθμων ES και BB-BC θα εφαρμοστεί στην συνάρτηση μεταφοράς

$$G(s) = \frac{16}{0.5s^2 + 1.5s + 1}$$

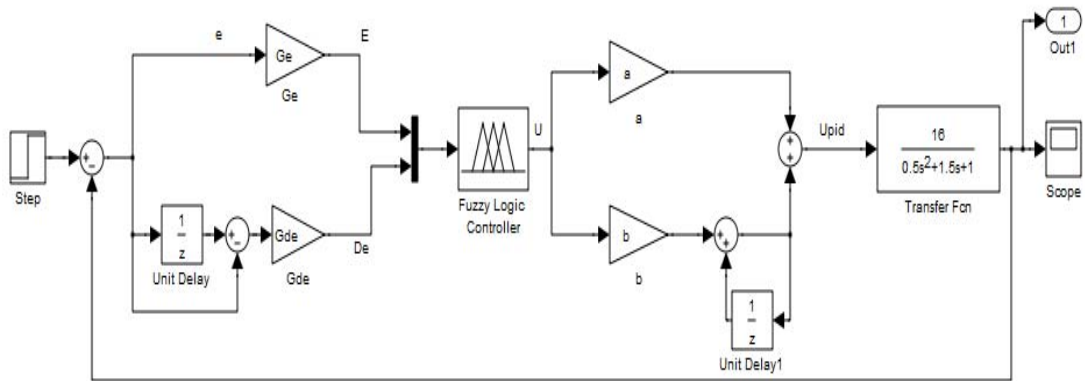
η οποία είναι πρώτου βαθμού. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.4. Επιπλέον οι συντελεστές a και h ορίζονται 0,8 και 0,5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES (J\_ES) θα κυμανθεί από  $t_0=1.2\text{sec}$  έως  $T=10\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = a \pi$ . Η προσομοίωση θα γίνει στην εφαρμογή του Matlab, Simulink. Σκοπός είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των εσωτερικών μεταβλητών του ES  $\xi(k-1)$ ,  $\gamma_i$ ,  $\alpha_i$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.1        | 9          | 10         | 9          | 10         | 0.1        | 0.01       | 0.1        | 0.01       |
| Max             | 0.15       | 11         | 15         | 11         | 15         | 0.15       | 0.02       | 0.15       | 0.02       |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες

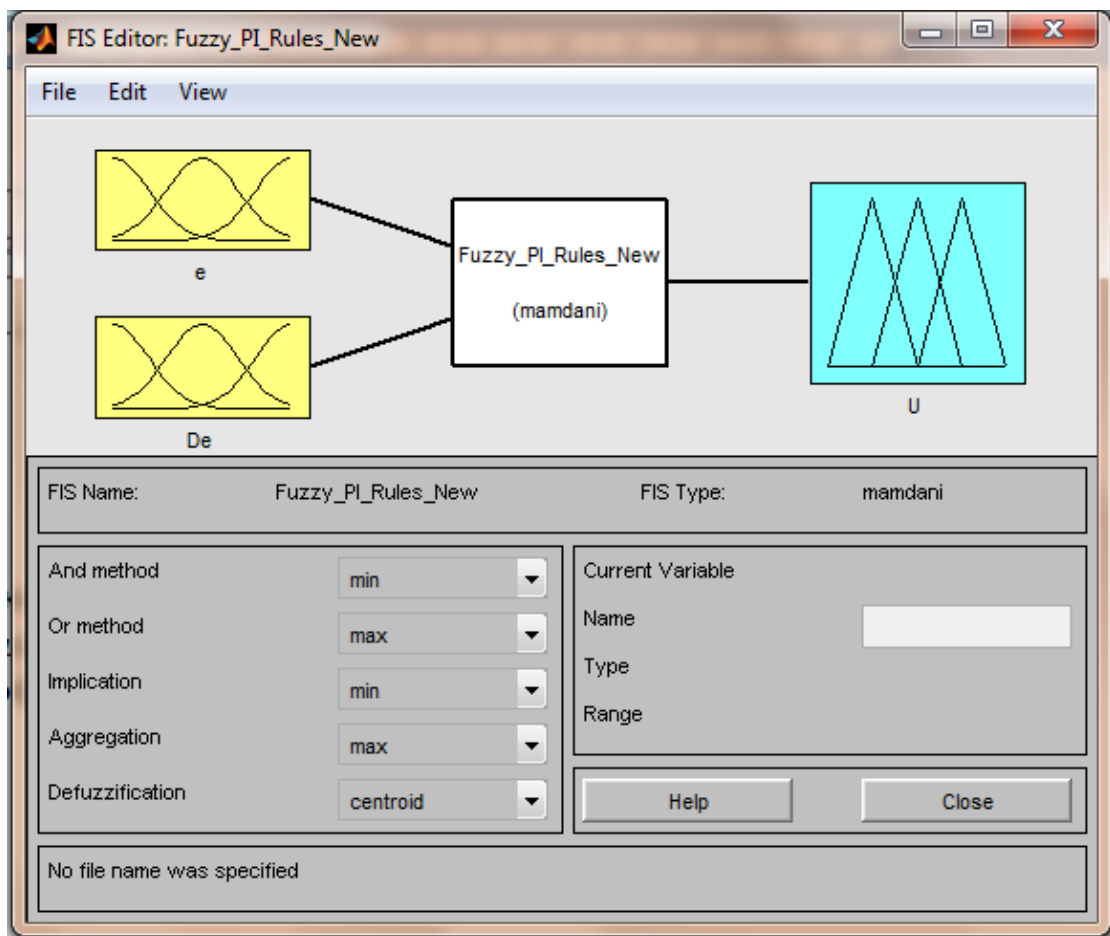
| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.1        | 0.1        | 0.2        | 0.1        | 0.2        | 0.1        | 0.2        | 0.1        | 0.2        |

Το κλειστό σύστημα ελέγχου με Fuzzy PID είναι της μορφής:

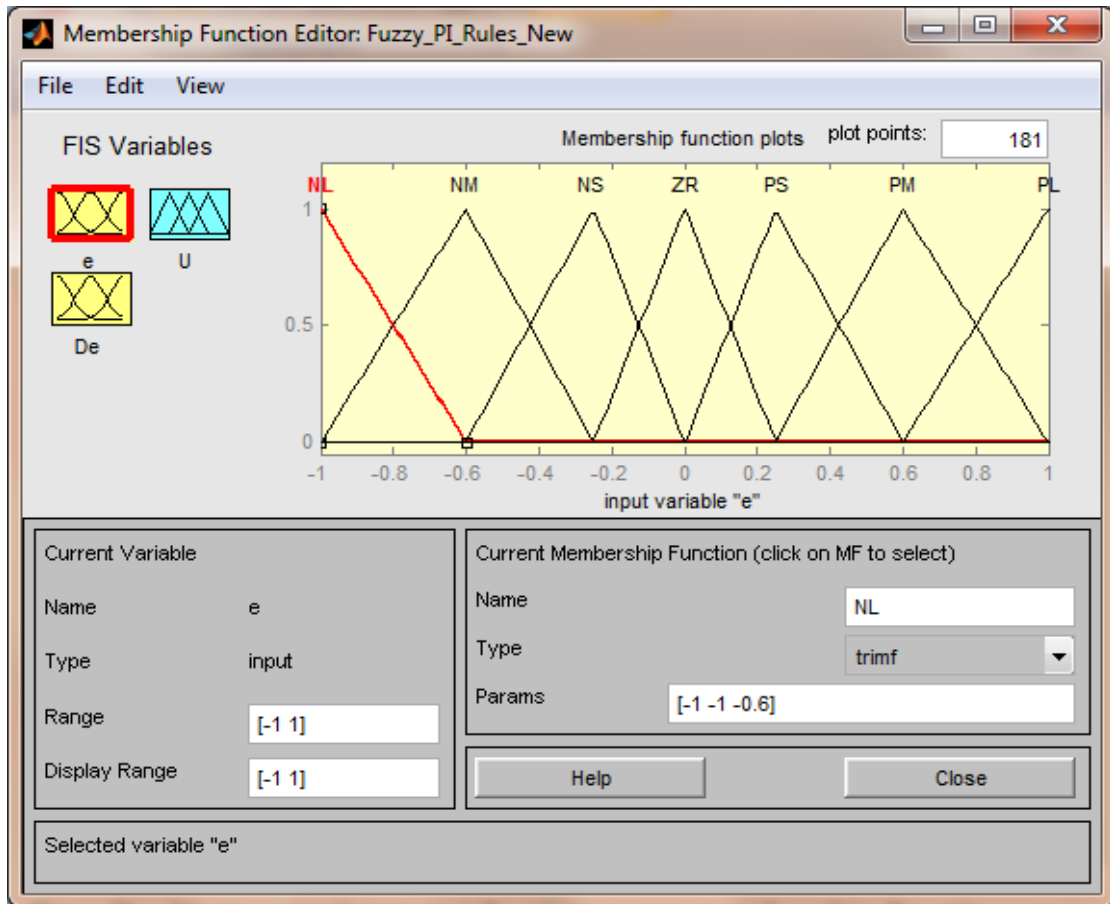


όπου τα  $G_e$  και  $G_{\Delta e}$  είναι οι συντελεστές του σφάλματος και η διαφορά του σφάλματος αντίστοιχα. Τα  $a$  και  $b$  είναι οι συντελεστές για την PD και PI μορφή του Ελεγκτή Ασαφής Λογικής (Fuzzy Logic Controller-FLC).

Η μέθοδος ασαφοποίησης και αποασαφοποίησης του FLC είναι της μορφής:



Τα  $e$  (Σφάλμα),  $De$  (Μεταβολή του Σφάλματος),  $U$  (Σήμα ελέγχου) αποτελούνται από 7 membership functions τύπου τριγώνου στο διάστημα  $[-1,1]$  και είναι της μορφής:



Τέλος οι κανόνες του Fuzzy PID είναι ίδιοι με τους κανόνες του Fuzzy PI.

Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES πάρθηκαν σύμφωνα με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην αντίστοιχη εφαρμογή του αλγορίθμου ES στην συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς στο Κεφάλαιο 1.



Για την πιο εύκολη διεξαγωγή των πειραμάτων υλοποιήθηκε στην εφαρμογή του Matlab, Guide (GUI-graphical user interface), ένα πλαίσιο στο οποίο θα δίνονται οι τιμές όλων των παραμέτρων του αλγορίθμου και θα ξεκινά ο αλγόριθμος. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι το ακόλουθο:

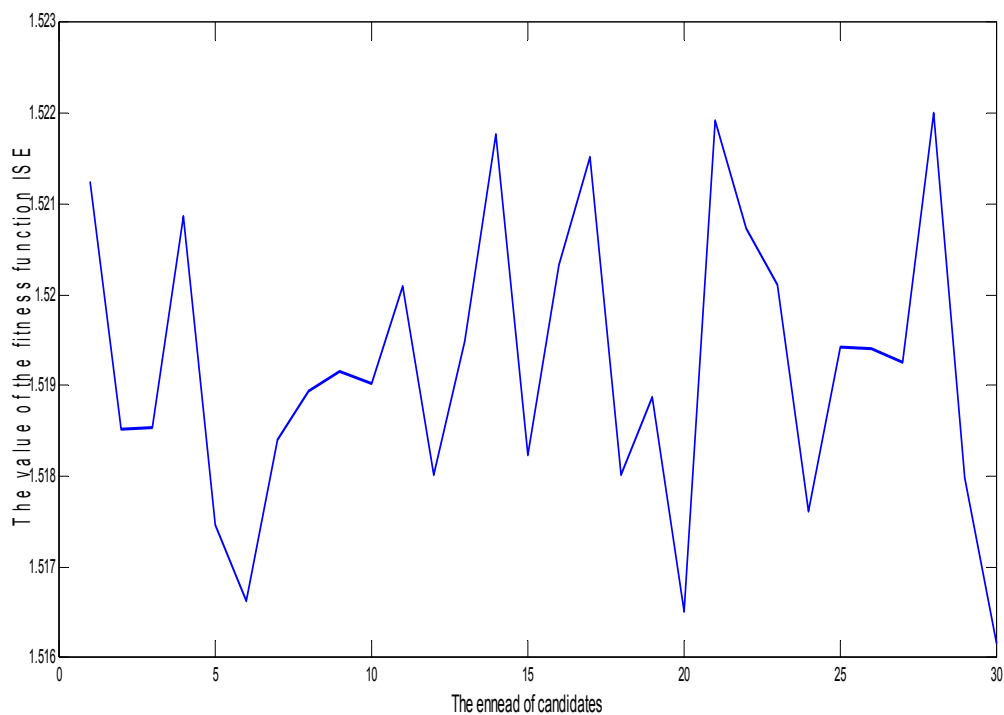
The screenshot shows a MATLAB GUI window titled "Combined\_Algorithms\_BBBC\_ES\_Fuzzy\_PID\_GUI". The interface is organized into several sections:

- Limits of the ES's internal parameters:** A grid of 16 input fields for parameters: c min, c max, g1 min, g1 max, g2 min, g2 max, g3 min, g3 max, g4 min, g4 max, a1 min, a1 max, a2 min, a2 max, a3 min, a3 max, and a4 min, a4 max.
- Input parameters of the Normal Distribution:** A grid of 8 input fields for parameters:  $\mu c$ ,  $\sigma c$ ,  $\mu g1$ ,  $\sigma g1$ ,  $\mu g2$ ,  $\sigma g2$ ,  $\mu g3$ ,  $\sigma g3$ ,  $\mu g4$ ,  $\sigma g4$ ,  $\mu a1$ ,  $\sigma a1$ ,  $\mu a2$ ,  $\sigma a2$ ,  $\mu a3$ ,  $\sigma a3$ , and  $\mu a4$ ,  $\sigma a4$ .
- Z-N PID parameters:** Four input fields for parameters:  $G_e$ ,  $G_{de}$ ,  $a$ , and  $b$ .
- General Settings:** Two input fields for "Number of iterations" and "Number of Candidates".
- Start:** A blue button labeled "Start" located at the bottom right of the GUI.

### 3.5) Αποτελέσματα του συνδυασμού των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για το κλειστό σύστημα της G(s) με Fuzzy PID

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις, αριθμό επαναλήψεων στον οποίο επέρχεται σύγκλιση.

Τα αποτελέσματα του συνδυασμού των αλγορίθμων BB-BC και ES θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ES που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 1.

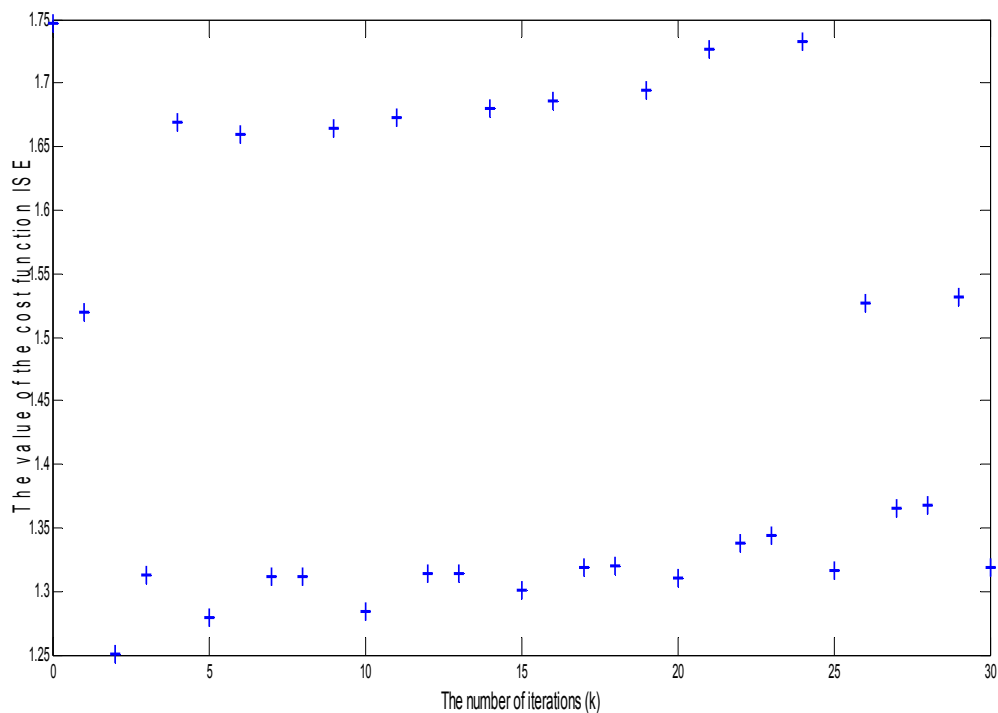


Εικόνα 3.4: Η τιμές του fitness function J για κάθε εννιάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 3.4 η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την τριακοστή εννιάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ES                    | 0.1        | 10         | 10         | 10         | 10         | 0.1        | 0.01       | 0.1        | 0.01       |
| Combined ES and BB-BC | 0.1325     | 10.1235    | 12.4875    | 9.8525     | 12.3138    | 0.1187     | 0.0158     | 0.1211     | 0.0136     |

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 30 επαναλήψεις.

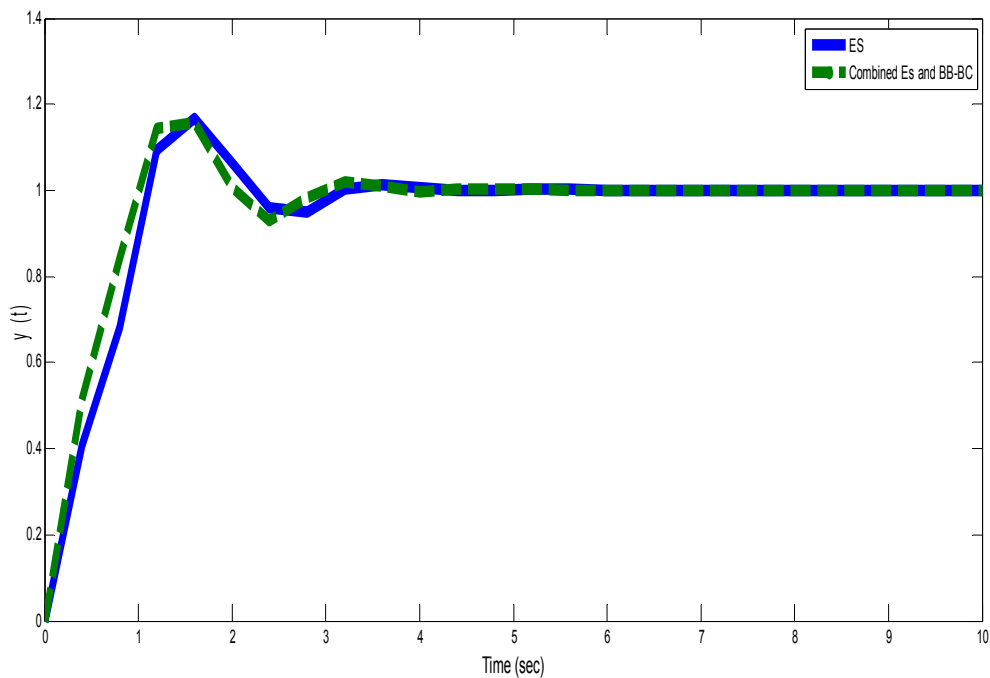


Εικόνα 3.5: Η εξέλιξη τις τιμές του cost function  $J(\theta)$

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 3.5 η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τρίτη επανάληψη ( $k=2$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τρεις επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του Fuzzy PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | $G_e$  | $G_{\Delta e}$ | a      | b      |
|---|--------|----------------|--------|--------|
| ES  | 0.5104 | 0.071          | 0.5104 | 0.071  |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 0.5761 | 0.0685         | 0.5780 | 0.0718 |



Εικόνα 3.6: Η απόκριση της εξόδου του συστήματος με τις τιμές του ES και η απόκριση του συστήματος με τις τιμές του ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 3.6 ο αλγόριθμος ES και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα |
|---|-----------------|-----------|----------------------|---------------|
| ES  | 1.011 sec       | 16.78%    | 2.0548 sec           | 0             |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 0.8768 sec      | 15.86%    | 2.557 sec            | 0             |

Το μόνιμο σφάλμα υπολογίστηκε στα 10sec.

### **3.6) Συμπεράσματα χρήσης του συνδυασμού των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch**

Συνοψίζοντας το Κεφάλαιο 3, το συμπέρασμα στο οποίο οδηγούμαστε είναι ότι η συνύπαρξη των δύο αλγορίθμων δίνει πολύ καλά αποτελέσματα στην βελτιστοποίηση παραμέτρων ελεγκτών. Όπως παρατηρούμε και στα δύο παραδείγματα που αναλύθηκαν, ο συνδυασμός των δύο αλγορίθμων βελτιώνει αισθητά την απόκριση της εξόδου τόσο σε συστήματα με PID ελεγκτή όσο και σε συστήματα με Fuzzy PID ελεγκτή. Τα αποτελέσματα τα οποία παρατηρούμε στα παραδείγματα τα οποία αναλύθηκαν δεν έχουν τεράστιες διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ES. Αυτό συνέβη, διότι για την περάτωση αυτής της πτυχιακής εργασίας όπως είναι εύκολα κατανοητό υπήρξε μελέτη και πληθώρα πειραμάτων, με αποτέλεσμα οι τιμές που δόθηκαν στον αλγόριθμο ES να είναι αρκετά κοντά στις βέλτιστες τιμές. Όμως αυτός είναι ακριβώς και ο λόγος ύπαρξης του συνδυασμού των αλγορίθμων, δηλαδή να μην χρειαζόμαστε αρκετή μελέτη και πληθώρα πειραμάτων ούτως ώστε να βρούμε τιμές πολύ κοντά στις βέλτιστες. Με τον συνδυασμό των δύο αλγορίθμων επιτυγχάνουμε την βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ελεγκτών χωρίς την ανάγκη να υπάρξει προγενέστερα μελέτη του συστήματος και μεγάλος αριθμός πειραμάτων για την εύρεση των απαραίτητων εσωτερικών μεταβλητών του αλγορίθμου ES.

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

### **Βελτιστοποίηση των παραμέτρων PID και Fuzzy PID ελεγκτών διαφόρων συστημάτων**

#### 4.1) Σύστημα πρώτου βαθμού με πραγματικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{2}{4s + 1}$$

η οποία είναι πρώτου βαθμού με ένα πραγματικό πόλο στο -0.25. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01. Σαν αρχικές τιμές για τον PID ελεγκτή χρησιμοποιούμε τις τιμές που μας δίνει η μέθοδος Zeigler-Nichols, τιμές με τις οποίες θα συγκρίνουμε και τα αποτελέσματά μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του PID ελεγκτή.

Οι συντελεστές a και h του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES (J\_ES) θα κυμανθεί από  $t_0=0\text{sec}$  έως  $T=10\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

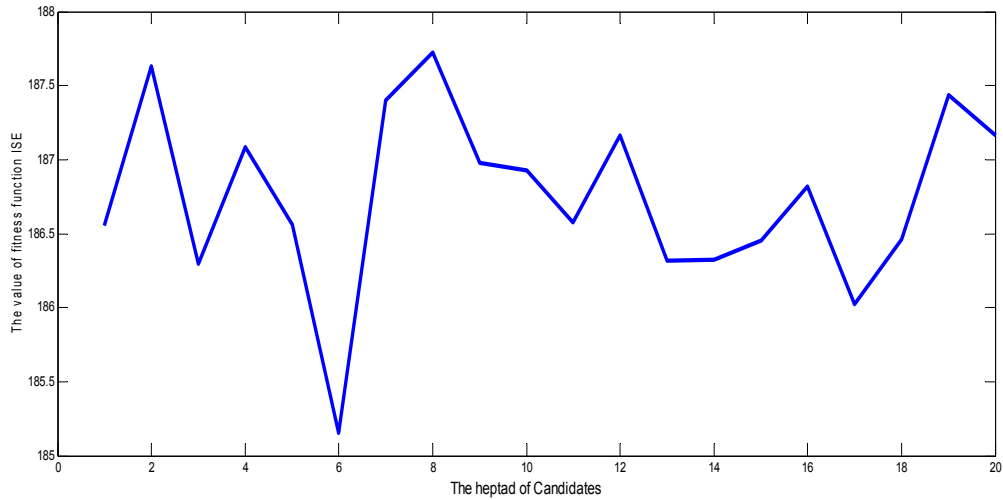
| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.0093     | 600        | 0          | 0          | 0.05       | 0.005      | 0.005      |
| Max             | 0.01       | 700        | 10         | 10         | 0.15       | 0.015      | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        |



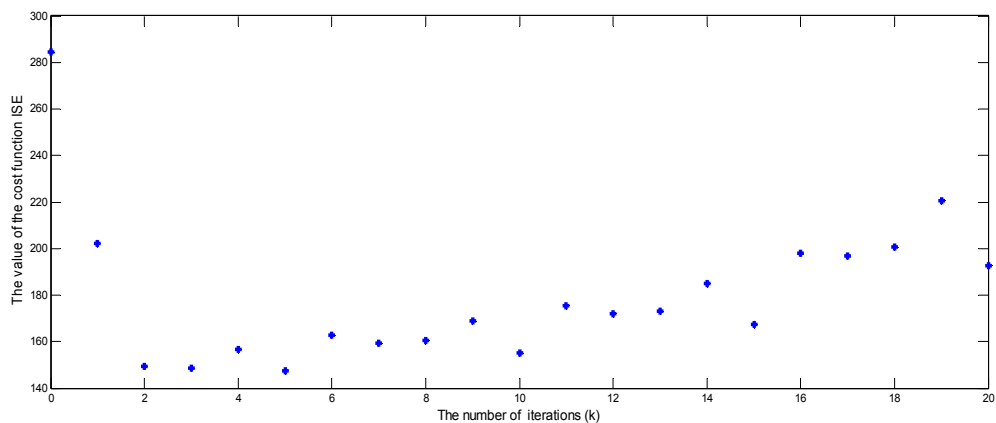
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 20 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 20 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την έκτη επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(\kappa-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0096          | 653.2034   | 6.1597     | 6.4059     | 0.11       | 0.0105     | 0.0092     |

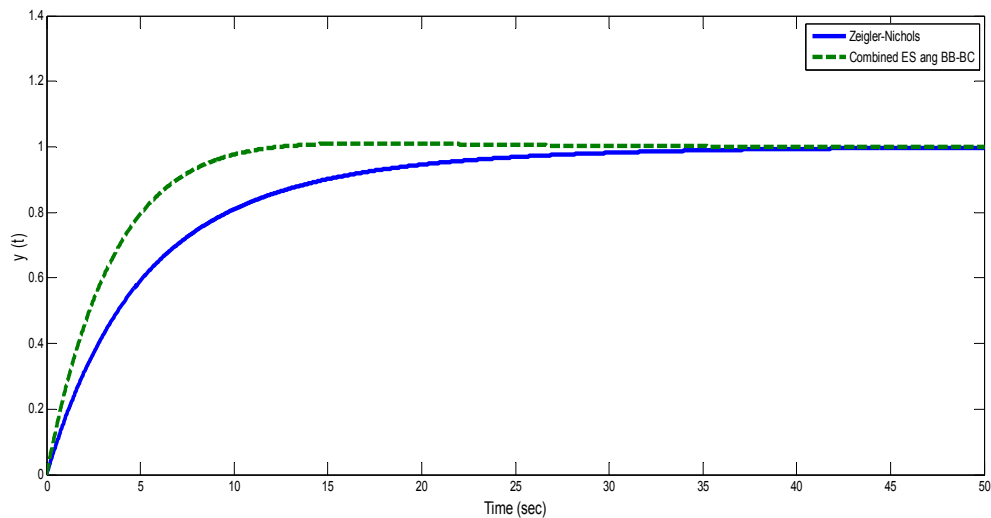
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την έκτη επανάληψη ( $k=5$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για έξι επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K      | $T_i$  | $T_d$  |
|---|--------|--------|--------|
| Zeigler-Nichols                                     | 0.59   | 7.26   | 1.81   |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 1.2523 | 7.2593 | 1.7922 |



Η μέθοδος Zeigler-Nichols και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 50 sec) |
|---|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Zeigler Nichols                                     | 14.877 sec      | 0%        | 20.731               | -0.0025                    |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 6.9714 sec      | 1.07%     | 8.59 sec             | 0                          |

## 4.2) Σύστημα δευτέρου βαθμού με μιγαδικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{13}{s^2 + 4s + 13}$$

η οποία είναι δευτέρου βαθμού με δύο μιγαδικούς πόλους στο  $-2 \pm 3i$ . Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01. Σαν αρχικές τιμές για τον PID ελεγκτή χρησιμοποιούμε τις τιμές που μας δίνει η μέθοδος Zeigler-Nichols, τιμές με τις οποίες θα συγκρίνουμε και τα αποτελέσματά μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του PID ελεγκτή.

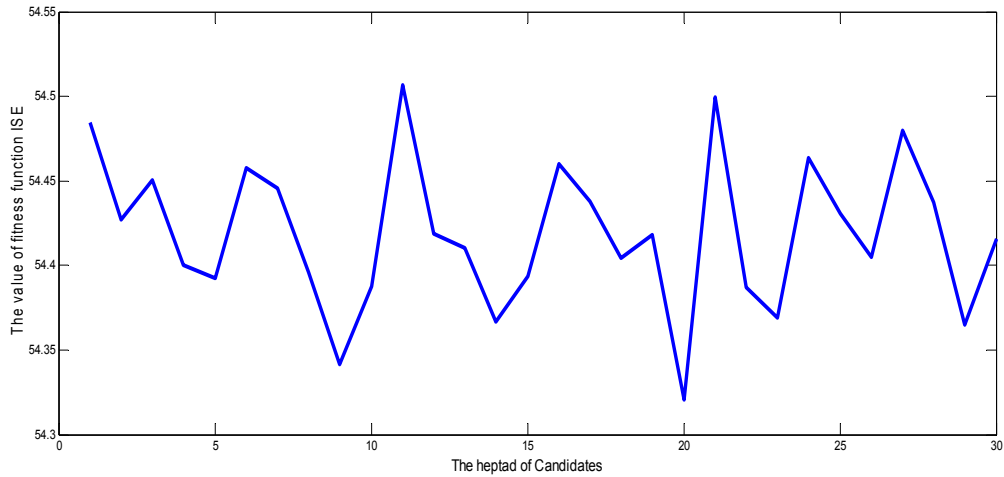
Οι συντελεστές  $a$  και  $h$  του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES ( $J_{ES}$ ) θα κυμανθεί από  $t_0=0\text{sec}$  έως  $T=30\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 900        | 0          | 900        | 0.005      | 0.005      | 0.005      |
| Max             | 0.015      | 1000       | 1          | 1000       | 0.015      | 0.015      | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.01       | 0.01       | 0.01       |

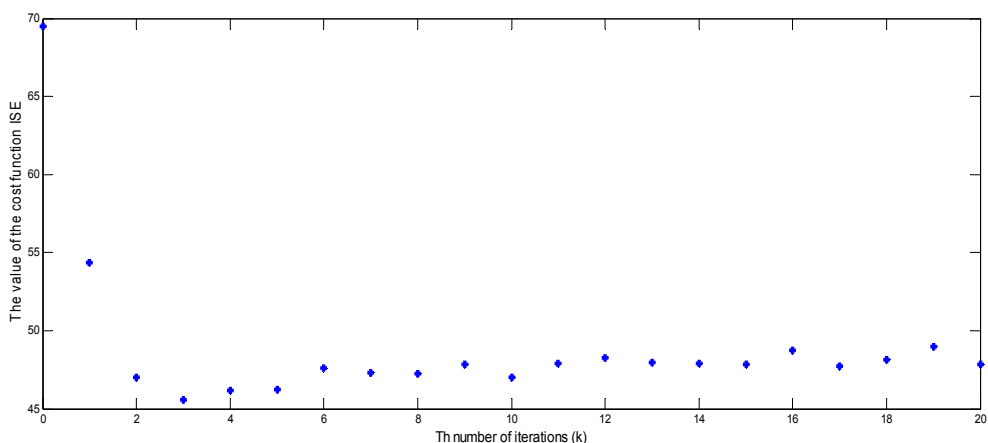
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function  $J$  επιτυγχάνεται με την εικοστή επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0111     | 959.0647   | 0.4713     | 974.9551   | 0.0099     | 0.0104     | 0.0093     |

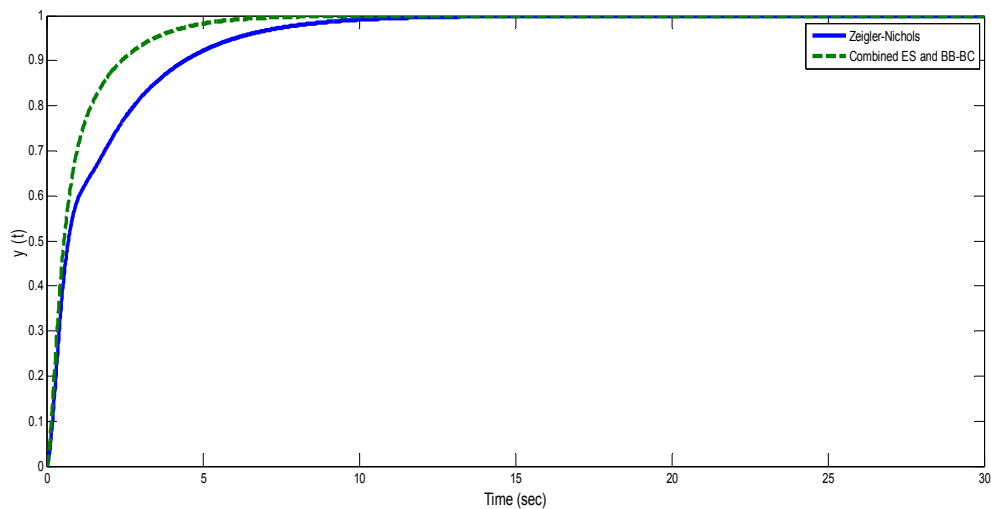
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τέταρτη επανάληψη ( $k=3$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τέσσερις επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K      | $T_i$  | $T_d$  |
|---|--------|--------|--------|
| Zeigler-Nichols                                     | 0.59   | 0.99   | 0.25   |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 0.9999 | 0.9881 | 0.4410 |



Η μέθοδος Zeigler-Nichols και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 30 sec) |
|---|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Zeigler Nichols                                     | 4.429 sec       | 0 %       | 6.056 sec            | 0                          |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 2.41 sec        | 0 %       | 3.46 sec             | 0                          |

### 4.3) Σύστημα δευτέρου βαθμού με πραγματικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{5s + 1}{4s^2 + 5s + 1}$$

η οποία είναι δευτέρου βαθμού με δύο πραγματικούς πόλους στο -0,2 και το -1 και μια πραγματική ρίζα (μηδενικό) στο -0.2. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01. Σαν αρχικές τιμές για τον PID ελεγκτή χρησιμοποιούμε τις τιμές που μας δίνει η μέθοδος Zeigler-Nichols, τιμές με τις οποίες θα συγκρίνουμε και τα αποτελέσματά μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του PID ελεγκτή.

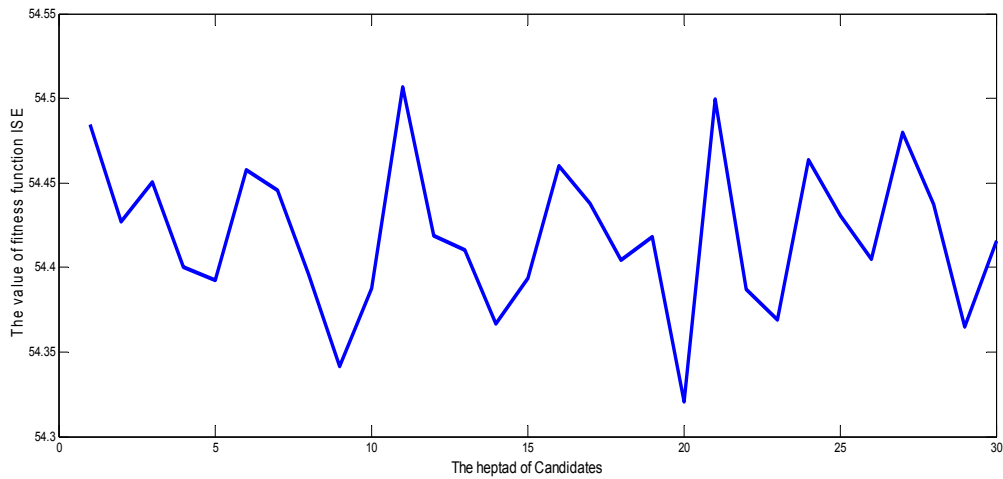
Οι συντελεστές  $a$  και  $h$  του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES ( $J_{ES}$ ) θα κυμανθεί από  $t_0=0\text{sec}$  έως  $T=50\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = a^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 90         | 0          | 90         | 0.005      | 0.005      | 0.005      |
| Max             | 0.015      | 110        | 1          | 110        | 0.015      | 0.015      | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.1        | 0.01       | 0.1        | 0.01       | 0.01       | 0.01       |

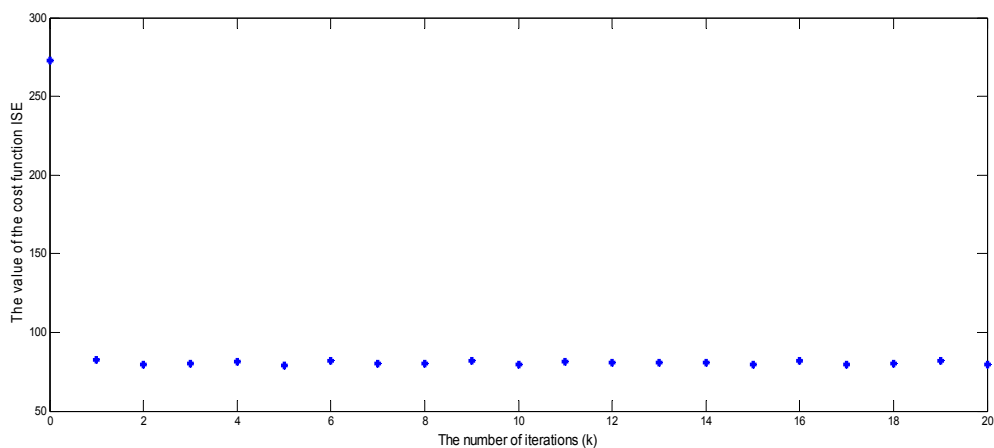
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function  $J$  επιτυγχάνεται με την εικοστή επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(\kappa-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0112          | 100.1676   | 0.4595     | 103.3378   | 0.0098     | 0.0104     | 0.0094     |

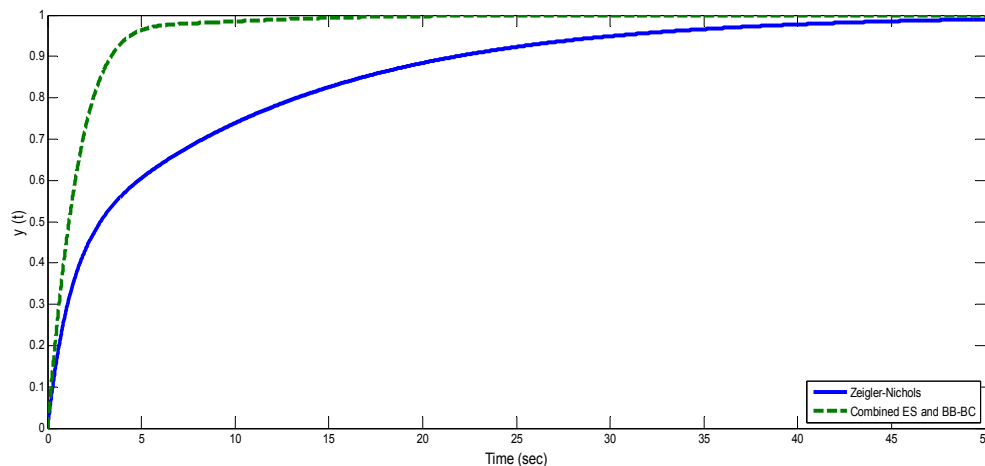
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την έκτη επανάληψη ( $k=5$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για έξι επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K      | $T_i$ | $T_d$  |
|---|--------|-------|--------|
| Zeigler-Nichols                                     | 0.59   | 4.44  | 1.11   |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 0.5957 | 1.009 | 0.4919 |



Η μέθοδος Zeigler-Nichols και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 50 sec) |
|---|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Zeigler Nichols                                     | 21.8058 sec     | 0 %       | 30.254 sec           | -0.0099                    |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 3.3862 sec      | 0 %       | 4.415 sec            | 0                          |



#### 4.4) Σύστημα δευτέρου βαθμού με μιγαδικούς πόλους και χρονική καθυστέρηση ελεγχόμενο από PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{1}{0.09s^2 + 0.6s + 1} e^{-0.4s}$$

η οποία είναι δευτέρου βαθμού με δύο μιγαδικούς πόλους στο  $-3.33 \pm (3.88 * 10^{-8})i$ . Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01 ενώ οι χρονικές καθυστερήσεις προσεγγίζονται από μια τρίτου βαθμού Pade προσέγγιση. Σαν αρχικές τιμές για τον PID ελεγκτή χρησιμοποιούμε τις τιμές που μας δίνει η μέθοδος Zeigler-Nichols, τιμές με τις οποίες θα συγκρίνουμε και τα αποτελέσματά μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του PID ελεγκτή.

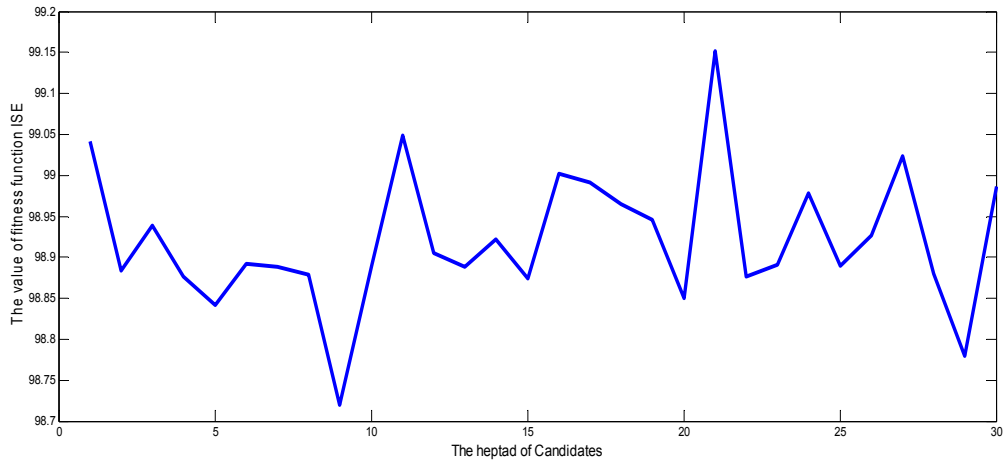
Οι συντελεστές  $a$  και  $h$  του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES ( $J_{ES}$ ) θα κυμανθεί από  $t_0=0\text{sec}$  έως  $T=20\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 300        | 300        | 9          | 0.005      | 0.005      | 0.005      |
| Max             | 0.015      | 400        | 400        | 11         | 0.015      | 0.015      | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.1        | 0.1        | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       |

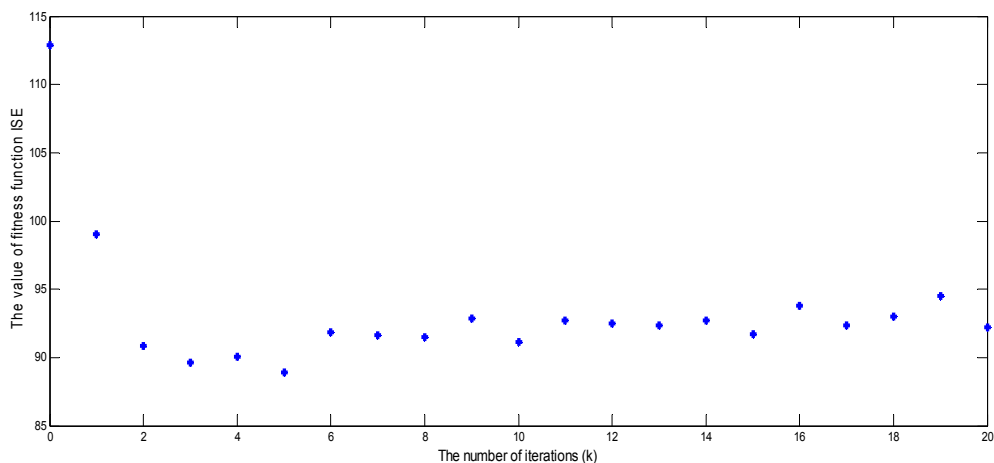
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την ένατη επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(\kappa-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0112          | 347.0873   | 351.3924   | 10.1393    | 0.0098     | 0.0103     | 0.0094     |

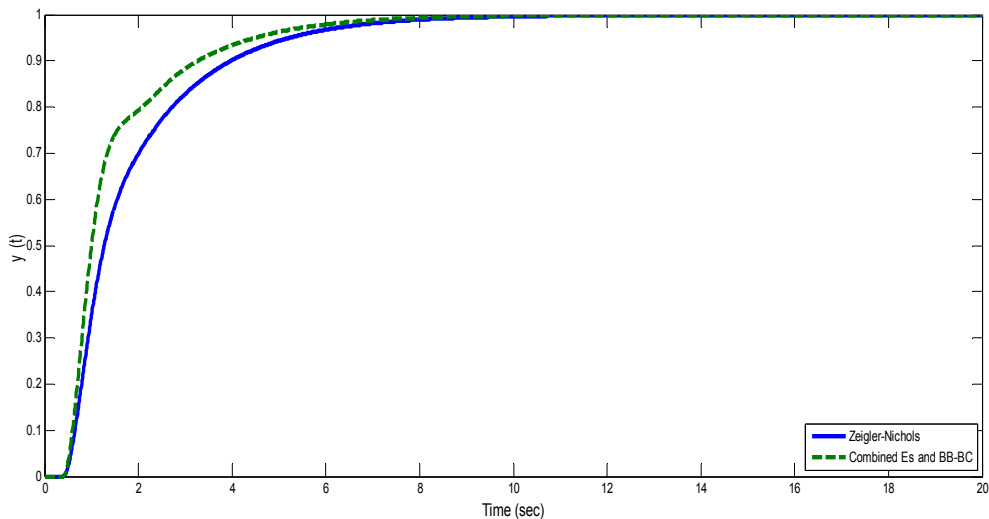
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την έκτη επανάληψη ( $k=5$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για έξι επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K     | $T_i$ | $T_d$ |
|---|-------|-------|-------|
| Zeigler-Nichols                                     | 0.45  | 0.85  | 0.21  |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 0.679 | 1.036 | 0.205 |



Η μέθοδος Zeigler-Nichols και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 20 sec) |
|---|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Zeigler Nichols                                     | 3.975 sec       | 0 %       | 5.226 sec            | 0                          |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 3.273 sec       | 0 %       | 4.49 sec             | 0                          |

#### 4.5) Σύστημα τρίτου βαθμού με μιγαδικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{s + 5}{s^3 + 6s^2 + 18s}$$

η οποία είναι τρίτου βαθμού με ένα πραγματικό πόλο στο 0, 2 μιγαδικούς πόλους στο  $-3 \pm 3i$  και μια πραγματική ρίζα (μηδενικό) στο -5. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01. Σαν αρχικές τιμές για τον PID ελεγκτή χρησιμοποιούμε τις τιμές που μας δίνει η μέθοδος Zeigler-Nichols, τιμές με τις οποίες θα συγκρίνουμε και τα αποτελέσματά μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του PID ελεγκτή.

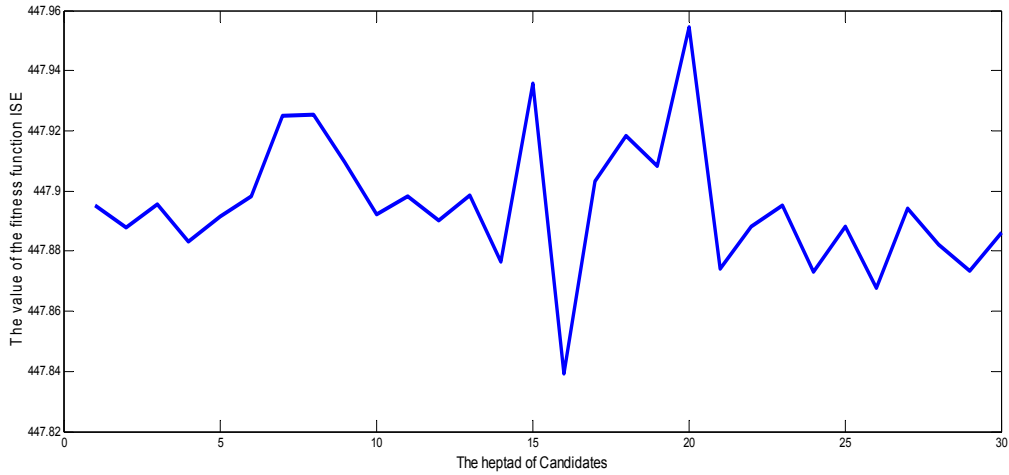
Οι συντελεστές  $a$  και  $h$  του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES ( $J_{ES}$ ) θα κυμανθεί από  $t_0=10\text{sec}$  έως  $T=150\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 4          | 4500       | 4          | 0.005      | 0.005      | 0.005      |
| Max             | 0.015      | 6          | 5500       | 6          | 0.015      | 0.015      | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.01       | 0.1        | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       |

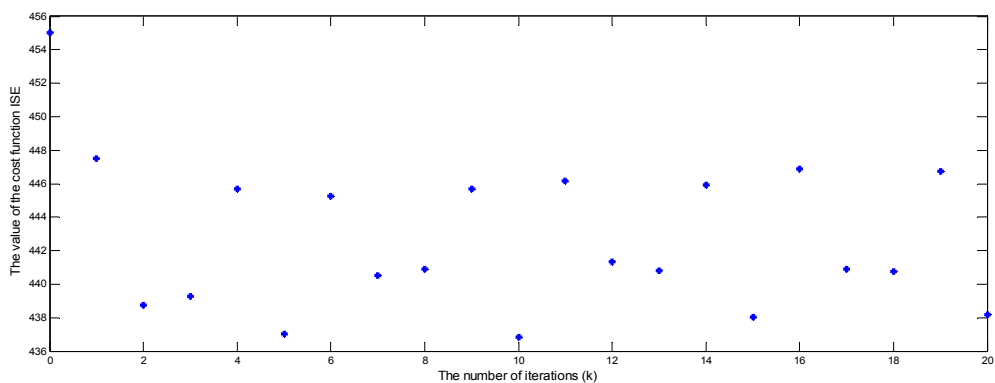
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function  $J$  επιτυγχάνεται με την δέκατη έκτη επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0112     | 4.8658     | 5065.6     | 5.1303     | 0.0097     | 0.1038     | 0.0095     |

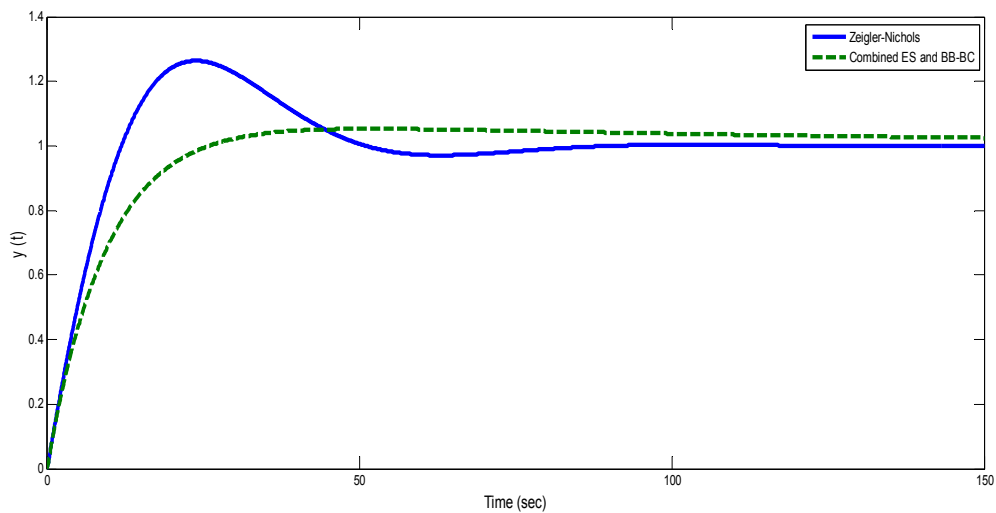
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την ενδέκατη επανάληψη ( $k=10$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για έντεκα επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K      | $T_i$  | $T_d$  |
|---|--------|--------|--------|
| Zeigler-Nichols                                     | 0.59   | 11.3   | 2.83   |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 0.5953 | 126.66 | 2.8428 |



Η μέθοδος Zeigler-Nichols και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 150 sec) |
|---|-----------------|-----------|----------------------|-----------------------------|
| Zeigler Nichols                                     | 10.1748 sec     | 26.34 %   | 44.65 sec            | -0.0003                     |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 17.3915 sec     | 5.27 %    | 65.4096 sec          | 0.0248                      |

#### 4.6) Σύστημα τετάρτου βαθμού με μιγαδικούς πόλους ελεγχόμενο από PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{1}{s^4 + 5s^3 + 8s^2 + 6s}$$

η οποία είναι τετάρτου βαθμού με δύο πραγματικούς πόλους στο 0 και στο -3 και δύο μιγαδικούς πόλους στο  $-1 \pm 1i$ . Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.01. Σαν αρχικές τιμές για τον PID ελεγκτή χρησιμοποιούμε τις τιμές που μας δίνει η μέθοδος Zeigler-Nichols, τιμές με τις οποίες θα συγκρίνουμε και τα αποτελέσματά μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του PID ελεγκτή.

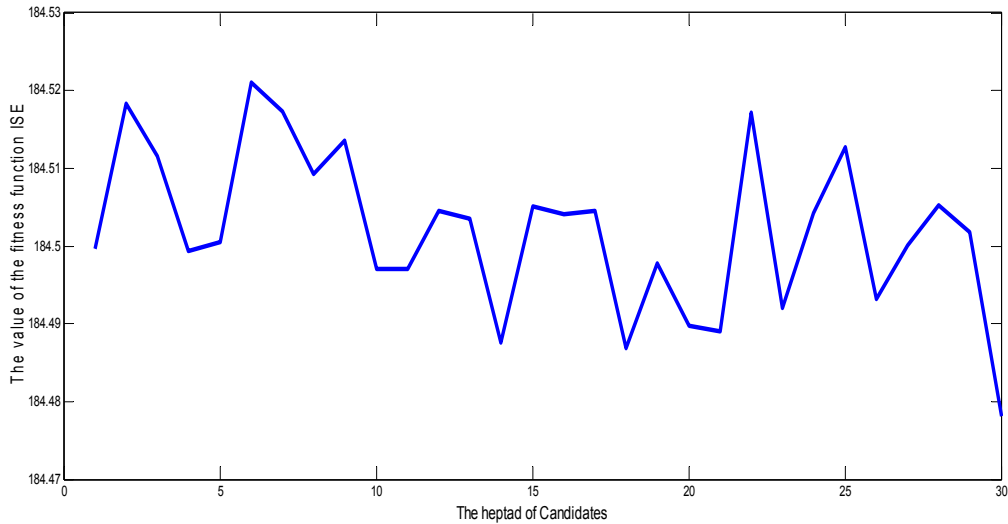
Οι συντελεστές  $a$  και  $h$  του αλγορίθμου ES ορίζονται 0.8 και 0.5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES ( $J_{ES}$ ) θα κυμανθεί από  $t_0=3\text{sec}$  έως  $T=35\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha^i \pi$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 9          | 9          | 9          | 0.005      | 0.5        | 0.04       |
| Max             | 0.015      | 11         | 11         | 11         | 0.015      | 0.6        | 0.05       |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες:

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       |

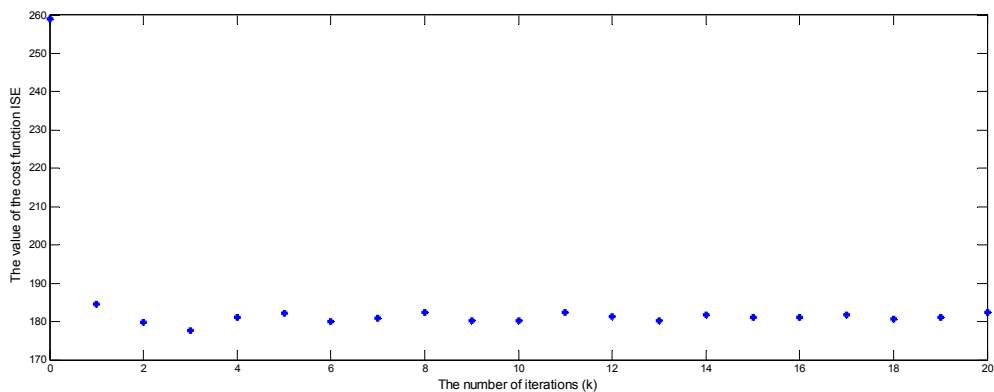
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την τριακοστή επτάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(\kappa-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0112          | 9.8687     | 9.9303     | 10.1321    | 0.0097     | 0.5538     | 0.0443     |

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 20 επαναλήψεις.

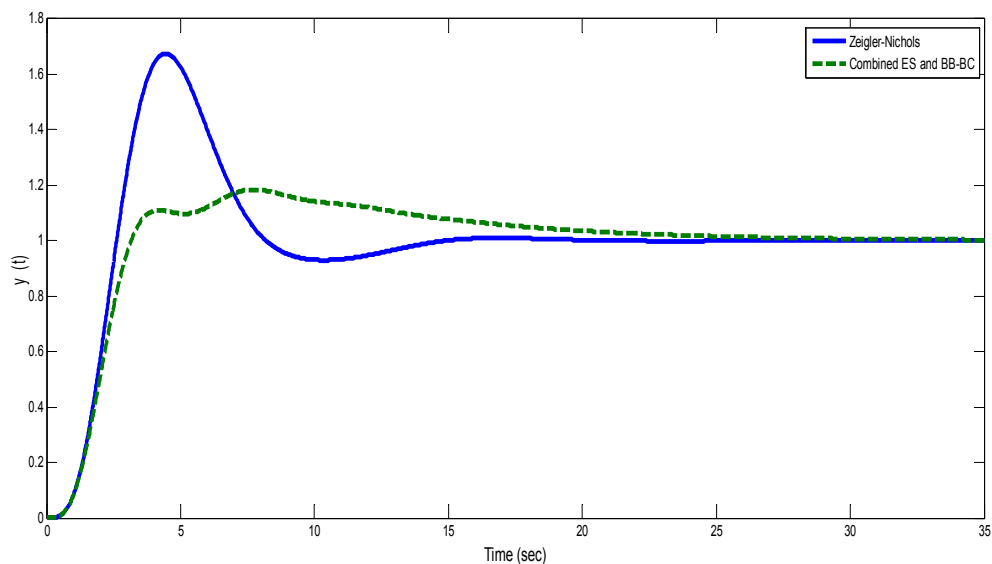




Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τέταρτη επανάληψη ( $k=3$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τέσσερις επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method                                       | K      | $T_i$  | $T_d$ |
|---|--------|--------|-------|
| Zeigler-Nichols                                     | 4.78   | 2.88   | 0.72  |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 4.9808 | 9.1846 | 1.13  |



Η μέθοδος Zeigler-Nichols και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method                                       | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 35 sec) |
|---|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Zeigler Nichols                                     | 2.467 sec       | 67.47 %   | 12.1472 sec          | 0                          |
| ES with initial parameters by Combined ES and BB-BC | 2.833 sec       | 18.4 %    | 17.8865 sec          | 0.003                      |

#### 4.7) Σύστημα πρώτου βαθμού με πραγματικό πόλο ελεγχόμενο από Fuzzy PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον Fuzzy PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{16}{10s + 1} e^{-0.25s}$$

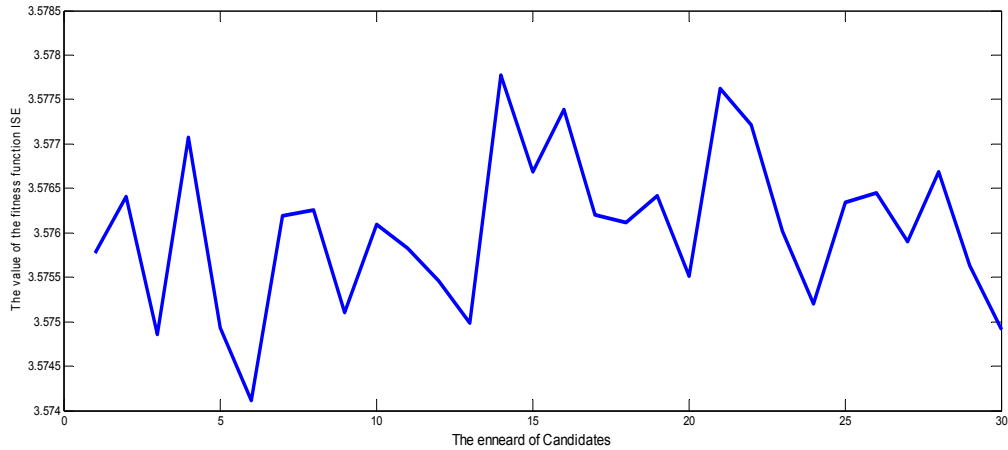
η οποία είναι πρώτου βαθμού με έναν πραγματικό πόλο στο -1. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.25 ενώ οι χρονικές καθυστερήσεις προσεγγίζονται από μια τρίτου βαθμού Pade προσέγγιση. Επιπλέον οι συντελεστές a και h ορίζονται 0,8 και 0,5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES (J\_ES) θα κυμανθεί από  $t_0=2\text{sec}$  έως  $T=15\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = a\pi$ . Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του Fuzzy PID ελεγκτή. Τα αποτελέσματά μας θα τα συγκρίνουμε με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 0          | 600        | 0          | 600        | 0.04       | 0.005      | 0.04       | 0.005      |
| Max             | 0.015      | 1          | 700        | 1          | 700        | 0.05       | 0.015      | 0.05       | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.01       | 0.1        | 0.1        | 0.01       |

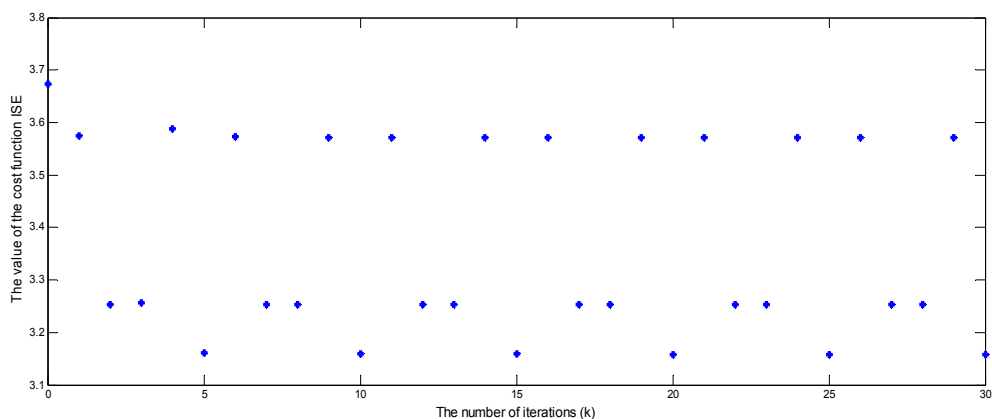
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function  $J$  επιτυγχάνεται με την έκτη εννιάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0112     | 0.4893     | 651.0823   | 0.4146     | 640.5475   | 0.0432     | 0.0106     | 0.0439     | 0.0092     |

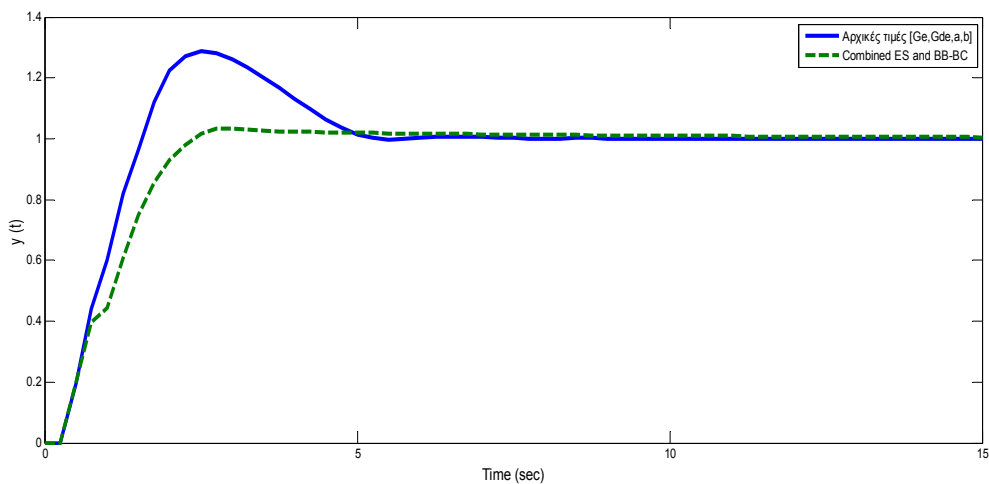
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την τριακοστή πρώτη επανάληψη ( $k=30$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τριάντα επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method  | $G_e$  | $G_{\Delta e}$ | a      | b      |
|--|--------|----------------|--------|--------|
| Αρχ. Τιμές<br>[ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ]                  | 0.8    | 0.1            | 0.8    | 0.1    |
| ES with initial<br>parameters by<br>Combined ES and<br>BB-BC | 0.7648 | 0.0131         | 0.7643 | 0.0257 |



Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων [ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ] και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method  | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 15 sec) |
|--|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Αρχ. Τιμές<br>[ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ]                  | 1.3893 sec      | 28.76 %   | 4.6249 sec           | 0                          |
| ES with initial<br>parameters by<br>Combined ES and<br>BB-BC | 1.9 sec         | 3.32 %    | 2.101 sec            | 0.0047                     |

#### 4.8) Σύστημα δευτέρου βαθμού με πραγματικούς πόλους και χρονική καθυστέρηση ελεγχόμενο από Fuzzy PID ελεγκτή

Η συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα ελεγχθεί με τον Fuzzy PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = \frac{16}{s^2 + 3s + 2} e^{-0.25s}$$

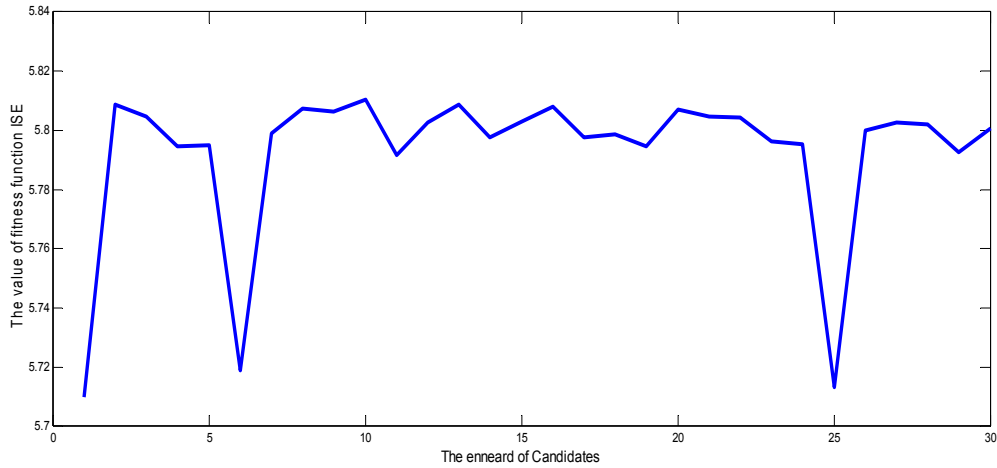
η οποία είναι δευτέρου βαθμού με δύο πραγματικούς πόλους στο -1 και το -2. Το κλειστό σύστημα ελέγχου θα προσομοιωθεί με step time 0.25 ενώ οι χρονικές καθυστερήσεις προσεγγίζονται από μια τρίτου βαθμού Pade προσέγγιση. Επιπλέον οι συντελεστές  $a$  και  $b$  ορίζονται 0,8 και 0,5 αντίστοιχα. Για αυτήν την προσομοίωση η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου ES (J\_ES) θα κυμανθεί από  $t_0=0\text{sec}$  έως  $T=50\text{sec}$  και η οποία είναι η συνάρτηση ISE (Integrated Squared Error). Η συνάρτηση καταλληλότητας που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος BB-BC είναι επίσης η ISE. Η γωνιακή συχνότητα είναι της μορφής  $\omega_i = \alpha\pi$ . Θα χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό των αλγορίθμων Extremum Seeking και Big Bang-Big Crunch για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES και έπειτα τον αλγόριθμο ES για να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές του Fuzzy PID ελεγκτή. Τα αποτελέσματά μας θα τα συγκρίνουμε με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων  $[G_e, G_{\Delta e}, a, b]$ . Τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES είναι:

| Τιμή/Παράμετρος | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Min             | 0.005      | 0          | 500        | 0          | 500        | 0.005      | 0.005      | 0.005      | 0.005      |
| Max             | 0.015      | 1          | 600        | 1          | 600        | 0.015      | 0.015      | 0.015      | 0.015      |

Επιπλέον η μέση τιμή  $\mu$  (mean) και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  (standard deviation) που χρησιμοποιεί η γεννήτρια normal τυχαίων αριθμών, για τις εσωτερικές παραμέτρους του αλγορίθμου ES είναι οι ακόλουθες

| Τιμή/Παράμετρος               | $\xi(k-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\mu$ (mean)                  | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| $\sigma$ (standard deviation) | 0.01       | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       |

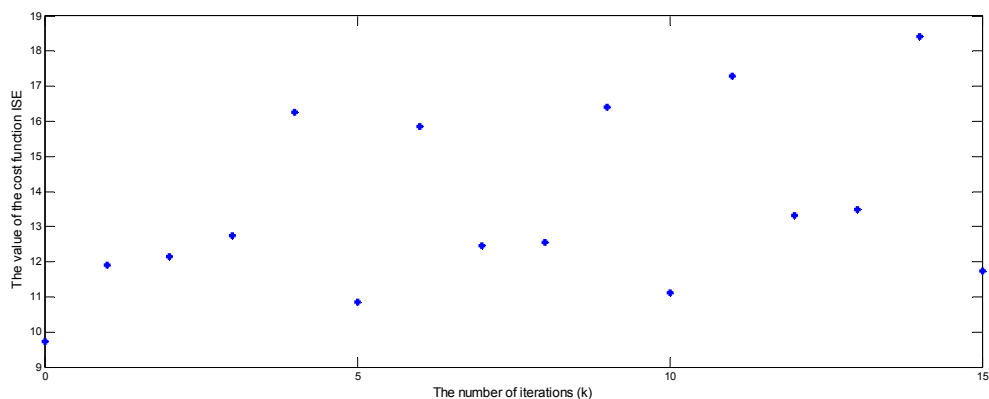
Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα δημιουργήσουμε 30 τυχαίες τιμές για κάθε παράμετρο, πάντα σεβόμενοι τα όρια που ορίσαμε προηγουμένως. Τον συνδυασμό των αλγορίθμων θα τον τρέξουμε για 30 επαναλήψεις.



Η ελάχιστη τιμή του fitness function J επιτυγχάνεται με την πρώτη εννιάδα τιμών των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES. Οι τιμές των παραμέτρων που παίρνουμε είναι οι επόμενες:

| Tuning Method         | $\xi(\kappa-1)$ | $\gamma_1$ | $\gamma_2$ | $\gamma_3$ | $\gamma_4$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Combined ES and BB-BC | 0.0117          | 0.4659     | 550.4818   | 0.4294     | 542.095    | 0.0096     | 0.0104     | 0.0096     | 0.0095     |

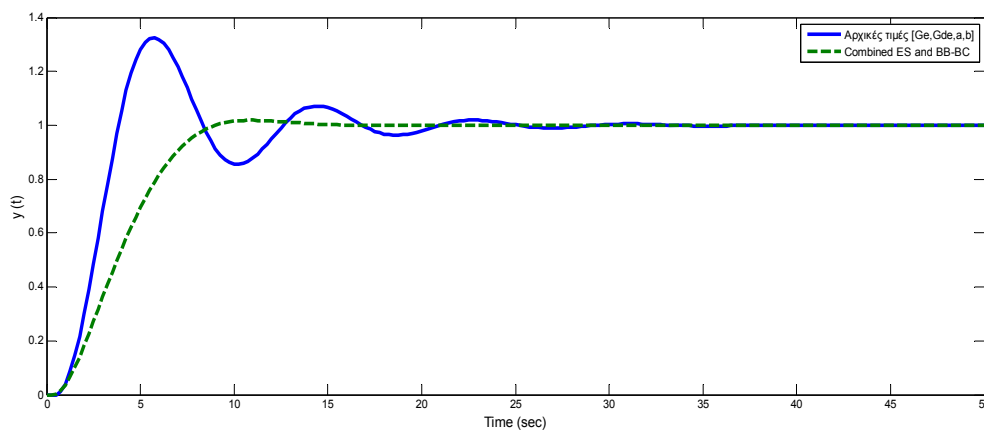
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για εσωτερικές παραμέτρους τις τιμές που πήραμε από τον συνδυασμό των αλγορίθμων, τρέχουμε τον αλγόριθμο ES για 15 επαναλήψεις



Η ελάχιστη τιμή του cost function  $J(\theta)$  επιτυγχάνεται κατά την πρώτη επανάληψη ( $k=0$ ).

Τρέχοντας τον αλγόριθμο ES για τριάντα επαναλήψεις μας δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους του PID του κλειστού συστήματος της  $G(s)$ .

| Tuning Method  | $G_e$  | $G_{\Delta e}$ | a      | b      |
|--|--------|----------------|--------|--------|
| Αρχ. Τιμές<br>[ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ]                  | 0.1    | 0.1            | 0.1    | 0.1    |
| ES with initial<br>parameters by<br>Combined ES and<br>BB-BC | 0.0922 | 0.0441         | 0.0922 | 0.0496 |



Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων [ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ] και ο αλγόριθμος ES με εσωτερικές παραμέτρους από τον συνδυασμό των αλγορίθμων ES και BB-BC μας δίνουν αποκρίσεις με τα εξής χαρακτηριστικά:

| Tuning Method  | Χρόνος Ανύψωσης | Υπερύψωση | Χρόνος Αποκατάστασης | Μόνιμο Σφάλμα (στα 50 sec) |
|--|-----------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| Αρχ. Τιμές<br>[ $G_e, G_{\Delta e}, a, b$ ]                  | 3.5645 sec      | 32.53 %   | 15.563 sec           | 0                          |
| ES with initial<br>parameters by<br>Combined ES and<br>BB-BC | 6.9145 sec      | 1.85 %    | 7.6758 sec           | 0                          |

## Προτάσεις περαιτέρω έρευνας

- Συνδυασμός του αλγορίθμου Extremum Seeking με άλλον εξελικτικό αλγόριθμο (εκτός του Big Bang-Big Crunch) για πιθανή περαιτέρω βελτιστοποίηση. Ενδεικτικά αναφέρονται: Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization), Iterative Feedback Tuning (IFT).
- Χρησιμοποίηση κι άλλων συναρτήσεων ως συνάρτηση κόστους (cost function) και συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function). Ενδεικτικά αναφέρονται: IAE (Integrated Absolute Error), IE (Integrated Error), ITAE (Integrated Time multiplied Absolute Error) και ITSE (Integrated Time multiplied Squared Error).



## Παράρτημα Α

Ο κώδικας ο οποίος υλοποιεί τον αλγόριθμο Extremum Seeking είναι γραμμένος σε script στο Matlab και είναι ο ακόλουθος:

```
function G(s)_extremum_seeking()

figure

global k1

for k=0:k1

global c
global e
global f
global g
global a1
global a2
global a3
global g1
global g2
global g3

[~,~,yout]=sim('G(s)',Simulation Stop Time); % Τρέχει
                                                % το simulink

out=yout;

[m,n]=size(out);

for i=1:m

A(i,1)=(1-out(i,1))^2; % Υπολογισμός του (1-e)^2 for
```

```

% every fixed-step size

end

B=sum(A); % Πρόσθεση όλων των  $(1-e)^2$ 

syms x % Δημιουργία ενός Συμβολικού
% αντικειμένου, που βοηθάει
% στην ολοκλήρωση

C=int(B,x,t0,T); % Ορισμένο ολοκλήρωμα του
% αθροίσματος όλων των  $(1-e)^2$ 

D=double(C); % Μετατροπή που Συμβολικού
% αντικειμένου σε διάνυσμα

J=D/(T-t0); % Ο συντελεστής του ISE

plot(k,J,'+')

hold on

J1=J/10000; % J1 είναι το ISE δια το
% ρυθμό μάθησης (ορίζεται μέσα
% στο script)

E=(-h)*c)+J1; % Υπολογίζει το  $\xi(k)$ 

P=J1-((1+h)*E); % Υπολογίζει το P το οποίο υπάρχει στις από
% κάτω εξισώσεις

TH1E=e-(g1*a1*P*cos(omega1*pi*k)); % Υπολογίζει το
% Εκτιμώμενο  $\Theta_1(k+1)$ 

TH1=TH1E+(a1*cos(omega1*pi*(k+1))); % Υπολογίζει το  $\Theta_1(k+1)$ 

TH2E=f-(g2*a2*P*cos(omega2*pi*k)); % Υπολογίζει το
% Εκτιμώμενο  $\Theta_2(k+1)$ 

```

```

TH2=TH2E+(a2*cos(ω2*pi*(k+1))); % Υπολογίζει το θ2(k+1)
TH3E=g-(g3*a3*P*cos(ω3*pi*k)); % Υπολογίζει το
                                % Εκτιμώμενο θ3(k+1)
TH3=TH3E+(a3*cos(ω3*pi*(k+1))); % Υπολογίζω το θ3(k+1)

K=TH1;
Ti=TH1/TH2;
Td=TH1*TH3;

assignin('base','c',E)
assignin('base','e',TH1E)
assignin('base','f',TH2E)
assignin('base','g',TH3E)
assignin('base','K',K)
assignin('base','Ti',Ti)
assignin('base','Td',Td)

end

hold off

end

```

Όπου το  $k_1$  δηλώνει τον αριθμό των επαναλήψεων, το  $J$  είναι το cost function ISE, το  $J_1$  είναι το cost function ISE διαιρεμένο με τον ρυθμό μάθησης. Αυτό γίνεται διότι η τιμή του cost function ISE είναι μεγάλη και «χαλαεί» τον αλγόριθμο. Το  $\Xi$  είναι το  $\xi(k)$  ενώ το  $c$  είναι το  $\xi(k-1)$ , το  $P=[J(k)-(1+h)\xi(k)]$ , τα  $e, f, g$  είναι οι προηγούμενες εκτιμώμενες τιμές των τιμών του  $Z-N$ , ενώ τα  $TH1E, TH2E, TH3E$  είναι τα  $\hat{\theta}_i(k+1)$ . Τέλος τα  $TH1, TH2, TH3$  είναι τα  $\theta_i(k+1)$ .

## Παράρτημα Β

Ο κώδικας ο οποίος υλοποιεί τον αλγόριθμο Big Bang-Big Crunch είναι γραμμένος σε script στο Matlab και είναι ο ακόλουθος:

```
function G(s)_BB_BC()

global kfin
global NoC
global Kmin
global Kmax
global Tmin
global Tmax
global Tdmin
global Tdmax
global mK
global mTi
global mTd
global sK
global sTi
global sTd

% Step1: Form an initial generation of N candidates in a
random manner. Respect the limits of the search space.
K=random('Uniform',Kmin,Kmax,[NoC,1]); % NoC=Number of
Ti=random('Uniform',Tmin,Tmax,[NoC,1]); % Candidates
Td=random('Uniform',Tdmin,Tdmax,[NoC,1]);
```

```

for k=1:kfin % kfin= the number of iterations

% Step 2 Calculate the fitness function values of all the
candidate solutions.

for i=1:NoC

    assignin('base','K',K(i,1))
    assignin('base','Ti',Ti(i,1))
    assignin('base','Td',Td(i,1))

    [~,~,yout]=sim('G(s)',Simulation Stop Time);

    out=yout;

    [m,n]=size(out);

    for j=1:m

        A(j,1)=(1-out(j,1))^2;

    end

    B=sum(A);

    syms x

    C=int(B,x,t0,T);

    D=double(C);

    J(i,1)=D/(T-t0);

end

% Step 3 Find the center of mass according to Equation of Xc.
Best fit individual can be chosen as the center of mass
instead of using Equation of Xc.

NumeratorOfXcK=sum(K./J);

NumeratorOfXcTi=sum(Ti./J);

NumeratorOfXcTd=sum(Td./J);

```

```

DenominatorOfXc=sum(1./J);
XcK=NumeratorOfXcK/DenominatorOfXc;
XcTi=NumeratorOfXcTi/DenominatorOfXc;
XcTd=NumeratorOfXcTd/DenominatorOfXc;

% Step 4 Calculate new candidates around the center of mass by
adding or subtracting a normal random number whose value
decreases as the iterations elapse. This can be formalized as
Xnew=Xc+((l*r)/k) where Xc stands for center of mass, l is the
upper limit of the parameter, r is a normal random number and
k is the iteration step. Then new point Xnew is upper and
lower bounded.

lK=Kmax;
lTi=Timax;
lTd=Tdmax;
rK=random('Normal',mK,sK,[NoC,1]); % m=μ:mean , s=σ:standard
deviation
rTi=random('Normal',mTi,sTi,[NoC,1]);
rTd=random('Normal',mTd,sTd,[NoC,1]);
for i1=1:NoC
    XnewK(i1,1)=XcK+((lK*rK(i1))/k);
    K=XnewK;
    XnewTi(i1,1)=XcTi+((lTi*rTi(i1))/k);
    Ti=XnewTi;
    XnewTd(i1,1)=XcTd+((lTd*rTd(i1))/k);
    Td=XnewTd;
end
end

```

```
assignin('base','K',K)
assignin('base','Ti',Ti)
assignin('base','Td',Td)
assignin('base','J',J)
figure
plot(J)
end
```

Όπου το  $k_{fin}$  δηλώνει τον αριθμό των επαναλήψεων, το NoC είναι ο πληθυσμός των πιθανών λύσεων για κάθε μια από τις τρεις παραμέτρους (όλοι οι παράμετροι έχουν πάντα τον ίδιο πληθυσμό), τα  $K_{min}$ ,  $K_{max}$ ,  $T_{i_{min}}$ ,  $T_{i_{max}}$ ,  $T_{d_{min}}$ ,  $T_{d_{max}}$  είναι τα όρια των παραμέτρων του PID ελεγκτή, τα  $m_K$ ,  $s_K$ ,  $m_{T_i}$ ,  $s_{T_i}$ ,  $m_{T_d}$ ,  $s_{T_d}$  είναι οι παράμετροι της γεννήτριας normal τυχαίων αριθμών για κάθε παράμετρο του ελεγκτή και  $J$  είναι το fitness function ISE.

## Παράρτημα Γ

Ο κώδικας ο οποίος υλοποιεί τον συνδυασμό των αλγορίθμων Big Bang-Big Crunch και Extremum Seeking είναι γραμμένος σε script στο Matlab και είναι ο ακόλουθος:

```
function Combined_Algorithms_BBBC_ES()  
  
global kfin  
global NoC  
global cmin  
global cmax  
global a1min  
global a1max  
global a2min  
global a2max  
global a3min  
global a3max  
global g1min  
global g1max  
global g2min  
global g2max  
global g3min  
global g3max  
global mc  
global sc  
global ma1  
global sa1  
global ma2  
global sa2
```



```
global ma3
global sa3
global mg1
global sg1
global mg2
global sg2
global mg3
global sg3
```

```
% Step1: Form an initial generation of N candidates in a
random manner. Respect the limits of the search space.
```

```
c=random('Uniform',cmin,cmax,[NoC,1]);      % NoC=Number of
a1=random('Uniform',a1min,a1max,[NoC,1]);    % Candidates
a2=random('Uniform',a2min,a2max,[NoC,1]);
a3=random('Uniform',a3min,a3max,[NoC,1]);
g1=random('Uniform',g1min,g1max,[NoC,1]);
g2=random('Uniform',g2min,g2max,[NoC,1]);
g3=random('Uniform',g3min,g3max,[NoC,1]);
```

```
% Step 2.1: Calculate the Cost function of the Extremum
Seeking (J_ES) with the gains of the PID Controller tuned with
the Zeigler-Nichols method.
```

```
[~,~,yout]=sim('G(s)',Simulation Stop Time);
out=yout;
[m,n]=size(out);
```

```

for i=1:m
A(i,1)=(1-out(i,1))^2;
end

B=sum(A);

syms x

C=int(B,x,t0,T);
D=double(C);
J_ES=D/(T-t0);
J_ES=J_ES/10000;

for j=1:kfin      % kfin= the number of iterations

% Step 2.2: Calculate the new gains of the PID Controller
(K,Ti,Td) with the Extremum Seeking Algorithm and also
calculate the Fitness function of the new PID gains (J).

for k=1:NoC

E=((-h)*c(k,1))+J_ES;
P=J_ES-((1+h)*E);
TH1E=TH1E(0)-(g1(k,1)*a1(k,1)*P*cos(omega1*pi*0));
TH1=TH1E+(a1(k,1)*cos(omega1*pi*(0+1)));
TH2E=TH2E(0)-(g2(k,1)*a2(k,1)*P*cos(omega2*pi*0));
TH2=TH2E+(a2(k,1)*cos(omega2*pi*(0+1)));
TH3E=TH3E(0)-(g3(k,1)*a3(k,1)*P*cos(omega3*pi*0));
TH3=TH3E+(a3(k,1)*cos(omega3*pi*(0+1)));

```

```

K=TH1;

Ti=TH1/TH2;

Td=TH1*TH3;

assignin('base','K',K)
assignin('base','Ti',Ti)
assignin('base','Td',Td)

[~,~,yout]=sim('G(s)',Simulation Stop Time);

out=yout;

[m,n]=size(out);

for i=1:m
A(i,1)=(1-out(i,1))^2;

end

B=sum(A);

syms x

C=int(B,x,t0,T);

D=double(C);

J(k,1)=D/(T-t0);

end

% Step 3: Find the center of mass according to Equation of Xc.
Best fit individual can be chosen as the center of mass
instead of using Equation of Xc.

```

```

NumeratorOfXcc=sum(c./J);
NumeratorOfXca1=sum(a1./J);
NumeratorOfXca2=sum(a2./J);
NumeratorOfXca3=sum(a3./J);
NumeratorOfXcg1=sum(g1./J);
NumeratorOfXcg2=sum(g2./J);
NumeratorOfXcg3=sum(g3./J);
DenominatorOfXc=sum(1./J);
Xcc=NumeratorOfXcc/DenominatorOfXc;
Xca1=NumeratorOfXca1/DenominatorOfXc;
Xca2=NumeratorOfXca2/DenominatorOfXc;
Xca3=NumeratorOfXca3/DenominatorOfXc;
Xcg1=NumeratorOfXcg1/DenominatorOfXc;
Xcg2=NumeratorOfXcg2/DenominatorOfXc;
Xcg3=NumeratorOfXcg3/DenominatorOfXc;

```

% step 4: Calculate new candidates around the center of mass by adding or subtracting a normal random number whose value decreases as the iterations elapse. This can be formalized as  $X_{new}=X_c+((l*r)/k)$  where  $X_c$  stands for center of mass,  $l$  is the upper limit of the parameter,  $r$  is a normal random number and  $k$  is the iteration step. Then new point  $X_{new}$  is upper and lower bounded.

```

lc=cmax;
la1=a1max;
la2=a2max;
la3=a3max;

```

```

lg1=g1max;
lg2=g2max;
lg3=g3max;
rc=random('Normal',mc,sc,[NoC,1]);
ra1=random('Normal',ma1,sa1,[NoC,1]);
ra2=random('Normal',ma2,sa2,[NoC,1]);
ra3=random('Normal',ma3,sa3,[NoC,1]);
rg1=random('Normal',mg1,sg1,[NoC,1]);
rg2=random('Normal',mg2,sg2,[NoC,1]);
rg3=random('Normal',mg3,sg3,[NoC,1]);
for i1=1:NoC
    Xnewc(i1,1)=Xcc+((lc*rc(i1))/j);
    Xnewa1(i1,1)=Xca1+((la1*ra1(i1))/j);
    Xnewa2(i1,1)=Xca2+((la2*ra2(i1))/j);
    Xnewa3(i1,1)=Xca3+((la3*ra3(i1))/j);
    Xnewg1(i1,1)=Xcg1+((lg1*rg1(i1))/j);
    Xnewg2(i1,1)=Xcg2+((lg2*rg2(i1))/j);
    Xnewg3(i1,1)=Xcg3+((lg3*rg3(i1))/j);
    c=Xnewc;
    a1=Xnewa1;
    a2=Xnewa2;
    a3=Xnewa3;
    g1=Xnewg1;
    g2=Xnewg2;
    g3=Xnewg3;
end
end

```

```

assignin('base','c',c)
assignin('base','a1',a1)
assignin('base','a2',a2)
assignin('base','a3',a3)
assignin('base','g1',g1)
assignin('base','g2',g2)
assignin('base','g3',g3)

figure
plot(J)

end

```

Όπου το `kfin` δηλώνει τον αριθμό των επαναλήψεων, το `NoC` είναι ο πληθυσμός των πιθανών λύσεων για κάθε μια από τις επτά παραμέτρους (όλοι οι παράμετροι έχουν πάντα τον ίδιο πληθυσμό), τα `cmin`, `cmax`, `a1min`, `a1max`, `a2min`, `a2max`, `a3min`, `a3max`, `g1min`, `g1max`, `g2min`, `g2max`, `g3min`, `g3max` είναι τα όρια των εσωτερικών παραμέτρων του αλγορίθμου ES, τα `mc`, `sc`, `ma1`, `sa1`, `ma2`, `sa2`, `ma3`, `sa3`, `mg1`, `sg1`, `mg2`, `sg2`, `mg3`, `sg3` είναι οι παράμετροι της γεννήτριας normal τυχαίων αριθμών για κάθε εσωτερική παράμετρο του αλγορίθμου ES, το `J_ES` είναι το cost function ISE του αλγορίθμου ES καθώς και το `J` είναι το fitness function ISE του αλγορίθμου BB-BC.

## Βιβλιογραφία

- [1] Kartik B. Ariyur και Miroslav Krstic, “Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control”, USA, 2003
- [2] Nicholas J. Killingsworth, “HCCI Engine Control and Optimization”, USA, California, San Diego, 2007
- [3] Eugenio Schuster, “Extremum Seeking”, USA, Pennsylvania, Bethlehem
- [4] N. Killingsworth και M. Krstic, “PID Tuning Using Extremum Seeking”, Lawrence Livermore National Laboratory, November 2005
- [5] Chunlei Zhang και Raúl Ordóñez, “Extremum-Seeking Control and Applications” A Numerical Optimization-Based Approach, 2012
- [6] Miroslav Krstic, “Extremum Seeking Feedback Tools for Real-Time Optimization”, USA, California, San Diego, August 2005
- [7] Osman K. Erol και Ibrahim Eksin, “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch”, Turkey, Istanbul, April 2005
- [8] Tufan Kumbasar, Ibrahim Eksin, Mujde Guzelkaya και Engin Yesil, “Adaptive fuzzy model base inverse controller design using BB-BC optimization algorithm”, Turkey, Istanbul
- [9] Pavel Y. Tabakov, “Big Bang- Big Crunch Optimization Method in Optimum Design of Complex Composite Laminates”, 2011